

리니어 펌프 구동용 하이브리드 전자기 리니어 액츄에이터 해석 및 설계

이정훈 · 김진호* · 이재용

영남대학교 공과대학 기계공학과, 경북 경산시 대동 214-1, 712-749

정상현 · 한방우

한국기계연구원, 대전시 유성구 장동 171, 305-343

(2009년 11월 11일 받음, 2010년 1월 8일 최종수정본 받음, 2010년 1월 13일 게재확정)

리니어 펌프 구동용 하이브리드 전자기 리니어 액츄에이터를 해석하고 설계하였다. 솔레노이드 액츄에이터는 기계적인 에너지 변환장치가 필요하지 않기 때문에 공간을 많이 차지하지 않는 이점으로 인해 널리 사용되고 있다. 또한 에너지 손실이 매우 낮고 소음이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 하지만, 솔레노이드 액츄에이터는 전력소비가 크다는 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 보완하여 전력소비를 줄이기 위하여 영구자석을 활용한 새로운 하이브리드 전자기 리니어 액츄에이터를 제안하고 향상된 성능을 검증하기 위해 동적 유한요소 분석을 통해 시뮬레이션을 수행하였다.

주제어 : 전자기 선형 액츄에이터, 솔레노이드, 영구자석, 리니어 펌프

I. 서 론

현재 건강, 의료기기, 컴퓨터, 자동차, 항공기, 펌프장치 등 다양한 산업부 분야에서 리니어 왕복 운동 시스템이 광범위하게 요구되고 있고, 이를 위한 구동원으로써의 리니어 액츄에이터는 시스템의 단순성 및 경제성으로 인하여 최근 국내외적으로 구동개념 및 종류, 방법 등의 측면에서 다양하게 연구·개발되고 있다[1]. 하지만 산업현장에서 이용되고 있는 직선 운동용 산업 기기에는 회전형 전동기와 같이 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 기계적인 부가장치를 결합한 이중구조의 구동시스템, 즉, 볼스크류, 체인, 기어 등과 같은 기계장치가 주로 이용되고 있고, 시스템 구성이 복잡하고 기계가공에 있어 고도의 정밀도가 요구된다. 또한 각각의 부품 사이에서 마찰에 의한 에너지 손실과 소음이 발생하고, 고속 응답성, 내구성 및 정밀 위치제어에서의 한계 그리고 비용과 정밀도 면에서 문제가 많이 발생하는 단점을 가지고 있다. 그러나 전자석의 전류코일에 의해 구동력을 직접 발생시키는 솔레노이드 리니어 왕복운동 액츄에이터는 리니어 구동 시스템에 응용하는 경우 볼스크류, 체인, 기어 시스템 등의 기계적 에너지 변환장치가 필요하지 않다. 따라서 필요한 기계적 부품 수가 줄어들기 때문에 공간을 많이 차지하지 않을 뿐만 아니라, 마찰이 적어져 에너지 손실이나 소음이 줄어드는 장점을 가지고 있다.

Fig. 1은 현재 사용되고 있는 리니어 왕복펌프의 솔레노이드 액츄에이터의 개략도를 보여주고 있다. 이 액츄에이터는 전자기력이 작용할 때 플런저(plunger)가 왼쪽으로 이동하면

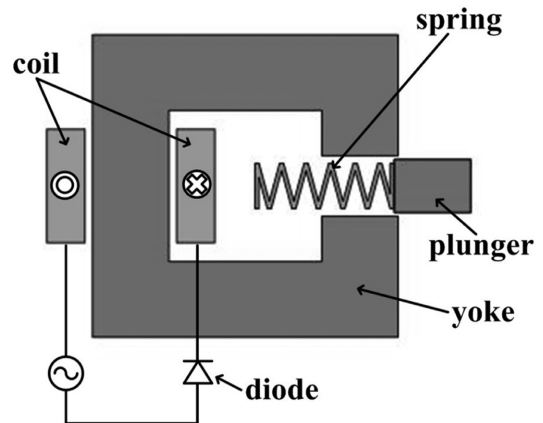


Fig. 1. Schematic diagram of solenoid actuator.

서 스프링을 압축시키고 전자기력이 끊어지면 스프링의 복원력으로 플런저가 오른쪽으로 이동하면서 전원주파수와 같은 횡수로 왕복운동 하는 메커니즘으로 되어 있고 플런저의 직경과 길이에 따라 유량과 압력이 결정된다[2].

하지만 이러한 구조는 플런저의 왕복운동에 필요한 소요자속을 솔레노이드에만 의존하므로 전력소비가 크다는 단점을 가지고 있다.

따라서 이 연구에서는 영구자석을 활용하여 솔레노이드와 영구자석을 결합한 신개념 하이브리드 리니어 액츄에이터를 소개하고, 제안된 액츄에이터의 향상된 성능을 규명하기 위하여 상용 자기장 해석 프로그램인 맥스웰(Maxwell)을 사용하여 동적 유한요소 시뮬레이션을 통해 기존의 전자석으로만 이루어진 솔레노이드 리니어 액츄에이터와의 성능을 비교, 분석 및 검증한다.

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

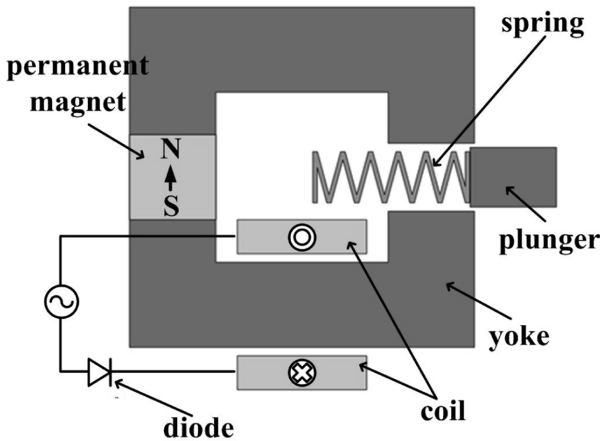


Fig. 2. Schematic diagram of hybrid magnet actuator.

II. 영구자석을 활용한 하이브리드 전자기 액추에이터

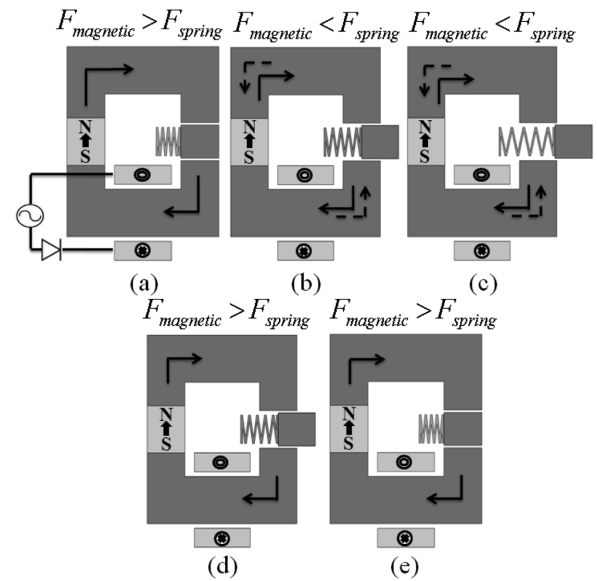
1. 작동원리

Fig. 2는 영구자석을 활용한 하이브리드 액추에이터의 개략도를 보여준다. 이 액추에이터는 하나의 영구자석, 하나의 솔레노이드, 1010 탄소강으로 만들어진 요크(yoke)와 플런저, 스프링으로 구성되어 있다. 이 때 영구자석은 요크 안에 위치하게 된다. Fig. 3은 하이브리드 액추에이터의 작동원리를 보여준다. 화살표는 영구자석의 자기력선을 나타내고 점선 화살표는 솔레노이드의 자기력선을 나타낸다[3].

초기 위치에서는 영구자석의 자기력이 스프링의 힘보다 크므로($F_{magnetic} > F_{spring}$) 플런저를 요크의 중간지점에 위치하게 된다(Fig. 3(a)). 이 때, 스프링은 압축을 받게 되고 흡입밸브가 열리게 된다.

코일에 정현파나 구형파 펄스를 인가하면 입력 전류가 양의 값(positive)일 때는 코일이 자화되어 영구자석의 자기력을 상쇄시키는 반대 방향으로의 자기력이 솔레노이드에 발생하게 되고, 요크에 흐르는 자기력은 스프링의 힘보다 작아지게 되어($F_{magnetic} < F_{spring}$) 플런저는 스프링의 복원력에 의해 오른쪽으로 이동하게 된다(Fig. 3(b)). 즉, 이때는 흡입밸브가 닫히고 토출밸브가 열리면서 펌프가 동작하게 된다. 반면에 입력 전류가 음의 값(negative)일 때는 다이오드의 정류에 의해 전류가 차단되고 솔레노이드로부터의 자기력이 끊어지게 되므로 영구자석의 자기력이 스프링의 힘보다 다시 커지게 된다($F_{magnetic} > F_{spring}$). 따라서 영구자석의 자기력에 의해 플런저는 다시 초기위치로 돌아오게 되고, 토출 밸브가 닫히고 흡입밸브가 열리게 된다. 이러한 과정에서 플런저는 일정한 스트로크(stroke)로 고속 왕복운동을 하는 메커니즘으로 구성된다(Fig. 3(c)-Fig. 3(e)).

전체적인 액추에이터의 크기는 대략 150 mm(폭) × 150



→ permanent magnet flux - - -> solenoid flux

Fig. 3. Principle of operation (a) at initial position (b) at exerting current (c) at neutral position (d) at switch off the current (e) at returning to initial position.

mm(높이) × 50 mm(두께)이고, 플런저의 크기는 20 mm(폭) × 40 mm(높이) × 50 mm(두께)이다.

2. 수학적 모델링

Fig. 4는 솔레노이드 액추에이터와 공극(air gap)에서의 자속의 모습을 보여주고 있다.

초기 위치에서 코일에 전류를 인가할 때 발생하는 인덕턴스(inductance)는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. P 는 퍼미언스(permeance), A_g 는 공극의 단면적, g 는 공극의 길이, μ_0 는 공기 중의 투자율, N 은 코일의 감김수, i 는 입력전류이다.

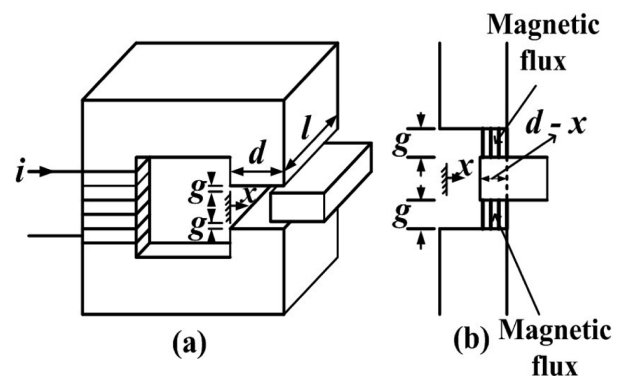


Fig. 4. (a) Solenoid linear actuator (b) detail showing air-gap configuration with the plunger partially removed.

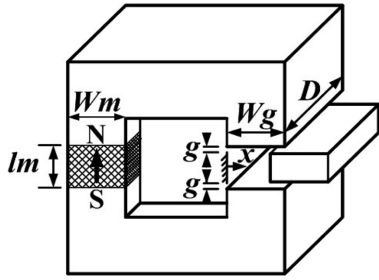


Fig. 5. Permanent magnet magnetic circuit.

$$L(x) = N^2 P = \frac{\mu_0 N^2 A_{gap}}{g} \quad (1)$$

인덕턴스로부터 마그네틱 코어(magnetic core)의 코에너지(coenergy)를 식 (2)와 같이 구하고, 플런저에 작용하는 추력은 식 (3)과 같이 구한다.

$$W'_m = \frac{1}{2} L(x) i^2 = \frac{N^2 \mu_0 l d (1-x/d)}{4g} \quad (2)$$

여기서, W'_m : magnetic coenergy

$$F_{coil} = \frac{\partial W'_m}{\partial x} = - \frac{N^2 \mu_0 l}{4g} i^2 \quad (3)$$

여기서, F_{coil} : magnetic force by solenoid

Fig. 5는 영구자석을 이용한 자기 회로(magnetic circuit)의 모습을 보여준다. 자석이 Fig. 5의 그림에서 보는 것과 같은 방향으로 착자되었을 때 마그네틱 코어에 발생하는 코에너지는 식 (4)와 같이 구할 수 있고 그로부터 플런저에 작용하는 자기력은 식 (5)와 같이 구한다[4]. B_r 은 영구자석의 잔류 자속 밀도, l_m 은 영구자석의 길이, μ_r 은 상대투자율, x 는 플런저의 이동거리이다.

이 때, 플런저의 이동거리 x 는 요크의 폭(W_g)을 벗어나지 않는 범위 내로 제한하여야 한다. 이는 솔레노이드 액츄에이터에서도 동일하게 적용된다. 본 연구에서는 $W_g=20$ mm이고 플런저의 최대 이동거리 $x=19$ mm이다. Magnetic coenergy W'_m 은 다음식 (4)와 같이 표현되고 영구자석에 의해 발생하는 자기력 F_{pm} 은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$W'_m = \frac{W_m D (B_r l_m)^2}{2 \mu_r \left[l_m + \left(\frac{\mu_r}{\mu_0} \right) \left(\frac{2g W_m}{W_g - x} \right) \right]} \quad (4)$$

$$F_{pm} = - \frac{g W_m^2 D B_r^2}{\mu_0 (W_g - x)^2 \left[1 + \left(\frac{\mu_r}{\mu_0} \right) \left(\frac{W_g W_m}{W_g - x} \right) \right]^2} \quad (5)$$

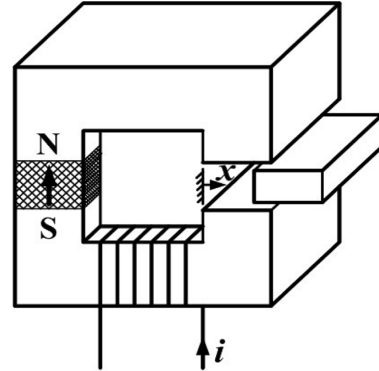


Fig. 6. Hybrid magnet linear actuator with moving plunger.

Fig. 6은 영구자석과 솔레노이드를 동시에 사용한 하이브리드 액츄에이터의 모습을 보여주고 있다.

2. 솔레노이드 액츄에이터와의 성능비교

솔레노이드 액츄에이터와의 성능을 비교하면 영구자석을 활용한 하이브리드 리니어 액츄에이터는 영구자석과 전자석을 동시에 사용하여 추력을 발생시키는 메커니즘으로 플런저의 왕복운동에 필요한 소요자속을 영구자석과 전자석이 동시에 부담하므로 무엇보다도 전력소모를 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 구조가 간단하여 소형화가 가능한 장점과 함께 솔레노이드 액츄에이터에 비해 단위 입력 당 추력이 큰 특징이 있다.

III. 동적유한요소해석을 이용한 시뮬레이션

하이브리드 리니어 액츄에이터의 성능을 시뮬레이션 하기 위하여 유한요소모델을 생성하고 상용 자기장 유한요소 해석 프로그램인 맥스웰(Maxwell)을 활용하여 동적 기계시스템, 전기시스템의 두 가지 서브시스템을 구성하였다. 시뮬레이션에

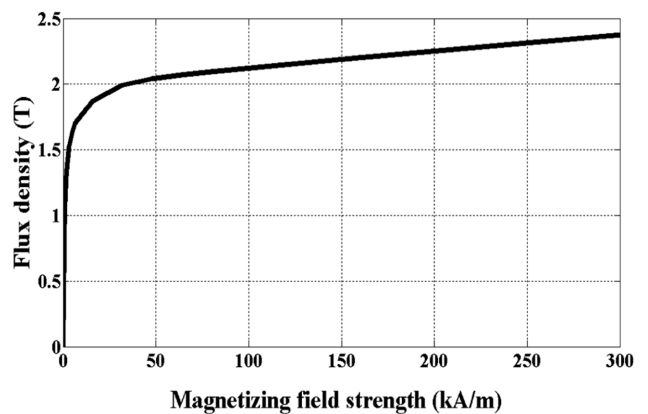


Fig. 7. Initial magnetization curves of 1010 steel.

Table I. Specification of NdFeB35 neodymium permanent magnet.

Residual induction	1.3 T
Coercivity	-890 kA/m
Relative permeability	1.1

Table II. Specification of mechanical subsystem.

Mass	0.1 kg
Spring stiffness	2.631 kN/m
Natural frequency	25.8 Hz

Table III. Specification of electric subsystem.

Input current (i_0) (solenoid actuator)	4 A
Input current (i_0) (hybrid magnet actuator)	2.5 A
Number of coil turns	1500 turns

사용된 요크 및 플런저에는 1010 탄소강의 비선형 B-H 특성이 주어졌다. 영구자석은 길이 12 mm의 네오디뮴(neodymium: NdFeB35) 자석으로 가격이 싸고 잔류자속 밀도와 보자력이 높은 특징을 가지고 있다. 영구자석을 제외한 모든 재료는 솔레노이드 액추에이터와 동일하다.

Fig. 7은 1010 탄소강의 B-H 곡선을 나타내고, Table I에는 네오디뮴 자석의 특성을 나타내고 있다.

기계시스템의 운동방정식은 식 (7)과 같다. m 은 플런저의 질량, k 는 스프링의 강성이다. 기계적인 마찰이 없는 상태에서 감쇠비 ξ 의 값은 0.001로 댐핑 계수 c 는 무시하였고 ($\xi = c/c_{cr}$, $c_{cr} = 2\sqrt{km}$: 임계감쇠계수), Table II는 기계시스템의 질량, 스프링 강성, 고유진동수 등이 나타나 있다.

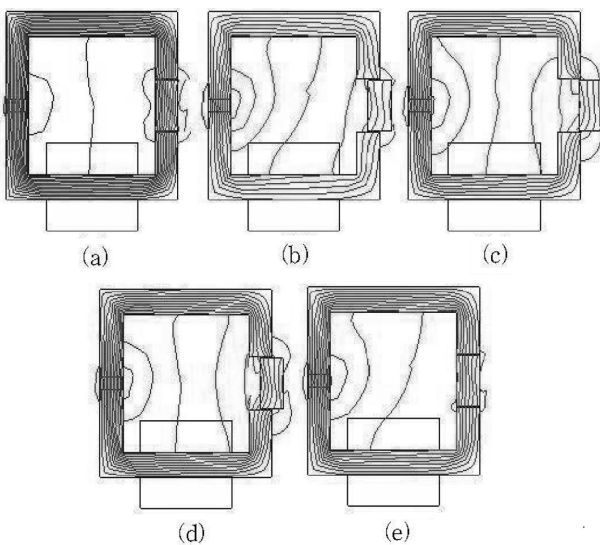


Fig. 8. Plot of flux distribution (a) at initial position (b) at exerting current (c) at neutral position (d) at switch off the current (e) at returning to initial position.

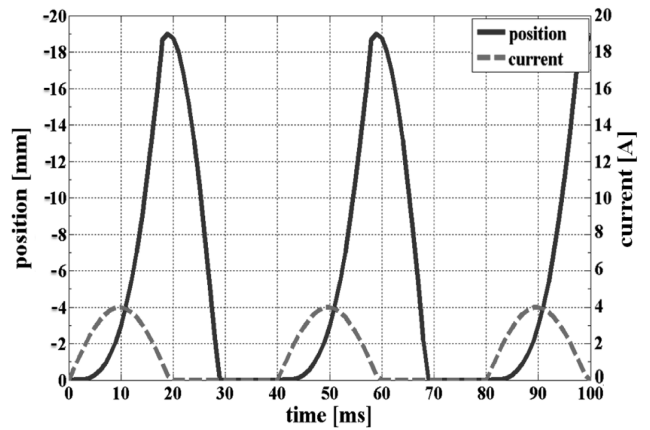


Fig. 9. Position profile of solenoid actuator at current 4 A.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_{magnetic}(i) \tag{7}$$

코일에 흐르는 전류는 식 (8)과 같이 주어졌다. Table III에 입력전류의 값과 코일턴수가 나타나 있다.

$$i = i_0 \sin \omega_n t \tag{8}$$

$$\text{여기서, } \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Fig. 8은 하이브리드 액추에이터 플런저의 과도운동 과정상의 각 위치에서의 자기력선(flux line)의 형태를 보여준다. 솔레노이드의 자기력이 작용하지 않는 초기위치에서, 자기력이 작용하여 영구자석의 자기력이 상쇄되는 중간 과정과, 자기력이 끊어져서 다시 초기위치로 되돌아가는 플런저의 한 주기 왕복 운동 동안의 모습을 나타내었다.

Fig. 9는 솔레노이드 액추에이터의 시간에 따른 입력 전류와 플런저의 이동거리를 나타내고 있다. Fig. 10은 하이브리드 액추에이터의 시간에 따른 입력 전류와 플런저의 이동거리를 나타내고 있다. 코일에 흐르는 첫 번째 반주기의 양의

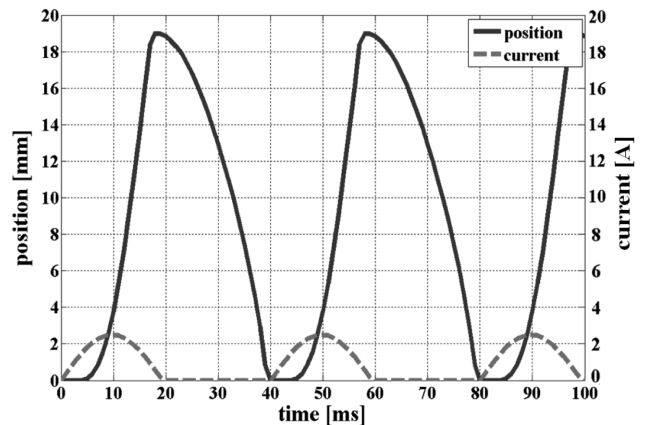


Fig. 10. Position profile of hybrid magnet actuator at current 2.5 A.

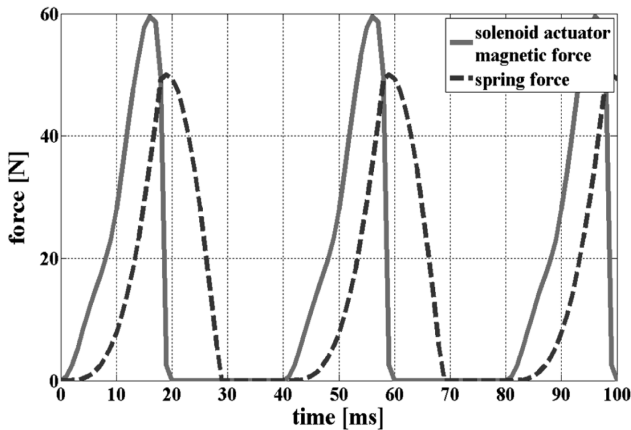


Fig. 11. Magnetic and spring force of solenoid actuator versus time at current 4 A.

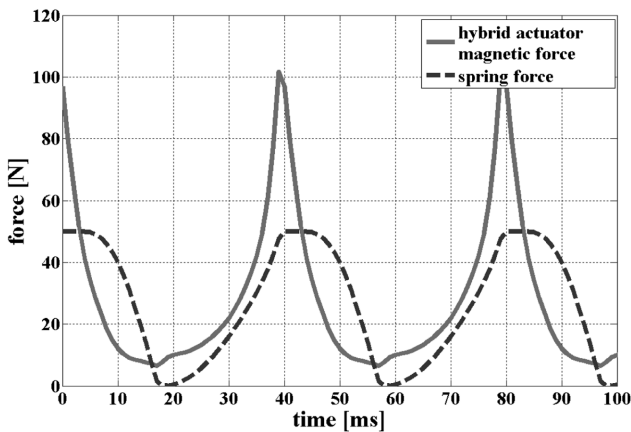


Fig. 12. Magnetic and spring force of hybrid magnet actuator versus time at current 2.5 A.

전류가 영구자석의 자기력과 반대 방향의 자기력을 생성한다. 플런저가 처음 움직이기 시작한 시간으로부터 다시 초기위치로 돌아오는 총 과도운동 시간은 솔레노이드 액츄에이터가 약 28 ms, 하이브리드 액츄에이터가 약 36 ms이다. 플런저의 총 이동거리는 ± 19 mm이다.

Fig. 11의 솔레노이드 액츄에이터의 자기력과 스프링력을 보여주고 있다. 솔레노이드가 전류인가에 의해 자화되면서 자기력이 발생하고, 플런저를 왼쪽으로 당기게 된다. 이 때 스프링이 압축되면서 스프링력이 커지게 된다. 스프링력은 플런저의 이동에 따라 그 크기가 결정된다. 솔레노이드 액츄에이터의 자기력은 약 60 N이고 스프링력은 약 50 N이다. Fig. 12는 하이브리드 액츄에이터의 자기력과 스프링력을 보여주

고 있다. 초기상태에서는 영구자석의 자기력만이 작용하다가 솔레노이드에 전류가 인가되면서 영구자석의 자기력과 반대 방향의 자기력을 만들게 되고, 하이브리드 액츄에이터의 자기력이 줄어들게 된다. 다이오드에 의해 전류가 차단되면 솔레노이드의 자기력이 줄어들게 되고 다시 영구자석의 자기력이 커지면서 플런저를 초기위치로 복귀시킨다. 이 과정에서 압축되어 있던 스프링은 플런저가 오른쪽으로 이동하면서 크기가 줄어들게 되고 다시 초기위치로 복귀하면서 그 크기가 커지게 된다.

IV. 결 론

솔레노이드 액츄에이터와 본 연구에서 제안하는 하이브리드 전자기 리니어 액츄에이터와의 성능 비교 시뮬레이션 결과 플런저의 이동거리와 추력에서 비슷한 성능을 내기 위해 필요한 전류에서 하이브리드 액츄에이터가 솔레노이드 액츄에이터에 비해 4 A에서 2.5 A로 37.5 % 가량의 절감 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 자기력 또한 60 N에서 100 N으로 커져 향상된 성능을 보인다. 하이브리드 액츄에이터의 자기력은 약 100 N이고 스프링력은 50 N이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래도시철도기술개발사업의 연구비 지원(09 미래도시철도 A-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. M. Jang, S. S. Jeong, H. C. Park, S. J. Moon, C. I. Park, and Y. Y. Chung, J. Kor. Institute of Electrical Engineers, **48B**(5), 241 (1999).
- [2] 김동수, 안영희, 이원희, 김광영, 한국정밀공학회지 2002 춘계 학술대회논문집, 680 (2002).
- [3] S. S. Park, J. H. Kim, Y. Choi, and J. H. Chang, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, **9**(3), 72 (2008).
- [4] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., and Stephen D. Umans, Electric Machinery, McGraw-Hill, New York (2003) pp. 119-150.
- [5] H.-D. Chai, Electromechanical Motion Device, Prentice Hall PTR, New Jersey (1998).

Analysis and Design of Hybrid Electromagnetic Linear Actuator for Linear Pump

Jung-Hun Lee, Jin-Ho Kim*, and Jae-Yong Lee

School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsangbukdo 712-479, Korea

Sang-Hyun Jeong and Bang-Woo Han

Korea Institute of Machinery & materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received 11 November 2009, Received in final form 8 January 2010, Accepted 13 January 2010)

The purpose of this paper is to analyze and design a new hybrid electromagnetic linear actuator for linear pumps. Solenoid linear actuator is widely used because it occupies small space due to no mechanical energy conversion system. In addition, the energy loss is very low and it has no noise. Conventional solenoid linear actuator, however, has the critical drawback of high power consumption. In this research, we present a new hybrid electromagnetic linear actuator using a permanent magnet in order to reduce power consumption. The enhanced performance of the hybrid linear actuator was verified by dynamic finite element analysis.

Keywords : electromagnetic linear actuator, solenoid, permanent magnet, linear pump