

평판형 전자기 액츄에이터의 집중매개변수 모델링 및 해석

황기일 · 김진호* · 이정훈

영남대학교 기계공학과, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

(2010년 8월 11일 받음, 2010년 8월 20일 수정본 받음, 2010년 8월 20일 최종수정본 받음)

평판형 전자기 액츄에이터는 이동코일과 가이드 사이의 마찰이 없기 때문에 초정밀 제품에 널리 사용된다. 전자기 액츄에이터의 성능 검증에 가장 많이 사용되는 방법 중 한 가지는 유한요소해석 방법이다. 하지만 유한요소해석 방법은 해석 시간이 많이 든다는 단점이 있다. 유한요소해석 방법의 대안으로 계산시간은 짧지만 높은 정확도의 해석 결과를 도출해 낼 수 있는 집중매개변수모델 해석방법이 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 평판형 전자기 액츄에이터의 집중매개변수 모델링을 생성하고 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하고 그 결과를 유한요소해석 결과와 비교해 본다.

주제어 : 평판코일, 전자기 액츄에이터, 쇼티드 턴, 집중매개변수모델, 유한요소해석

I. 서 론

평판형 전자기 액츄에이터는 박판 코일을 사용하기 때문에 초소형의 슬림한 장비 및 기계장치를 만드는데 적합하다. 또한, 태양광 정밀트래킹 장치에도 적용 가능하다. 특히, 액츄에이터의 크기가 작고 무게가 가벼우며 기존 로터리 모터의 회전운동으로부터 직선운동을 구현하는 시스템에서 발생했던 마찰, 노이즈 진동 및 백래시 발생의 단점 역시 없어 고정밀도와 빠른 응답속도를 가진다.

평판형 전자기 액츄에이터는 수식(1)로 표현 되는 Lorentz force를 구동력으로 이용하여 직선의 움직임을 만드는 간단한 구조로 되어있다.

$$F = n \cdot B_g i l_{eff} \quad (1)$$

n 은 코일의 감은수 이고, B_g 는 공극 사이의 자속밀도를 나타내며, i 는 인가된 전류를 나타낸다. 그리고 l_{eff} 은 공극 사이의 자속밀도 속에서 반응하는 코일의 길이를 나타낸다. 하지만 이런 장점이 많은 기존의 평판형 전자기 액츄에이터는 전압제어를 할 경우 전자기학적 특성인 인덕턴스(Inductance)에 의해 초기응답 지연현상이 발생 하게 되는 단점을 가지고 있다. 따라서 인덕턴스에 의한 초기응답속도 지연 현상을 줄이기 위해서 Fig. 1과 같이 기존의 평판형 전자기 액츄에이터의 요크와 요크 사이에 중앙요크(center pole)를 넣고 얇은 구리판을 감싸 주었다. 쇼티드 턴이란 중앙요크에 구리 또는 알루미늄 박판을 감은 것으로써, 평판형 전자기 액츄에이터의 코일에 전압을 인가했을 때 구리 박판에 인덕턴스에 의한 큰 역기전력이 발생하게 된다. 따라서 쇼티드 턴을 적용할 경우

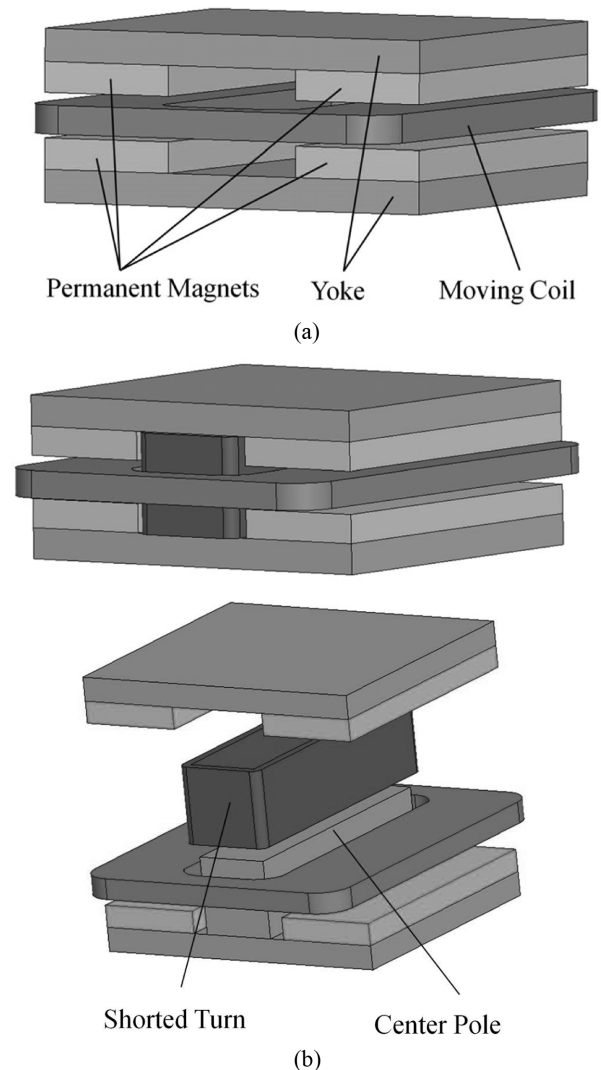


Fig. 1. Schematic diagram (a) conventional flat coil actuator (b) flat coil actuator with shorted turn.

*Tel: (053) 810-2441, E-mail: jinho@ynu.ac.kr

이동코일의 초기반응시의 유효 인덕턴스는 급격히 감소하게 되고 따라서 이동코일의 전류는 급격히 상승하게 된다[1].

김진호 외 1명은 응답속도 향상을 위해 쇼트드턴을 적용한 평판형 액츄에이터를 제안하였고 유한요소해석(FEA)을 통해 검증하였다[2]. 유한요소해석은 해석결과의 아주 높은 정확도 때문에 가장 많이 사용되는 전자기 액츄에이터 해석 방법이다. 하지만 유한요소해석 방법은 계산에 시간이 너무 많이 걸린다는 단점이 있다. 이에 반해 집중매개변수모델 해석 방법(lumped parameter analysis)는 짧은 시간에 높은 정확도의 결과를 준다는 장점이 있다[3, 4]. 따라서 본 논문에서는 쇼트드턴을 적용한 평판형 전자기 액츄에이터 동적 성능을 집중매개변수 모델 해석 방법을 이용하여 검증하고, 그 결과를 유한요소 해석 결과와 비교하고자 한다.

II. 집중매개변수 모델링 및 해석

쇼트드턴을 적용한 전자기 액츄에이터의 코일과 쇼트드턴의 자속 유통의 모습이 Fig. 2에 나타나 있다. 코일이 흐르는 과도전류 i_1 에 의해서 쇼트드턴에 i_2 가 코일에 흐르는 전류의 반대 방향으로 유도된다. 코일과 쇼트드턴에 유도되는 Faraday 전압 e_1 , e_2 는 Faraday 법칙에 의해 수식(2)와 (3)으로 표현된다.

$$e_1 = \frac{d\lambda(i, x)}{dt} = N_1 \frac{d(\Phi_{12} + \Phi_1)}{dt} \quad (2)$$

$$e_2 = N_2 \frac{d(\Phi_{12} + \Phi_2)}{dt} \quad (3)$$

여기서, λ = 자속쇄교수, i = 전류, x = 변위.

쇼트드턴과 코일에 인가되는 전압은 Kirchhoff와 Ohm의 법칙에 의해 각각 수식(4)와 (5)로 표현된다.

$$V_1 = R_1 i_1 + e_1 \quad (4)$$

$$0 = R_2 i_2 + e_2 \quad (5)$$

또한, 기자력은 Ampere의 법칙에 의해 각각 수식(6), (7) 및 (8)로 표현된다.

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \frac{\Phi_{12}}{P_{12}} \quad (6)$$

$$N_1 i_1 = \frac{\Phi_1}{P_1} \quad (7)$$

$$N_2 i_2 = \frac{\Phi_2}{P_2} \quad (8)$$

수식(6)과 (7)을 조합하여 수식(2)에 대입하면 수식(9)를 얻을 수 있고, 이 수식을 수식(4)에 대입하면 수식(10)을 얻을 수 있다. 수식(10)에는 인덕턴스 항과 코일의 이동과 시간에 따른 자속의 변화 량인 스피던스 항이 들어있다[5].

$$e_1 = N_1 \frac{d[P_{12}(N_1 i_1 + N_2 i_2) + P_1 N_1 i_1]}{dt} + K_g \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

$$V_1 = R_1 i_1 + N_1^2 (P_{12} + P_1) \frac{di_1}{dt} + N_1 N_2 P_{12} \frac{di_2}{dt} + K_g \frac{dx}{dt} \quad (10)$$

수식(3)과 수식(5)를 조합해서 만들어지는 수식(11)에 수식(6)과 수식(8)을 조합해서 대입하면 수식(12)를 얻을 수 있다.

$$0 = R_2 i_2 + N_2 \frac{d(\Phi_{12} + \Phi_2)}{dt} \quad (11)$$

$$0 = R_2 i_2 + N_2 \frac{d[P_{12}(N_1 i_1 + N_2 i_2) + P_2 N_2 i_2]}{dt} \quad (12a)$$

$$0 = R_2 i_2 + N_1 N_2 P_{12} \frac{di_1}{dt} + N_2^2 (P_{12} + P_2) \frac{di_2}{dt} \quad (12b)$$

수식(10)과 수식(12)에 아래 정의된 함수를 적용하면 수식(13)과 수식(14)를 얻을 수 있다.

$$V_1 = R_1 i_1 + (L_{12} + L_1) \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2^*}{dt} \quad (13)$$

$$0 = R_2^* i_2^* + L_{12} \frac{di_1}{dt} + (L_{12} + L_2) \frac{di_2^*}{dt} \quad (14)$$

$$0 = R_2^* i_2^* + L_{12} \frac{di_1}{dt} + (L_{12} + L_2) \frac{di_2^*}{dt} \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{\mu_0 \cdot A_{coil}}{l_{coil}} \quad (16)$$

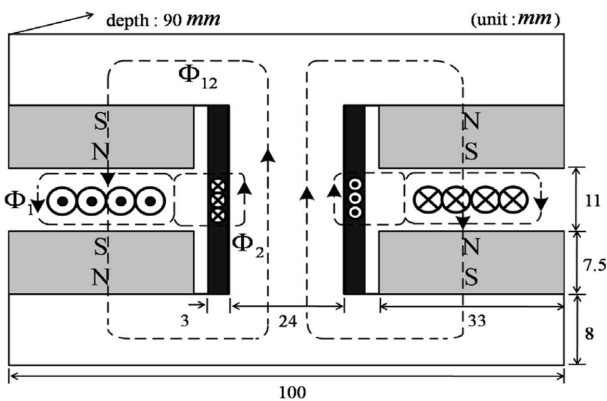


Fig. 2. Lumped parameter model of flat coil actuator with shorted turn.

$$P_2 = \frac{\mu_0 \cdot A_{shorted}}{l_{shorted}} \quad (17)$$

여기서, $i_2^* = \frac{N_2}{N_1} i_2$, $R_2^* = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 i_2$,

$$L_1 = N_1^2 P_1, L_2 = N_2^2 P_2, L_{12} = N_1^2 P_{12}$$

전류 j 에 의해서 이동코일에 적용되는 로렌츠힘은 $F = K_j i$ 로 나타낼 수 있다. 또한, 기계방정식은 수식(18)과 (19)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad (18)$$

$$K_j i = m \frac{d\dot{x}}{dt} + c\dot{x} + K_s x \quad (19)$$

여기서, m = 이동 코일과 가이드의 무게,
 c = 점성감쇠계수, K_s = 스프링 강성.

위의 수식(13), (14)와 (15)를 소티드 턴을 적용한 평판형 전자기 액츄에이터를 해석하기 위해 재정렬 하게 되면 다음 수식과 같다.

$$m \frac{d\dot{x}}{dt} = -c\dot{x} - K_s x + K_j i \quad (20)$$

$$(L_{12} + L_1) \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2^*}{dt} = V_1 - R_1 i_1 - K_g \dot{x} \quad (21)$$

$$L_{12} \frac{di_1}{dt} + (L_{12} + L_2) \frac{di_2^*}{dt} = -R_2 i_2^* \quad (22)$$

또한 수식(18), (19), (21)과 (22)를 행렬형태로 만들면 행렬 (23)과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (L_{12} + L_1) & L_{12} \\ 0 & 0 & L_{12} & (L_{12} + L_2) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i_1 \\ i_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ K_2 & c & -K_f & 0 \\ 0 & K_g & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i_1 \\ i_2^* \end{bmatrix} \quad (23)$$

행렬(23)을 간략하게 나타내면 수식(24)와 같다.

$$M \frac{dX}{dt} = Y - KX \quad (24a)$$

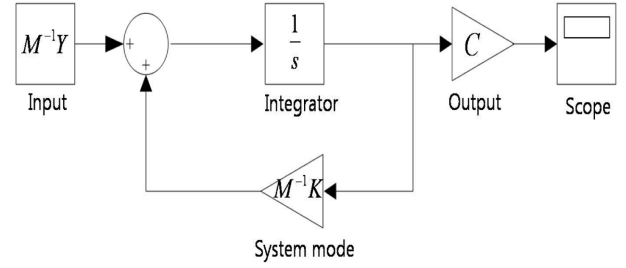


Fig. 3. Matlab simulink model.

$$\frac{dX}{dt} = M^{-1}(Y - KX) \quad (24b)$$

행렬(23)을 수치적으로 풀기 위해 매트랩 시뮬링크를 활용하여 Fig. 3과 같은 시뮬링크 모델을 만들고 계산 하였다.

III. 결 론

Fig. 4는 소티드 턴을 적용한 평판형 전자기 액츄에이터의 동적 성능을 집중매개변수 모델 해석 방법으로 해석한 결과와 유한요소해석을 이용하여 해석한 결과를 비교해서 보여준다. 기계시스템, 자기시스템 그리고 전기시스템으로 구성된 평판형 전자기 액츄에이터의 유한요소해석은 상용전자기 해석 프로그램인 MAXWELL을 이용하여 수행하였다.

제안된 평판형 전자기 액츄에이터의 유한요소 해석 모델은 기계시스템, 자기시스템, 전기시스템의 세가지 서브시스템으로 구성되어 있다. 결합된 세 시스템을 해석하기 위해서 130,000여 개의 삼각형 요소로 구성된 동적 2D 유한요소 모델을 만들고 보이스 코일 모터의 이동 코일이 초기상태에서 오른쪽 방향으로 이동하며, 해석은 1 ms 동안을 4 μ s 구간으

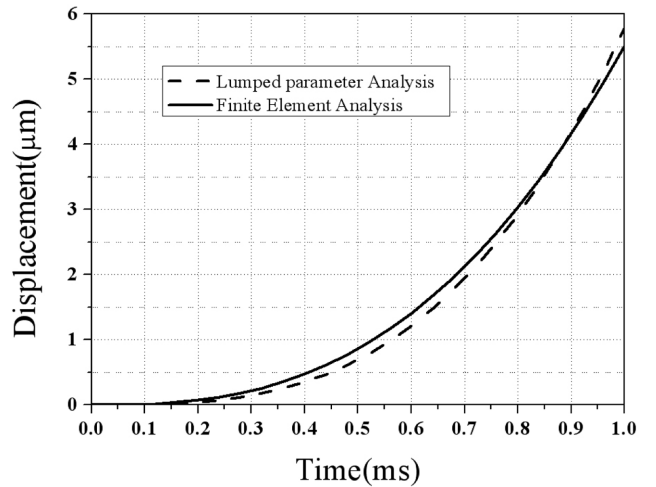


Fig. 4. Comparison of displacement versus time.

로 나누어 수행 하였다.

Fig. 4의 그래프는 시간에 따른 이동코일의 변위에 대한 그래프이다. 그래프에서 집중매개변수모델 해석의 결과와 유한요소해석 결과가 상당히 일치함을 보인다. 하지만 유한요소해석 프로그램은 전자기학적 특성인 와전류 효과(eddy current effect) 및 히스테리시스 손실(hysteresis loss) 등을 고려하여 해석한 반면 집중매개변수모델 해석의 경우에는 그러한 손실들을 고려하지 못했기 때문에 조금의 오차가 발생하게 되었다. 향후 연구에서는 와전류 효과 및 히스테리시스 손실들을 고려하여 유한요소해석 결과와 오차범위를 줄이는 집중매개변수모델 및 해석을 진행하도록 하겠다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단

단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] J. Arthur Wagner, IEEE Trans. Magn. **18**, 1770 (1982).
- [2] K. I. Hwang and J. H. Kim, Journal of the Korean Magnetic Society **19**, 222 (2009).
- [3] J. H. Kim, Journal of Magnetism **11**, 151 (2006).
- [4] J. P. Wang, D. K. Lieu, W. L. Lorimer, and A. Hartman, IEEE Trans. Magn. **33**, 4092 (1997).
- [5] H. D. Chai, Electromechanical motion devices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, Newjersey (1998) pp. 201~206.

Lumped Parameter Modelling and Analysis of Flat Coil Actuator with Shorted Turn

Ki-II Hwang, Jin-Ho Kim*, and Jung-Hun Lee

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Received 11 August 2010, Received in final form 20 August 2010, Accepted 20 August 2010)

The flat coil actuator is widely used to make high precision products because it has no friction between the moving coil and the guide. Finite Element Method, a favored actuator design tool due to its high accuracy, was utilized to analyze the electromagnetic actuator, but it consumes a lot of time especially in computation iterations for optimization. Accordingly, the magnetic equivalent circuit analysis can be an alternative tool to FEM because of its computation iteration capability with fair accuracy. In this paper, lumped parameter model and the simulation results are presented. In addition, the result of lumped parameter analysis is compared with those obtained from finite element analysis for verification.

Keywords : flat coil, electromagnetic actuator, shorted turn, lumped parameter model, finite element analysis