

밸브구동용 선형 포스모터 설계를 위한 해석 연구

A Study of Analyzing for Design of a Linear Force Motor for Hydraulic Valve

박창순 · 허준영

C. S. Park, J. Y. Huh

Key Words : Linear force motor, Linear Actuator(선형 액추에이터), Magnetic Force(전자력)

Abstract: To drive hydraulic valve is used Linear force motor, whose force and direction are controlled by electronic signals. Linear force motor has complicated figure and its force produced by changing of flux density which is produced by permanent magnet and electrical winding. Therefore it is needed an exact calculation of the flux density. In this paper a Linear force motor is designed and analysed by 3d program Flu calculating the flux density in air gap and in yoke, Force by different current. The analysed data will be tested by prototype Linear force motor. The data and analysing method can be used for designing Linear force motor.

기호 설명

A_p : 공극에서의 단면적, [m^2]
 B : 공극에서의 자속밀도, [T]
 C_m : 기자력 보정상수
 F : 흡인력, [N]
 F_{max} : 최대 흡인력, [N]
 F_{min} : 최소 흡인력, [N]
 K_f : 설계상수
 N : 코일권수
 S_f : 중립상태의 공극길이, [m]
 S_e : 플런저 행정길이, [m]
 U : 실제 기자력, [AT]
 θ_m : 이론 기자력[AT]
 μ_0 : 공기 중의 투자율

1. 서 론

선형 포스모터는 유공압에 사용되는 밸브를 구동

하는 목적으로 사용되고 있으며 전기신호로 힘의 크기와 방향을 제어하고 있다. 따라서 유량과 공기량의 입 출입을 제어하는 스펴부와 이것을 제어하기 위하여 힘을 가하는 구동시스템이 있다¹⁾.

밸브 구동용 개폐식 액추에이터는 입력으로서 주어진 전기신호를 코일을 통하여 1차적으로 전자기적 에너지로 변환한 다음, 최종적으로 밸브의 유로를 개폐할 수 있는 기계적 운동에너지를 플런저와 고정자가 형성하는 공극을 통하여 출력하는 에너지 변환장치이다²⁾.

그러나 일반적으로 유공압 밸브에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나 구동 시스템에 대한 연구는 아주 적은 편이다. 특히 선형 포스모터 방식에 대한 연구는 대단히 미미하며 설계에 필요한 데이터도 거의 없는 실정이다. 액추에이터의 설계를 위한 핵심기술에는 자속밀도 해석기술, 플런저 사이즈 및 형상 결정기술, 자성재료 해석 및 결정기술, 권선수 계산기술 등이 있다³⁾.

선형 포스모터 구동방식은 형상이 복잡하고 마그네트와 전자석의 자속 밀도의 변화에 의하여 왕복운동이 일어나므로 정확한 자속 밀도의 계산에 필요하다^{4~6)}.

본 연구에서는 밸브 구동용 선형 포스모터를 설계하고 해석을 통하여 공극과 요크의 자속 밀도, 전류에 따른 힘의 변화, 플런저와 요크의 재질에 따른 힘의 크기를 계산하고 실험을 통하여 해석의 정확

접수일 : 2010년 12월 22일

수정일(1차) : 2011년 1월 19일

게재확정일 : 2011년 1월 25일

박창순(책임저자) : 한국기술교육대학교 정보기술공학부

E-mail : cspark@kut.ac.kr, Tel : 041-560-1163

허준영 : 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(교신저자)

성을 파악하고 설계를 위한 기본 데이터를 마련하고자 한다.

2. 밸브구동용 선형 포스모터의 구동원리

코일에 전류가 흐르지 않을 때는 Fig. 1에서와 같이 스프링과 영구자석이 플런저를 평형상태로 유지하게 한다. 코일에 전류가 흐르면 Fig. 2와 같이 한쪽 공극과 한편의 영구자석 주위에 자속밀도가 증가하고 다른 영구자석 주위와 다른 편의 공극에 자속밀도가 감소하게 된다. 따라서 자속밀도의 불평형은 플런저가 자속밀도가 높은 쪽으로 움직이게 되고 전류를 반대로 흐르도록 전압을 인가하면 플런저의 운동방향은 반대가 된다.

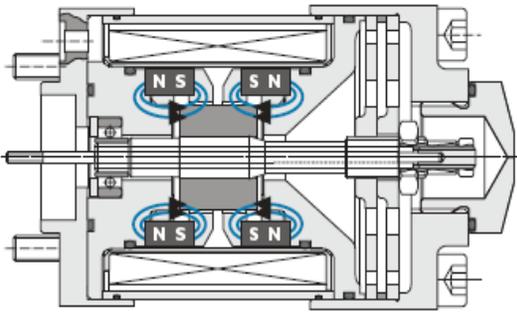


Fig. 1 Flux flow without current in the coil

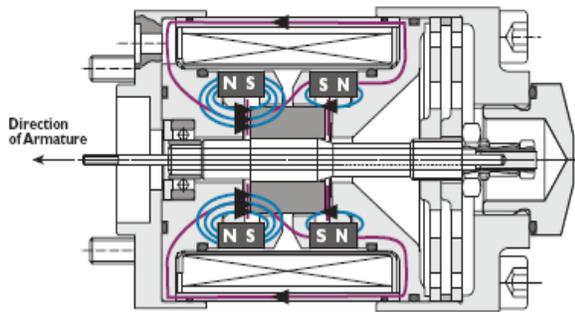


Fig. 2 Flux flow with current in the coil

Table 1 Desired valve specification

항 목	목표 성능값
정격전압	DC 24V
스트로크	±0.6mm
정격전류	2.2A
추력	8.0±5kgf
스프링력	8.5±5kgf

3. 선형 포스모터 설계

선형 포스모터는 전자장 형성을 위한 코일과 자력선의 통로인 요크(Yoke), 영구자석, 실질적인 스트로크를 형성하여 기계적 운동을 발생하는 아마추어 또는 플런저, 플런저를 복원시키는 스프링(Centering Spring) 등으로 구성된다. Fig. 3은 선형 포스모터 구조를 나타낸다.

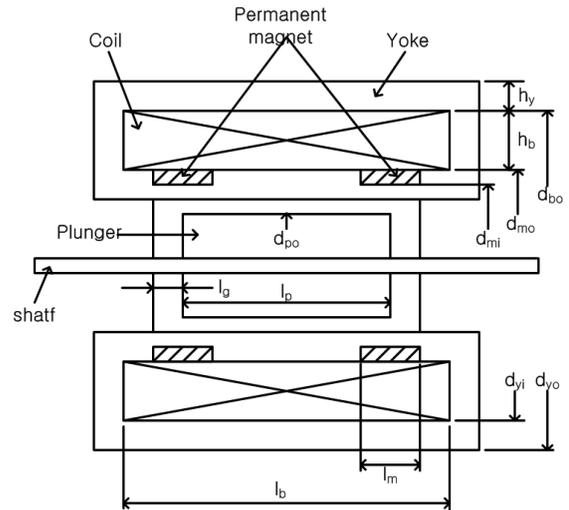


Fig. 3 Structure of linear force motor

Table 1에서의 추력은 밸브에 작용하는 유동력과 마찰력을 이기기 위한 힘이고, 스프링 상수는 사용된 복원 스프링 상수이다. Table 1에서와 같은 밸브의 사양에 따라 추력과 스트로크가 정해지면 추력을 발생하기 위한 공극에서 자속밀도를 계산한다. 공극의 자속밀도가 정해지면 요크의 두께를 산정할 수 있다.

선형 액추에이터의 형상과 각 부위의 두께가 정해지면 FEM(Finite Element Methode)을 이용하여 각 부위의 자속밀도를 계산하고 포화가 되는지를 검토한다.

공극자속밀도를 내기위한 기자력의 공식을 이용하여 구하고 기자력으로부터 점적물을 고려하여 권선의 단면적과 권선수를 계산하고 권선설계를 한다. FEM을 이용하여 세부설계를 검토하고 추력을 계산한다. 이 때 여러 가지 영구자석과 각 부위의 재질을 바꾸어 가며 특성을 추정한다.

3.1 공극의 자속밀도와 기자력

공극에서의 자속밀도 B 와 자극면의 단면적 A_p ,

공기중의 투자율 μ_0 , 자극면 사이의 거리 d 인 자기 회로에서, 작용하는 흡인력 F 은 식(1)로 주어진다⁷⁾.

$$F = \frac{B^2 \cdot A_P}{2\mu_0} \quad (1)$$

주어진 조건에서 필요한 흡인력(추력+스프링 인장력)을 165N이라고 할 때 공극에서 필요한 자속밀도 B 는 식(1)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$B = \sqrt{\frac{F \cdot 2\mu_0}{A_P}} = 1.211 T$$

여기서 플런저 단면적 A_P 는,

$$A_P = \pi \left(\frac{d_{po}}{2} - \frac{d_{pi}}{2} \right)^2 = 282.6 \text{ mm}^2$$

한편 자속밀도 B 과 이론적 기자력 θ_m 의 관계식은 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$B = \mu_0 \frac{\theta_m}{d} \quad (2)$$

식(1)와 식(2)에서 식(3)이 얻어진다. 여기서 도입된 설계상수 K_f 는 식(4)와 같다.

$$F = \frac{K_f}{d^2} \quad (3)$$

$$K_f = \frac{\mu_0 \cdot A_P \cdot \theta_m^2}{2} \quad (4)$$

밸브 중립위치에서 공극 길이가 S_f 일 때, 액추에이터의 최대 이격거리 d 는 중립위치 공극길이 S_f 와 플런저 스트로크 S_e 의 합인 식(5)가 되므로, 최대 흡인력 F_{\max} 와 최소 흡인력 F_{\min} 은 각각 식(6), (7)로 나타낼 수 있다.

$$d = S_f + S_e \quad (5)$$

$$F_{\max} = \frac{K_f}{S_f^2} \quad (6)$$

$$F_{\min} = \frac{K_f}{d^2} \quad (7)$$

따라서, 식(6)과 식(7)에서 최소흡인력과 최대흡인력의 관계는 식(8)로 된다.

$$F_{\max} = \left(\frac{d}{S_f} \right)^2 \cdot F_{\min} \quad (8)$$

플런저 단면적, A_P 와 플런저 접촉면 사이의 누설자속을 무시하면 플런저 자속밀도 B 는 식(2)와 같고, 식(1)과 식(7)을 식(8)에 대입하여 정리하면 $d = S_f$ 일 때 자속밀도 B 는 식(9)로 얻어진다.

$$B = 2 \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_0 \cdot F_{\min}}}{(d_{po} - d_{pi}) \cdot \sqrt{\pi}} = 1.211 T \quad (9)$$

그리고, 식(2)로부터 액추에이터가 필요로 하는 실제 기자력 U 의 관계식(10)을 얻을 수 있다.

$$U = \frac{C_m B d}{\mu_0} = \frac{1.1 \cdot 1.211 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{\mu_0} = 1060 AT \quad (10)$$

따라서 코일 턴수는 아래와 같이 계산된다.

$$N = \frac{U}{I} = \frac{1060}{2.2} = 481.8 \approx 482$$

여기서, C_m 은 기자력 보정상수로 자기회로에서 발생하는 자력이 손실분을 보상하는 경험적 상수이다.

3.2 요크 두께의 산정

필요한 흡인력을 만들기 위한 공극에서 자속 $\Phi = BA$ 이다. 이 자속이 요크를 통하여 흐르므로 요크가 포화되지 않는 범위에서 최대자속밀도를 정하면 요크의 두께를 정할 수 있다.

공극에서 최대 자속밀도는 전류 3.2A에서 발생한다고 가정하면 정격전류의 1.45배가 된다.

공극에서 자속

$$\begin{aligned} \Phi &= B_{gmax} A_P \\ &= 1.211 \cdot 1.45 \cdot 282.6 \cdot 10^{-6} = 496.2 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \end{aligned} \quad (11)$$

요크에서 최대 자속밀도 $B_{gmax} = 1.6 T$ 로 하면 요크의 단면적은

$$A_{yoke} = \frac{\Phi}{B_{gmax}} \quad (12)$$

$$A_{yoke} = \frac{\Phi}{B_{gmax}} = \frac{496.2 \cdot 10^{-6}}{1.6} = 310.14 \text{ mm}^2$$

코일 보빈의 외경 즉 요크의 내경(d_{yi})을 50mm로 하면 요크 외경(d_{yo})과 요크의 두께는 요크의 단면적으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_{yoke} = \pi \left(\frac{d_{yo}}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{d_{yi}}{2} \right)^2 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} d_{yo} &= \sqrt{\frac{A_{yoke}}{\pi} + \left(\frac{d_{yi}}{2} \right)^2} \times 2 \\ &= \sqrt{\frac{310.14}{\pi} + \left(\frac{50}{2} \right)^2} \times 2 = 53.8 \text{ mm} \end{aligned} \quad (14)$$

요크의 두께

$$h_y \geq (d_{yo} - d_{yi})/2 = (53.8 - 50)/2 = 1.9 \text{ mm} \quad (15)$$

따라서 요크의 두께를 2mm로 결정한다.
 다른 치수는 기존 제품을 모델로 하여 크기를 산정하였으며 Table 2에 주어졌다.

Table 2 Designed Linear force motor data sheet

항 목	값
입력 전압, V_{in}	24V
코일보빈 외경, d_{bo}	0.05m
코일보빈 높이, h_b	0.014m
코일보빈 길이, l_b	0.09m
자석 외경, d_{mi}	0.056m
자석 내경, d_{mo}	0.04m
자석 길이, l_m	0.01m
플런저 외경, d_{po}	0.042m
플런저 내경, d_{pi}	0.018m
플런저 길이, l_p	0.032m
요크 외경, d_{yo}	0.0538m
요크 내경, d_{yi}	0.05m
요크 높이, h_y	0.002m
공극 길이, l_g	0.0006m
최대공극의 길이, d	0.001m

4. 선형 포스모터 해석

선형 액추에이터는 구조가 복잡하여 단순한 계산으로 자속밀도 및 추력을 구하기가 어렵다. 따라서 3차원 유한요소 해석을 이용하여 각 부위의 자속밀도를 계산하고 추력을 계산한다. Fig 4는 3차원으로 해석을 하기 위하여 내부구조를 형상화한 그림이다.

전자장 해석은 프랑스 Cedrat사에서 개발한 Program Flux 3D Version 10.3을 사용하였다⁸⁾.

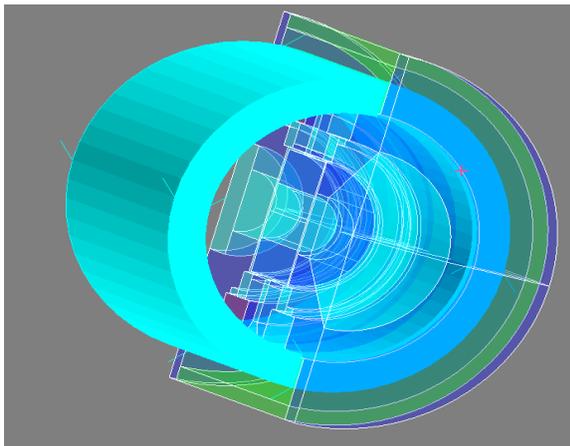


Fig. 4 Linear Force motor modelling

액추에이터는 형상이 원형이나 계산시간을 절약하기 위하여 1/2만 모델링 하여 계산한다.

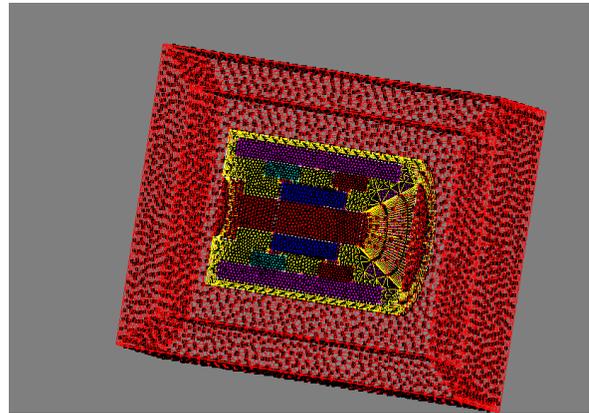


Fig. 5 Linear force motor mesh

Fig. 5는 해석을 하기 위하여 선형 포스모터를 눈 나눈 그림으로 결과적으로

Number of excellent quality elements: 44.4%,

Number of good quality elements: 39.08%,

Number of average quality elements: 13.45%,

Number of poor quality elements: 3.07%

으로 평균 품질 이상의 요소가 약 97%로 만족할만한 눈 나눈임을 알 수 있다.

5. 해석 결과

5.1 요크 재질에 따른 특성 변화

Fig. 6에서 보는 바와 같이 코일에 전류가 흐르면 코일에서 발생하는 자장과 영구자석에서 발생하는 자장이 합하여 왼편에서 증가하고 오른 편에서는 서로 충돌하여 약해지기 때문에 흡인력이 발생하여 플런저는 왼편으로 이동하게 된다.

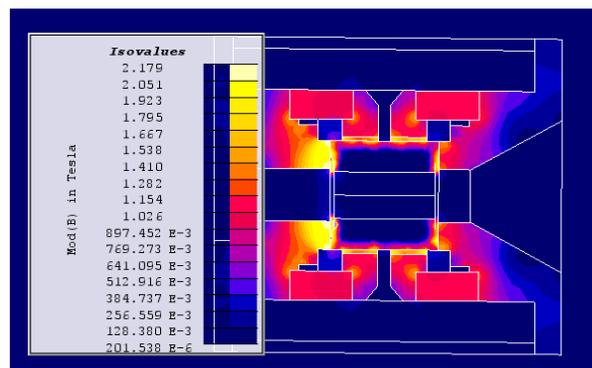


Fig. 6 Calculated flux density at current 3.2A

전류의 방향을 반대로 하면 자속밀도가 오른쪽이 증가하게 되고 흡인력도 오른쪽으로 발생하여 플런저가 오른 편으로 이동하게 된다.

Fig. 6은 최대전류 3.2A가 흐를 때의 자속밀도 분포이다. 그림에서 보듯이 왼쪽 공극 주위의 자속밀도가 증가하고 오른쪽 공극의 자속은 감소하는 것을 볼 수가 있다.

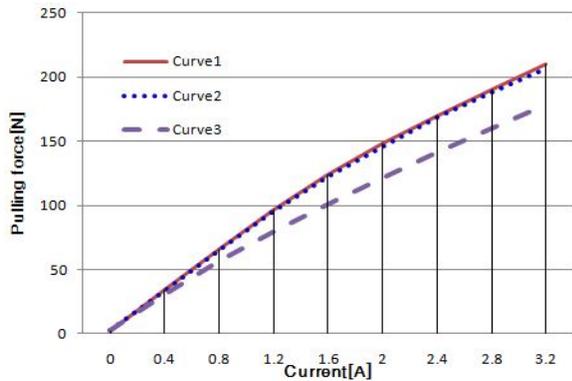


Fig. 7 Calculated force by different current and different relative permeability

재질과 전류에 따른 추력의 변화를 보기 위하여 Table 3에 나타난 바와 같이 3가지 경우에 대하여 플런저와 요크의 비투자율과 최대자속밀도를 적용하여 Flux를 이용하여 계산한 결과를 Fig. 7에 나타낸다. Table 3에서 요크재료와 곡선3 플런저 HC30, 곡선 1 플런저 VC11, 곡선 2 플런저 MC20의 비투자율과 최대자속밀도 값을 사용하였음.

Table 3 Relative Permeability and maximum Flux density of used Materials

곡선	항목		입력값
1	플런저	초기 비투자율 μ_r	60,000
		최대자속밀도	2.0T
	요크	초기 비투자율 μ_r	4,000
		최대자속밀도	1.8T
2	플런저	초기 비투자율 μ_r	6,000
		최대자속밀도	2.0T
	요크	초기 비투자율 μ_r	4,000
		최대자속밀도	1.8T
3	플런저	초기 비투자율 μ_r	4,000
		최대자속밀도	1.8T
	요크	초기 비투자율 μ_r	4,000
		최대자속밀도	1.8T

Fig. 7에서 곡선 1, 2는 차이가 없는데 이는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 플런저의 자속밀도가 높지 않아 최대 자속밀도에 의한 영향이 크지 않기 때문으로 생각된다. 곡선 3은 곡선 1, 2에 비하여 전류가 증가하는데 따른 추력이 약한데 이것은 플런저의 비투자율이 낮고 최대 자속밀도가 1.8T로 포화가 되는데 따른 추력의 감소로 보여진다. 따라서 재질을 선택하는데 참고가 될 것으로 본다.

5.2 영구자석 재질에 따른 특성 변화

Fig. 8에서는 영구자석을 희토류 네오뎀 계열 NdFeB($B_r=1.15$)와 사마륨 계열 S_mC_o ($B_r=0.85$)를 사용한 경우에 대하여 Flux를 사용하여 구한 추력을 비교한 그림이다. 이때의 플런저 초기 비투자율 $\mu_r=6,000$ 최대 자속밀도 2.0T, 요크 초기 비투자율 $\mu_r=4,000$ 최대 자속밀도 1.9T 이다.

정격전류 2.2A에서 추력을 비교하면 NdFeB를 사용한 경우가 S_mC_o 영구자석을 사용한 경우에 비하여 추력이 약 15%정도 크게 나타나고 있다. 그러나 NdFeB 마그네트의 경우 전류가 1.4A이상일 때에는 철심의 포화로 인하여 추력곡선의 증가가 둔해지는 것을 알 수가 있고 그에 비하여 S_mC_o 마그네트의 경우에는 추력이 전류의 증가에 따라 직선으로 증가하는 것을 알 수가 있다. 따라서 액추에이터의 선형성을 중요시 할 때는 포화자속밀도가 큰 철심을 사용하거나 잔류자속밀도가 낮은 영구자석을 사용하는 것이 유리하다.

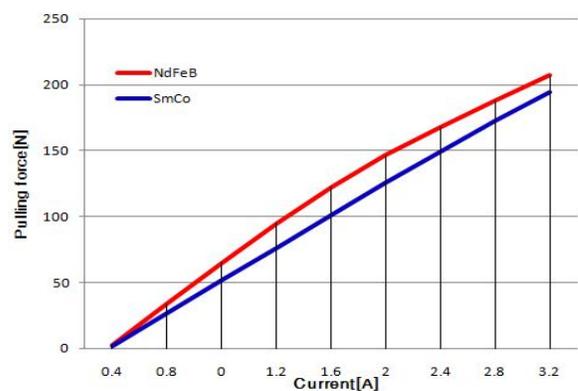


Fig. 8 Calculated force curve by different permanent magnet materials

5.3 시제품 선형 포스모터 흡인력 실험

Fig. 9는 시제품 선형 포스모터의 흡인력 실험결과로 NdFeB 계열 영구자석을 사용하고 요크로 S45

를 사용하였다. 여기서는 복원스프링을 장착한 상태에서 추가로 흡인할 수 있는 힘을 측정하였다. Fig. 8의 Flux를 사용한 시뮬레이션 해석결과에서 전류 2.2A에서 흡인력은 160N(16.3kgf)로 산출되었다. 여기에서 스프링력 8.5kgf를 빼면 7.8kgf가 산출되는데, 이는 Fig. 9의 흡인력 실험결과에서 전류 2.2A에서 흡인력 8kgf와 비교해 볼 때 2.5%의 근소한 오차이므로 포스모터의 설계가 만족할 만 결과를 가져왔다고 할 수 있다.

Fig. 9에서 NdFeB를 사용하고 Fig.8에 비하여 선형성이 좋은 이유는 실측에 선형 변위차동트랜스(LVDT)를 사용하였기 때문이다.

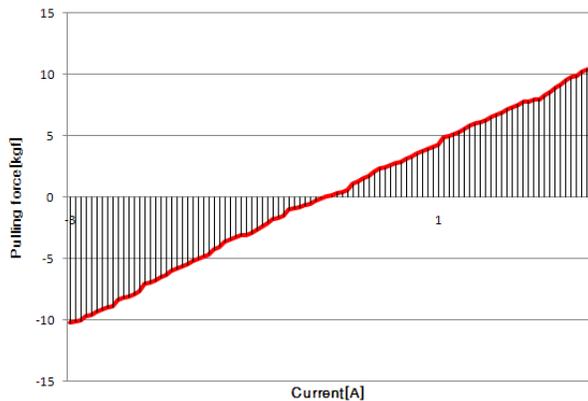


Fig. 9 Test result of a prototype linear force motor

6. 결론

본 연구에서는 고효율 선형 액추에이터를 설계하기 위하여 추력에 필요한 자속밀도를 계산하고 자속밀도를 만들기 위한 기자력과 코일턴수를 계산하였으며 요크의 두께를 계산하고 설계된 선형 액추에이터를 3차원 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 해석하였다.

영구자석의 종류에 따른 추력과 요크의 종류에 따른 추력을 해석하고 비교한 결과 추력의 증대를 위해서는 잔류자속밀도가 큰 영구자석을 사용하는 것이 좋으나 사용하는 철심의 종류에 따라 자속밀도의 포화가 일어나 추력이 전류에 따라 직선적으

로 증가하지 않는다. 따라서 선형 포스모터의 선형성을 중요시 할 때는 포화자속밀도가 큰 철심을 사용하거나 잔류자속밀도가 낮은 영구자석을 사용하는 것이 유리하다. 또한 요크의 재질은 비투자율이 높은 재질보다 최대 자속밀도가 높은 것이 좋다. 해석결과와 시제품의 실험결과를 비교할 때 오차가 작아 앞으로 선형 포스모터를 설계할 때 해석기술을 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) "Simulationgestuetzter Entwurf elektro-magnetischer Linearaktoren fuer fluidtechnische Ventile." Thesis of RWTH Aachen University 2006.
- 2) "Increasing the Dynamic Load Stiffness of Electrohydraulic Linear Drives" M. Reichelt, H. Murrenhoff. Internal report of Institute for Fluid Power drives and controls RWTH Aachen University.
- 3) "밸브 구동용 개폐식 솔레노이드 액추에이터 설계" 성백주, 한국유공압학회 2010.
- 4) "자왜재료를 이용한 선형 작동기의 유한요소 해석" 김윤창, 김재환, 한국 소음 진동 학회 논문집 제 17권 제4호 pp356-362, 2007.
- 5) "다단-포머를 이용한 오토트랜스 미션용 솔레노이드 밸브 공정설계 및 유한요소 해석" 박철우, 한국마린엔지니어링 학회지 제 33권 제1호 pp97-103, 2009.
- 6) "영구자석 다극배치에 의한 가동코일형 리니어 진동 액추에이터의 특성" 김덕현, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 전기학회 논문지 50B권 6호 pp.273-280, 2001.
- 7) "Elektromechanik" Juergen Meins, B. G, Teubner Stuttgart 1997.
- 8) "Flux 3D Version 10.3 Technical paper for Application Permanent magnet machine". by Cedrat.