

전자기 리니어 액츄에이터의 집중매개변수 모델링 및 해석

장재환*, 조성진*, 김진호*[#]

*영남대학교 기계공학과

Lumped Parameter Modeling and Analysis of Electromagnetic Linear Actuator

Jae-Hwan Jang*, Seong-Jin Cho*, Jin Ho Kim*[#]

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam UNIV.

(Received 17 August 2015; received in revised form 23 May 2016; accepted 16 June 2016)

ABSTRACT

An electromagnetic linear actuator is controlled precisely and securely and is useful in devices that require linear motion. The most commonly used method in the performance verification process for an electromagnetic actuator is finite element analysis that utilizes CAE. However, finite element analysis has the disadvantage that modeling and analysis consume a lot of time. Accordingly, lumped parameter analysis can be an alternative approach to the finite element method because of its computation iteration capability with fair accuracy. In this paper, the lumped parameter model and simulation results are presented. In addition, the results of the lumped parameter analysis are compared with those obtained from finite element analysis for verification.

Key Words : Electromagnetic Actuator(전자기 액츄에이터), Lumped Parameter Analysis(집중매개변수 해석), Finite Element Analysis(유한 요소 해석)

1. 서 론

전자기 리니어 액츄에이터는 전자기 에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 장치로서 회전형 기기와는 달리 직선운동의 시스템 구조이므로 동작이 간단하여 제어가 쉽고 코일의 권수, 인가전압에 따라 힘, 반응속도, 반응시간 등을 자유롭게 설정할 수 있다.^[1]

전자기 사각 리니어 액츄에이터는 하우징, 솔레노이드 코일, 피스톤, 스프링, S10C으로 만들어진

요크와 아마추어로 구성되어 있는데 이를 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 개략도인 Fig 1에 나타내었다. 이에 대한 작동원리는 리니어 액츄에이터의 솔레노이드 코일에 전류가 인가되면 발생하는 자기력에 의해 아마추어가 아래쪽으로 이동하면서 결합된 가이드에 부착된 구조물을 이동시키게 된다. 이동된 아마추어를 제자리로 이동하기 위해서는 솔레노이드 코일에 전류를 차단하고 스프링 힘을 이용해서 다시 돌아가게 되는 원리이다.

Fig 2는 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 작동원리를 보여준다.

Corresponding Author : jinho@ynu.ac.kr

Tel: +82-53-810-2441, Fax: +82-53-810-4627

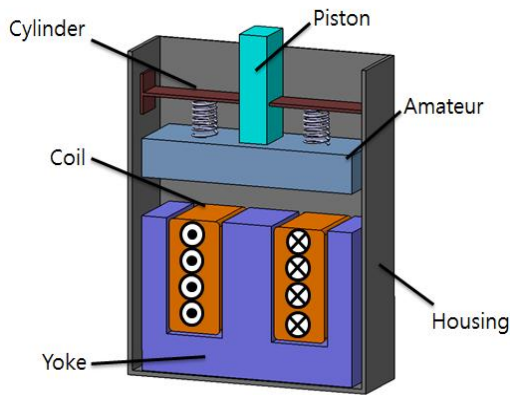


Fig. 1 Schematic diagram of electromagnetic linear actuator

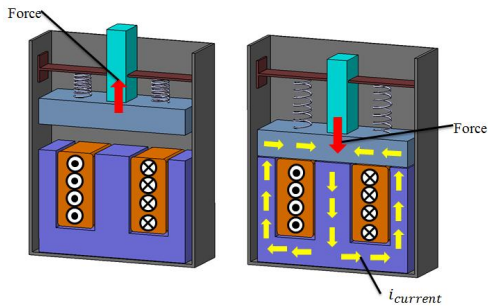


Fig. 2 Principle of operation (a) at the upper position (b) at lower position

이러한 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 동적 성능 해석 방법으로는 높은 정확도를 가지는 유한요소해석(finite element analysis)이 많이 쓰이고 있다. 하지만 유한요소해석은 모델링이 어렵고 모델의 격자수가 많이 생성되기 때문에 이를 계산하는 해석 시간이 길어지게 되는 단점을 가지고 있다.^[2] 이에 반해 집중매개변수 모델 해석 방법(lumped parameter analysis)은 짧은 시간에 많은 계산을 할 수 있으며 비교적 높은 정확도의 결과를 준다는 장점이 있다.^[3] B. J. Sung는 밸브 구동용 고속 리니어 액츄에이터를 설계하고 타당성을 입증하기 위해 FEM 해석을 사용하였고^[4], S. M. Yoon 외 2명은 사각형 전자기 액츄에이터의 등가 모델 생성하여 동적성능을 파악하는 연구를 위해 유한요소 해석 프로그램을 사용하였다.^[2] 이와 같이 유한요

소해석을 통해 액츄에이터의 성능을 검증하는 연구는 활발히 진행되고 있으나 집중매개변수를 이용한 전자기 리니어 액츄에이터의 연구는 미흡한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 성능을 집중매개변수모델 해석을 이용하여 검증하고, 그 결과를 유한요소 해석 결과와 비교 하고자 한다.

2. 집중매개변수 모델링

2.1 집중매개변수 모델링

Fig 3는 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 집중매개변수 모델을 나타내었으며 Fig 4은 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 자기회로를 나타내었다. 그리고 Table 1에는 각각의 설계변수의 치수를 나타내었다.

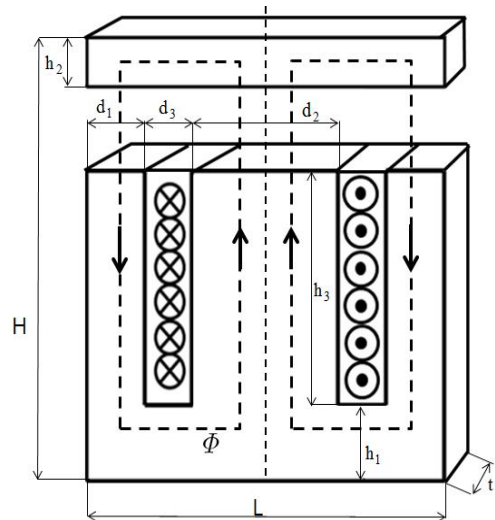


Fig. 3 Lumped parameter model of electromagnetic linear actuator

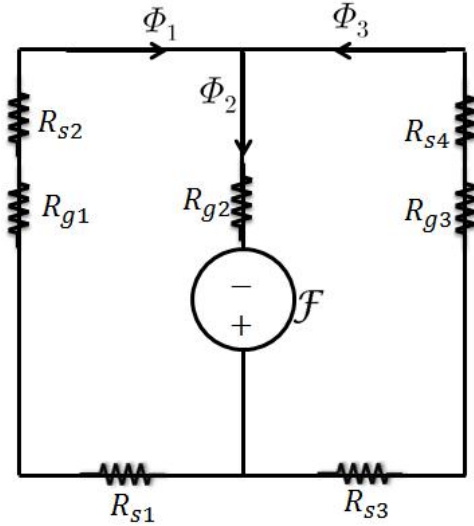


Fig. 4 Magnetic circuit for lumped parameter analysis

Table 1 Design parameter for lumped parameter analysis

	Parameter	value [mm]
H	Height of device	15
L	Width of device	15
h_1	Height of upper stator	2.5
h_2	Height of amateur	2.5
h_3	Height of coil	7.5
d_1	Width of side teeth	1.5
d_2	Width of center teeth	4
d_3	Width of coil	4
t	Thickness of device	5

본 연구에서는 전자기 사각 리니어 액츄에이터가 정대칭인 모양을 이용하여 절반으로 나누어서 해석하였다. Fig 5는 집중매개변수 해석을 위한 전자기 리니어 액츄에이터의 모델을 보여준다. 각 물질 및 air gap에 대한 릴럭턴스의 정보는 Table 2에 나타내었으며 이를 이용하여 집중매개변수 해석 과정은 다음과 같다. 집중매개변수 해석을 하기 위한 릴럭턴스 $R[A/Wb]$ 는 식 (1)과 같다. l 은 각 요소의 길이, μ 는 각 재료의 투자율, A 는 자속이 흐르는 단면적을 나타낸다.

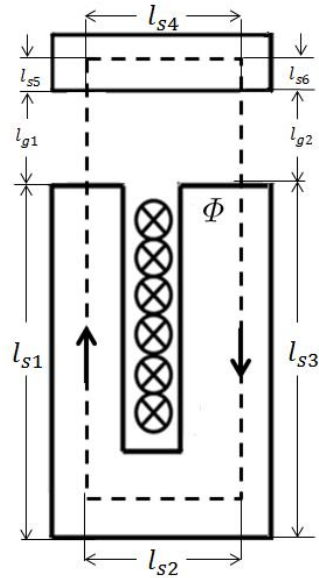


Fig. 5 Lumped parameter half model for analysis

Table 2 Reluctance of lumped parameter analysis

	Parameter	Value [A/Wb]
R_{s1}	Reluctance of upper steel	2.78×10^6
R_{s2}	Reluctance of amateur	0.98×10^6
R_s	Total reluctance of yoke	3.76×10^6
R_{g1}	Reluctance of left air gap	2.65×10^8
R_{g2}	Reluctance of right air gap	1.98×10^8
R_g	Total reluctance of air gap	4.63×10^8

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (1)$$

요크의 릴럭턴스는 식 (2)~(4)로 표현 할 수 있다.

$$R_{s1} = \frac{l_{s1} + l_{s2} + l_{s3}}{\mu_s A_{s1}} \quad (2)$$

$$R_{s2} = \frac{l_{s4} + l_{s5} + l_{s6}}{\mu_s A_{s2}} \quad (3)$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s2} \quad (4)$$

공극의 릴럭턴스는 식 (5)~(7)로 표현 할 수 있다.

$$R_{g1} = \frac{l_{g1}}{\mu_0 A_{g1}} \quad (5)$$

$$R_{g2} = \frac{l_{g2}}{\mu_0 A_{g2}} \quad (6)$$

$$R_g = R_{g1} + R_{g2} \quad (7)$$

식 (8)는 리니어 액추에이터의 공극사이에서 발생하는 힘을 표현한 수식이다. 자속 Φ 은 식(9)과 같이 표현할 수 있다. N 은 솔레노이드의 코일 권수(turn)를 의미하고 i 는 인가전류(A)를 의미한다.

$$F_{magnetic} = \frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR}{dx} \quad \frac{dR}{dx} = \frac{1}{\mu_0 A} \quad (8)$$

$$\Phi = BA = \frac{Ni}{R_s + R_g} \quad (9)$$

자속밀도 B 는 식 (9)을 이용해서 식(10)와 같이 계산할 수 있다. P 는 재료의 투자도로 자속이 통하기 쉬움을 나타내는 양을 의미한다.

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{NiP}{A} \quad (10)$$

$$P = \frac{\mu_0 A}{l_g} \quad (11)$$

따라서, 식 (8)를 식 (9), (10), (11)를 이용해서 전자기 리니어 액추에이터에 발생하는 힘은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.^[5]

$$F_{magnetic} = \frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (12)$$

3. 전자기 시뮬레이션 모델링 및 해석

3.1 전자기 시뮬레이션 모델링

2절에서 전자기 사각 리니어 액추에이터에 발생하는 힘을 나타내는 식 (12)를 이용하여 집중매개 변수 해석을 수행하였다. 수행된 결과 값을 유한 요소 해석을 통해 도출한 결과 값과 비교하고자 전자기 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 상용 유한 요소 전자기 해석 프로그램인 MAXWELL은 전자장 해석을 통해 다양한 연구에 많이 사용된다. H. R. Lee 외 3명은 Maxwell을 사용하여 전자장해석을 통한 차량 용기용 밸브 솔레노이드를 설계하였으며,^[6] J. H. Jang 외 1명은 전자장 해석을 이용하여 로테이션래치 시스템의 최적설계 연구를 진행하였다.^[7] 본 연구에서도 전자기 해석을 통해 S10C B-H curve의 선형 구간과 비선형 구간에서 비교 분석을 수행하였다. Fig 6은 시뮬레이션에 사용된 전자기 사각 리니어 액추에이터의 2-D 모델이며, 이 때의 모델링 사양을 Table 3에 나타내었다. 또한, 시뮬레이션을 진행하기 위해 프로그램에서 사용된 각 재료의 물성을 Table 4에 제시하였으며 솔레노이드 코일의 권선은 450턴이고, 전류는 3.89 A를 인가하였다.

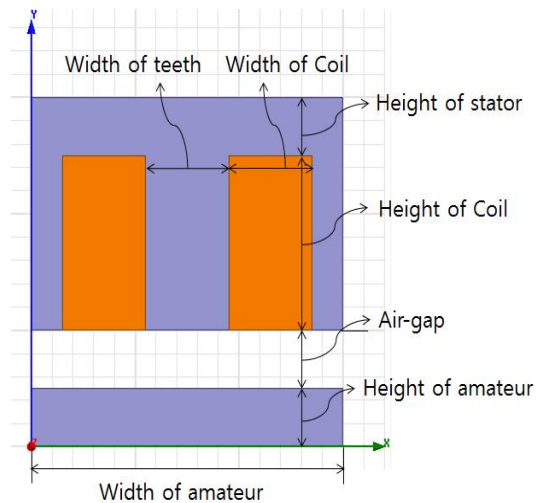


Fig. 6 The electromagnetic 2-D simulation model

Table 3 Design parameter of electromagnetic linear actuator

Parameter	value [mm]
Height of stator	2.5
Height of coil	7.5
Width of coil	4
Width of teeth	4
Air-gap	2.5
Height of amateur	2.5
Width of amateur	15

Table 4 Properties of electromagnetic linear actuator

Name	Properties		
Stator	S10C		
Amateur			
Coil	Copper	Number of turns	467
		Resistance(Ω)	3.08

3.2 선형 구간에서의 해석

Fig 7은 S10C의 B-H 곡선과 리니어 곡선의 비교를 나타내고 있다. S10C의 선형 구간에서의 비투자율은 380이다.^[8] 선형 구간에서 S10C의 투자율을 이용하여 유한요소 해석 결과와 집중매개변수모델을 통한 해석 결과를 Table 5에 나타내었으며, 결과의 오차는 약 9%임을 확인할 수 있었다.

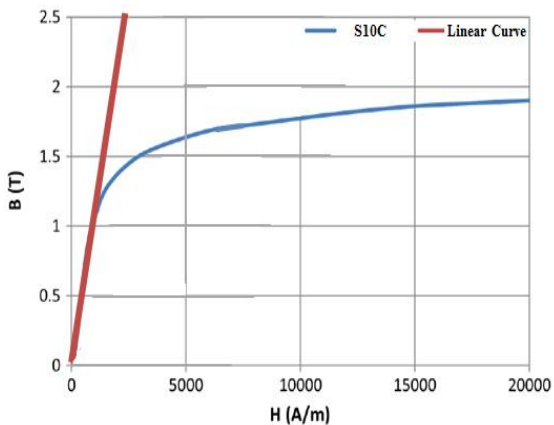


Fig. 7 B-H curve of S10C compared with a linear curve

Table 5 Force Comparison of lumped parameter analysis and finite element analysis at linear section

result of finite element analysis[N]	result of lumped parameter analysis[N]
2.86	2.62

3.3 비선형 구간에서의 해석

선형 구간의 집중매개변수모델 해석 결과와 S10C의 B-H 커브를 이용한 비선형 구간에서의 유한요소해석의 결과를 비교해보았다. B-H 커브에서의 S10C의 투자율을 이용해서 해석을 한 결과를 Table 6에 나타내었으며, 집중매개변수모델 해석의 결과와 유한요소의 결과의 오차는 약 1.1%임을 확인할 수 있었다.

Table 6 Force comparison of lumped parameter analysis at linear curve and finite element analysis at non-linear section

result of finite element analysis[N]	result of lumped parameter analysis[N]
2.59	2.62

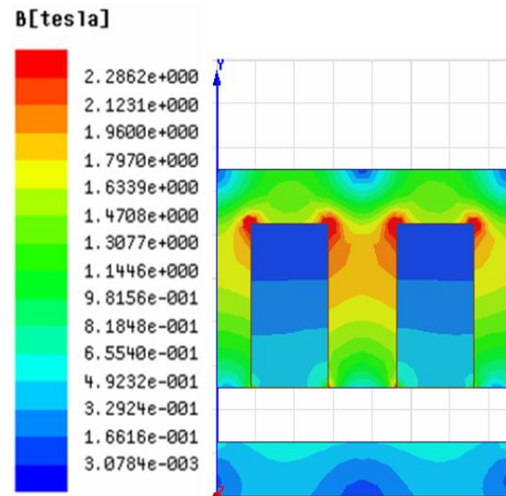


Fig 8 B field of linear analysis

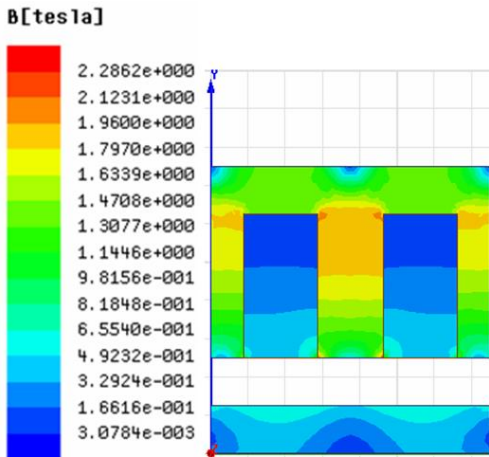


Fig. 9 B field of non-linear analysis

Fig 7은 선형 구간에서의 S10C의 투자율을 이용해서 해석한 결과의 B field이고, Fig 8은 비선형 구간에서의 투자율을 이용해서 해석한 결과의 B field이다. 이와 같이 같은 전류를 인가하더라도 발생하는 흡인력의 경우 일반적으로 공극에서 자속밀도의 제곱으로 비례한다. 이 때, 자속밀도를 결정하는 중요 요인은 재료의 비투자율이다. 그러므로 비선형 구간에서 발생하는 히스테리시스 손실(hysteresis loss), 와전류(eddy current)의 발생으로 인한 영향 때문에 선형 구간과는 자속밀도의 값이 다르다.^[9] 이러한 이유 때문에 선형 구간의 투자율을 이용한 해석에서 자속이 더 포화되는 것을 확인할 수 있다.

3. 고찰

집중매개변수모델 해석과 유한요소해석을 비교한 결과 선형에서는 9%, 비선형에서는 1.1%의 오차가 발생함을 알 수 있다. 이 오차는 유한요소해석의 경우에는 전자기학적 특성인 와전류 효과(eddy current)와 히스테리시스 손실(hysteresis loss)을 고려해서 해석을 수행하지만, 집중매개변수모델 해석은 이러한 전자기적 특성을 고려하지 않고 해석을 수행하기 때문에 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 집중매개변수모델 해석은 짧은 시간

에 많은 해석을 수행할 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 유한요소해석을 수행하기 전에 집중매개변수모델 해석을 통한 전자기 리니어 액츄에이터의 성능을 예측할 수 있다. 그리고 선형 구간에서의 투자율을 이용해서 집중매개변수모델 해석과 비선형 구간의 유한요소해석 결과를 비교한다면 오차를 줄여서 더 높은 정확도를 가져다 줄 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 전자기 사각 리니어 액츄에이터의 성능을 집중매개변수모델 해석을 이용하여 검증하고, 그 결과를 유한요소 해석 결과와 비교 및 분석을 수행하였다. 집중매개변수모델 해석을 위해 선형 구간과 비선형 구간에서의 투자율 및 B-H 커브를 이용하여 집중매개변수모델 해석과 유한요소해석의 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 도출했다.

- (1) 집중매개변수 모델 해석 결과 2.62[N]를 도출하였으며 유한요소해석 결과 선형 구간은 2.86[N], 비선형 구간에서는 2.59[N]의 해석 값을 도출하였다.
- (2) 이를 통해, 선형 구간의 투자율을 이용한 해석은 약 9%, 비선형 구간에서의 투자율을 이용한 해석은 약 1.1%의 오차가 발생한 것을 알 수 있었다.
- (3) B field를 분석한 결과 동일한 전류를 인가해도 발생하는 자속밀도가 다르기 때문에 비선형 구간보다 선형 구간에서의 자속이 더 포화되는 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

1. Kim, J. H., Lee, J. H., Lee, J. Y, "Analysis and Design of Hybrid Electromagnetic Linear Actuator for Linear Pump", Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 20, No. 3, pp. 28-33, 2010

2. Yoon, S. M., Kim, J. H., Park, S. M., “2D Equivalent Finite Element Model of Quadratic Linear Electromagnetic Actuator”, The Korean Society of Mechanical Engineers, pp.798-802, 2011
3. Kim, J. H., Lee, J. H., Kim, J. H., Jeong, S. H. and Han, B. W., “Lumped Parameter Modeling and Analysis of Electromagnetic Vibration Exciter for Vibrating Rapper of electrostatic Precipitator”, J. of KOMAG, Vol. 21, No. 3, pp. 61-66, 2011
4. Sung, B. J, “A Design of High-Speed Linear Actuator for Valve”, The Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 1, No. 8, pp. 1-9, 2011
5. Hyun, D. G., Shin, A. K. and Park, S. W., “Theoretical Study on Magnetic Force of Electromagnet for Physics Education”, Journal of KOSSS, Vol. 9, No. 1, pp.50-59, 2015
6. Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O and Kim, H. Y., “Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.15 No.2, pp.89~96, ISSN 2288-0771(Online), 2016. 4
7. Jang, J. H., Kim, J. H., “Optimal Design for Improved Rotation Latch System Performance”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.14 No.5, pp.102~106, ISSN 2288-0771(Online), 2015.10
8. Robert M., Del Vecchio., Rajendra Ahuja., “Analytic Nonlinear Correction to the Impedance Boundary Condition”, IEEE Trans. Magn., Vol. 49, No. 12, pp.5687-5691, 2013
9. Ynu, S. N., Park, J. H., Han, S. M., Kwon, S. W., “Experimental Analysis of Solenoid Actuator for Electro-hydraulic Proportional Pressure Control”, Journal of the Korea Society For Power System Engineering., Vol. 2009, No. 6, pp.154-159, 2009.