

의료용 펌프의 리니어 모터 설계 및 해석

*김동수, *이원희, **박재범
 (*한국기계연구원, **부산인력개발원)

Design and Analysis of Linear Motor for Medical Appliance Pump

*Dong-Soo Kim, *Won-Hee Lee, **Jae-Bum Park
 (*KIMM, **BHRDI)

Abstract - In this paper, it has been investigated that the design and simulation of linear motor for medical appliances. Vacuum pump consists of unified plunger and piston part, coils, inlet valve and outlet valve. Operating principal of vacuum pump show that air is to flow to go inside through the inlet valve, when the magnetic force (16N) is exerted, whereas, air is to flow to go outside through outlet valve, when spring force (14.8N) is exerted. The results of simulation, it was turned out that magnetic force was loaded with 16 Newton, displacement of actuator was about 8mm.

1. 서 론

LM(Linear Motor) 구동 진공펌프는 별도의 기계적인 변환장치 없이 직선 추력을 발생하는 장치이다. 이는 정현파 또는 구형파의 교번전압을 인가하여 가동자 자체가 직접 직선 스트로크를 왕복운동하는 특징을 가지므로 진공펌프의 직선운동시스템의 직접구동에 적합하고 특히, 간이성, 가격 등의 면에서 소변위 왕복운동에 적합하다. 이러한 액츄에이터는 가동자의 종류에 따라 가동철심형, 가동영구자석형, 가동코일형, 하이브리형으로 분류할 수 있다. 특히, 진공펌프에서 가동영구자석형의 사용은 잔류자속밀도가 높은 영구자석을 사용함으로써 고에너지밀도의 자기회로 구성으로 제어응답성이 우수한 장점을 가지고 있다. LM구동 진공 펌프의 응용분야로는 건강, 의료기기, OA기기, 경밀측정기기, 인쇄장치, 전자제품 이송장치 등의 산업 전분야에서 광범위하게 사용되며, 특히 고 신뢰성과 저소음으로 의료기기 분야에서 각광받고 있다.

LM 구동 진공 펌프의 국내의 기술 동향을 살펴보면 다음과 같다. 국내의 경우 LM 구동 진공 펌프기술수준은 선진국에 비해 25%정도에 못 미칠 정도로 미흡하나 Linear Force Motor기술, 피스톤기술, 스프링기술, 컨트롤 밸브기술은 어느 정도 보유하고 있는 실정이며, 진공펌프 기술개발은 미비하며 전량 수입에 의존하여 사용하고 있다. 국외의 경우는 무 급유(Oiless)피스톤과, 다이어프램(Diaphragm) 등이 주류를 이루고 있으며, 이중 Oiless 피스톤형이 전세계시장의 80%이상을 점유하고 있는 실정이며, 최근의 진공펌프 개발추세는 콤팩트(Compact)화, 소형경량화, 저 소비전력화, 초 저소음화, 고성능-고 신뢰성화, 저 가격화로 가는 추세에 있다. 따라서, 본 연구에서는 우수한 성능을 가진 가동자 일체형 리니어 모터의 피스톤 설계기술을 확보하고, 상용 해석 툴(Tool)을 이용하여 진공펌프용 LM의 해석결과를 검증하고자 한다.

2. LM 구동 진공펌프의 설계

2.1 진공펌프의 구성 및 작동원리

LM구동 진공 펌프(Vacuum Pump)구성원리를 살펴보면 다음과 같다[그림1]. 모터와 압축부가 일체구조가 된 실린더 내를 피스톤만이 전자석의 흡인력과 스프링의 복원력에 의해 입력으로 가해지는 전원주파수(60Hz)와 동일한 주기로 왕복 운동한다. 솔레노이드에 전류가 인가되면 흡인력에 의해서 피스톤이 스프링을 압축시키면서 흡입(Inlet)밸브를 통해 공기를 흡입하고, 전류가 차단되면 압축되어 있던 스프링의 복원력에 의해서 피스톤을 되밀고 배출(Outlet)밸브를 통해 실린더 바깥으로 압축공기를 토출하는 메커니즘으로 되어있다. 그리고 모터와 압축부의 일체구조로 되어 있어서 다른 구조에 비해 소형, 경량화를 실현 할 수 있으며 흡입된 공기를 노즐에서 코일로 불어넣는 방식을 이용함으로써 자기냉각(Self Cooling)을 이룰 수 있다. LM구동 진공펌프의 설계도 및 제작부품은 그림 2, 3에 차례로 나타내었으며, 주요 구성은 왕복운동 수행하는 플런저(Plunger)일체형 피스톤부, 코일부, 흡입밸브, 그리고 배출밸브 등으로 구성되어있다. 주요규격을 보면 구동부에 사용된 스프링의 재질은 SUS이며, 탄성계수 $G = 7 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$, 자유장은 28.5 mm이다. 또한 플런저의 재질로는 순철, 피스톤은 AL6063, 그리고 밸브는 NBR +Steel 등의 재질이 사용되었다.

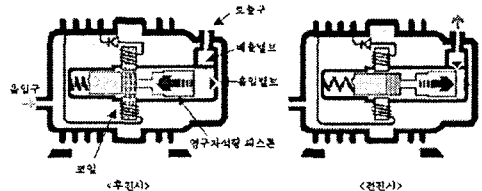


그림 1 진공펌프 작동원리도

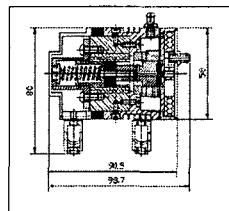


그림 2 진공펌프 설계도



그림 3 진공펌프 제작품

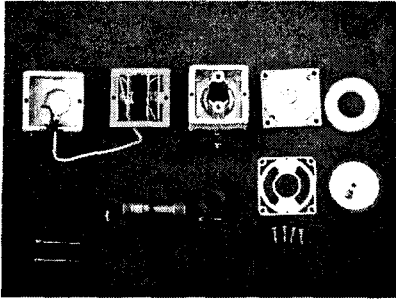


그림 4 진공펌프의 구성 부품

LM구동 진공펌프의 설계사양은 아래의 표1 과 같다.

표 1 진공펌프의 설계사양

항 목	사 양
도달진공도 [bar]	0.55 [bar]
토출공기량	3 [ℓ/min]
정격전압	AC110 [V]
정격전류	2 [A]
소음	40 dB
흡입구경	∅6 mm
토출구경	∅6 mm
내구성	3000 [Hour]
부하질량(가동자포함)	20 [g]
코일당 턴수	1380 [N]
코일저항	48 [Ω]
코일선경	0.25 [mm]
공극	0.2 [mm]
스트로크	8 [mm]

3. 리니어 모터 해석 및 결과

3.1 리니어 모터의 구성 및 설계

리니어 모터의 구성은 그림 5에 나타내었다. 플라스틱 보빈에 코일을 감은 솔레노이드부분과, 코어, 가동자(Plunger)로 구성되어 있고 코일에 정현파나 구형파를 인가하게 되면 가동자는 일정 스트로크(Stroke)로 고속 왕복운동을 하게 된다[1,2]. 입력전압이 Positive일때 철심이 자화되어 전자력에 의해서 가동자가 전진하게 되고, 반대로 입력전압이 Negative일 때는 반파 정류 다이오드에 의해서 전류가 차단되면서 전진해 있던 플런저는 스프링의 복원력에 의해서 후진하게 된다.

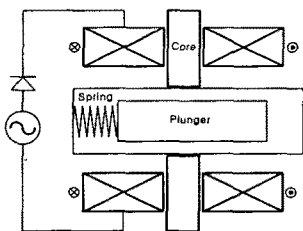


그림 5 리니어 모터의 구성도

가동자는 x 방향으로만 운동하므로 발생추력은 식(1)과 같다.

$$\vec{F}_x = lNB_g i = K_b i \quad (1)$$

여기서,

- l : 유효길이
- N : 권선수
- B_g : 자속밀도
- i : 코일에 흐르는 전류
- K_b : 유기전압상수(lNB_g)

그리고 흡인력에 대한 기본식은 식(2)와 같다.

$$F = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} B_g^2 S \quad [N] \quad (2)$$

여기서,

- B_g : 공극의 자속밀도[T]
- S : 공극의 단면적[m²]

면적 S 가 되는 자극면이 평행으로 서로 마주보고 있는 중량 m 의 부하를 스트로크 X_m 과 각 주파수 ω 로 구동하기 위하여 전자석을 교류로 여자한 경우의 흡인력의 순시치는 식(2)에 $B_g = B_m \sin \omega t$ 를 대입하여 구하면 식(3)과 같다.

$$F = \frac{(B_m \sin \omega t)^2}{2\mu_0} = \frac{10^7}{8\pi} (B_m \sin \omega t)^2 S \quad [N] \quad (3)$$

여기서, $\sin^2 \omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$ 을 이용하면 식(3)에서 평균흡인력 F_0 을 구하면 식(4)와 같다.

$$F_0 = \frac{SB_m^2}{4\mu_0} = \frac{10^7}{16\pi} SB_m^2 = \frac{10^7 \Phi_m^2}{16\pi S} \quad [N] \quad (4)$$

3.2 리니어 모터 모델링 및 해석결과

Linear Motor의 시스템 모델링은 그림 6과 같다.

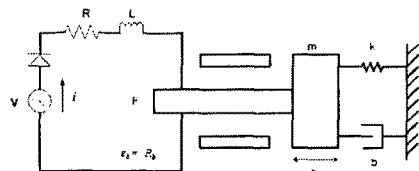


그림 6 리니어 모터의 모델링

코일에 흐르는 전압방정식은 식(5)와 같다.

$$V = R_i + L \frac{di}{dt} + K_b \cdot \omega \quad (5)$$

여기서,

R : 코일저항

L : 인덕턴스

$K_b \cdot \omega$: 코일의 운동에 의한 유기 기전력

기계적인 운동방정식은 식(6)과 같이 나타낸다.

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (6)$$

여기서, m은 가동부 질량이며, b는 마찰계수이다. 식(6)을 식(5)로 대입하고 라플라스 변환하여 인가전압 V와 속도 v 사이의 전달함수 G(s)를 구하면 식(7)과 같이 나타내어진다.

$$G(s) = \frac{1/K_b}{(1 + \frac{SR_c m}{K_b^2})(1 + \frac{SL}{R})} \quad (7)$$

여기서, $R_c m / K_b^2$, L/R 은 각각 기계적, 전기적 시정수를 나타낸다. 따라서 L, R, m, K_b 의정수가 모터의 응답성을 결정하게 된다.

리니어 모터를 상용소프트웨어인 EM Pulse를 이용하여 해석한 결과를 그림 7~그림 15에 나타내었다.

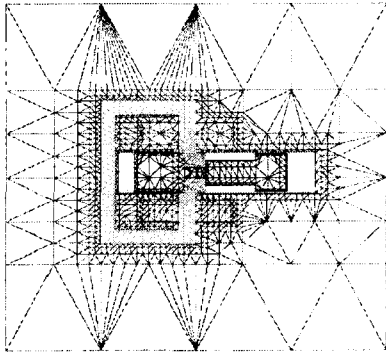


그림 7 리니어 모터 모델링 및 메쉬생성

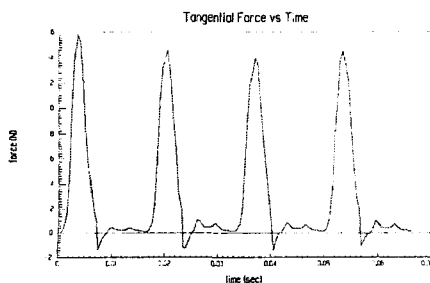


그림 8 Tangential force

그림에서 알 수 있듯이 전자력이 최대 16N 작용하며, 한 주기전의 전자력의 감쇄는 스프링 힘(14.8N)에 의한 것으로 판단되며, 설계 성능에 도달하도록 충분한 변위(8mm)가 일어나는 것을 알 수 있다.

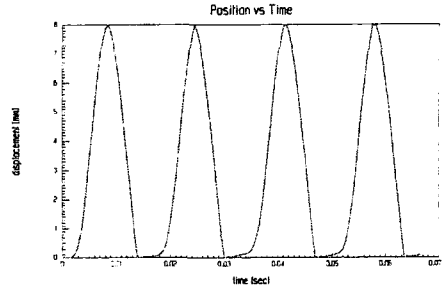


그림 9 플러저의 변위

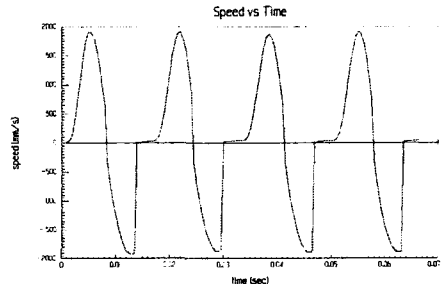


그림 10 플러저의 속도

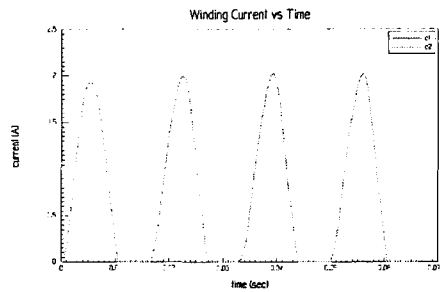


그림 11 Winding current

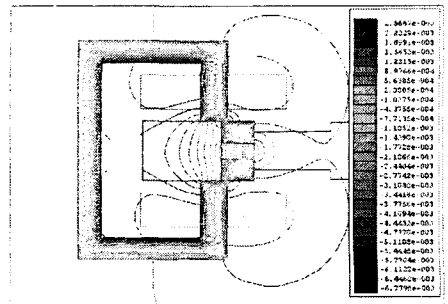


그림 12 Tangential force가 최대일때의 자기력선도

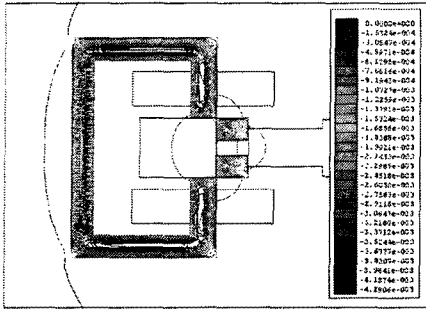


그림 13 Tangential force가 최하일때의 자기력선도

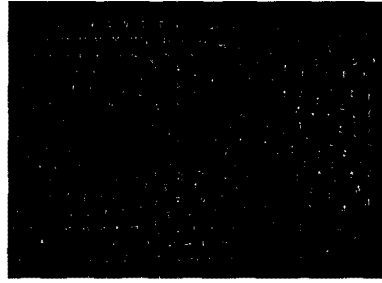


그림 17 B Vector

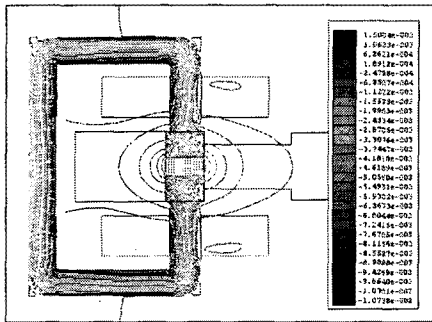


그림 14 플러저가 최대로 전진했을때의 자기력선도

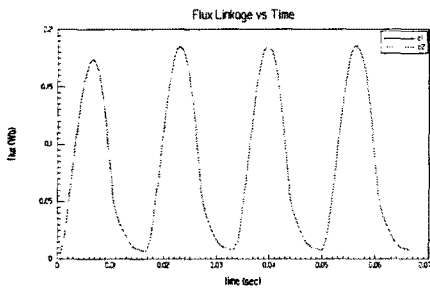


그림 15 Flux linkage 특성

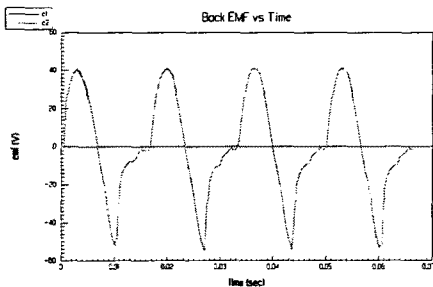


그림 16 Back EMF

시뮬레이션 결과 플러저의 최대속도는 2[m/s]이며, 코일에 걸리는 전류는 약 1.9[A]이다. 또한 코일의 자화시 최대 역기전력은 40[V]이며, 최대 누설자속은 0.18[Wb]임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고 응답성을 가지는 리니어 모터로 구동되는 진공펌프를 설계 제작 하고 해석결과를 제시하였다. 구동부에 전달되는 힘과 스트로크의 응답성을 알아 보기 위하여 EM Pulse로 시뮬레이션을 수행 한 결과 정현파의 입력에 대해 8mm 스트로크가 일어나도록 충분한 전자력(16N)이 작용하고 있는 것을 확인하였으며, 빠른 주파수 응답성과 위치 응답성을 나타내었다.

향후 리니어 모터로 구동 되는 진공펌프에서 구동부의 힘, 스트로크, 목표 도달진공압등의 성능을 확인할 수 있는 시험기를 구성하여 성능 시험을 수행하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.A.Nasar, I.boldea, "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prentice-Hall, Inc. , 1987
- [2] S.A. Nasar, I.boldea, L.E. Unnewehr, "Permanent magnet, reluctance, and self-synchronous motors", CRC press, 1993
- [3] S.M. Jang, S.S Jeong, C. Kweon, H.C. Park, S.J. Moon,, C.I. Park, T.Y. Chung,"가동코일형 리니어 왕복 액츄에이터의 동특성", KIEE, Vol. 49, pp.180 - 187,2000
- [4] S.M. Jang, S.S Jeong, C. Kweon, H.C. Park, S.J. Moon, C.I. Park, T.Y.chung," 리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어액츄에이터의 설계제작 및 제어정수도출",대한전기학회, 48B권5호, pp.241-248,1999
- [5] K.C. Kim, I.S. Jung S.B. Yoon, D.S. Hyun,"압력을 고려한 압축기형 선형 액츄에이터의 동특성 유한 요소해석에 관한 연구", " 대한전기학회 하계학술대회문집,pp.168-170,1997
- [6] 김광선, "진공기술 실무," 성원에드워드(주), 진공 기술연구소,1999