

공작기계용 철심형 리니어모터 기술개발

정재한, 박재완(삼익LMS 기술연구소)

Development of Iron Core type Linear Motor for Machine Tool

J. H. Joung and J. W. Park(Samick LMS Technical Center)

ABSTRACT

The merits of linear motor are high speed, high acceleration and good positioning accuracy. In addition, Linear motor for high quality machine tool call for high thrust, high stiffness. In using linear motor we also consider thrust ripple, detent force and thermal behavior. In this research, Iron core type single sided linear DC motor(LDM) is designed which thrust is 6,000 N. To accomplish this design, Various research is fulfilled like the relation of thrust and permanent magnet position angle, the variation of detent force and thrust ripple, dynamic characteristics, and so on.

Key Words : Linear DC Motor(리니어 직류 모터, LDM), Machine Tool(공작기계), Thrust(추력), Thrust Ripple(추력 리플), Iron Core(철심), Permanent Magnet(영구자석), Detent Force(디텐트력)

1. 서론

고속·정밀 가공에 대한 관심이 높아지면서 기존의 회전형 서보모터와 볼나사를 이용한 회전운동을 직선운동으로 변환하여 사용하던 것을 변환장치 없이 직접적인 직선구동이 가능한 리니어모터로 대체하여 고속·고정도를 얻기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. 리니어모터의 장점으로는 백래쉬가 없고, 마찰이 적으며, 속도 및 가속도에 기계적 제한이 없으며, 스트로트의 구애를 받지 않고, 한 축에 다양한 구동이 가능한 다양한 유니트 구성 등이 가능하다. 국내에서는 반도체 장비 등 일부에서 소형 리니어모터의 적용이 도입되고 있는 단계이나, 공작기계에 적용하여 실용화한 사례는 찾아볼 수가 없다. 특히, 공작기계에 적용하기 위해서는 고추력 및 고강성이 요구되며, 아울러 방열대책, 칩처리, 낙하 방지 대책 등이 필요하다. 이에 공작기계에 적용하기 위한 리니어모터의 최적사양을 얻기 위해 다양한 전자기적/기구적 특성해석을 통해 리니어모터를 설계하였다.

2. 공작기계용 리니어모터 특성해석

2.1 설계사양

큰 부하를 가진 공작기계에 리니어모터를 적용하여 고속, 고가속 운동 및 고위치정도를 얻기 위해서는 운동방향으로의 힘인 추력이 가감속시 부하의 관성을 이겨낼 수 있도록 충분히 커야 하며, 일정한 추력 유지 및 주변 부품의 변형을 방지하기 위해 최소한의 온도구배를 유지하기 위한 열해석도 필요하다. 아울러, 안정된 운전 및 위치결정정도 향상 및 정지 위치에서의 고강성을 위해 추력리플 및 디텐트력의 분포특성 등을 FEM 해석을 통해서 설계에 반영하였다.

제작하고자 하는 리니어모터의 종류는 철심형 리니어직류모터(Iron Core type Linear DC Motor)로써, 정격추력 목표사양은 6,000 N으로, 설계 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 설계 사양

구분		값	단위
이동자	슬롯수	74	
	극수	24	
	재질	S18	
	슬롯당 도체수	149	
	요크 두께	10.0	[mm]
	상수	3	
	축방향길이	220.0	[mm]
고정자	영구자석	종류	Nd-Fe-B
		잔류자속밀도	1.33 [T]
		폭	24.0 [mm]
		두께	5.0 [mm]
		길이	50.0 [mm]
	재질	S45C	
	축방향길이	220.0 [mm]	
공극의 길이	0.5 [mm]		

2.2 추력 사양

먼저, 목표 추력인 6,000 N을 얻기 위한 입력전류량을 결정하기 위한 FEM 해석 모델은 Fig. 1과 같다. 해석시 단부효과 및 영구자석 Skew는 무시하였다.

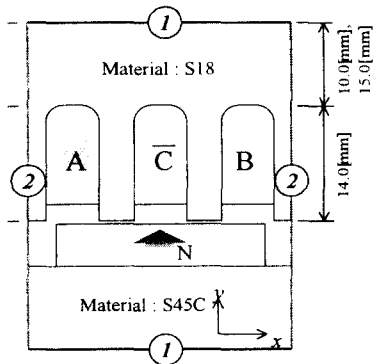


Fig. 1 해석모델

해석조건은 코일 상부 철심 두께가 10, 15 mm이고, 코일 1개에 걸리는 입력전류가 4, 6, 8 A인 경우를 각각 해석하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 철심 두께가 10, 15 mm인 경우의 전류에 따른 평균추력 특성은 거의 같게 나타나며, 6,000 N의 추력을 확보하기 위해서는 코일당 입력전류가 6 A 정도가 되어야 함을 알 수 있다.

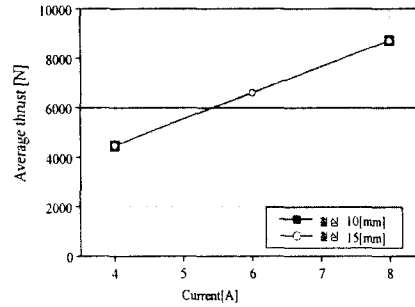


Fig. 2 평균추력 특성비교

2.3 추력 리플의 최소화

추력리플을 저감시키는 방법으로 주로 철심 치형의 슬롯개구폭 조정, 영구자석에 Skew 부여, 자석형상 변형 등이 주로 사용되어진다. 본 해석에서는 영구자석에 Skew를 주고 배치하는 방법을 사용하여 추력리플을 없애는 방법을 연구하여 Fig. 3과 같은 영구자석 배치 형상을 최적값으로 선택하게 되었다.

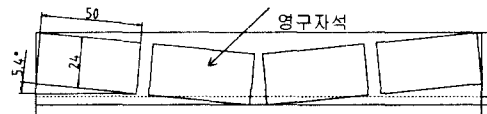


Fig. 3 영구자석 배치 형상

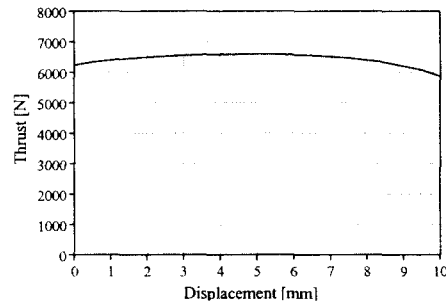


Fig. 4 변위에 따른 추력의 변화(5.4° Skew)

Fig. 4는 영구자석을 5.4° Skew시켰을 때의 추력 변화값을 나타낸 것으로 추력리플이 5 %이내이다. 전류를 인가하지 않을 경우 이동자와 고정자 사이에 발생하는 디텐트력과 수직력은 Table 2와 같이 나타나며, 해석에 사용된 1/24모델의 자속밀도분포는 Fig. 5와 같이 나타나며, 공극에서 1.2 T의 값을 나타낸다.

Table 2 디텐트력과 수직력의 변화

	디텐트력[N]	수직력[N]
Non-skew	2191.44	48984.00
5.4° skew	52.59	48268.32

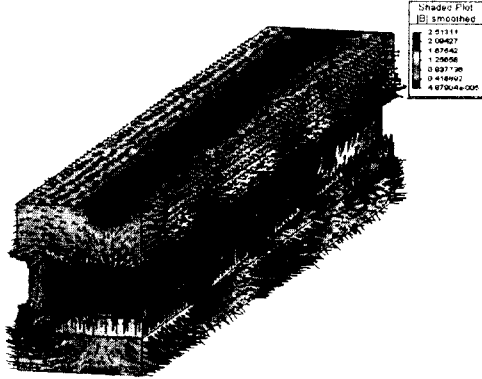


Fig. 5 자속밀도분포(1/24모델)

3. 동특성 해석

3.1 모델링

과도상태의 거동을 해석하기 위해서는 인덕턴스에 의한 역기전력을 고려한 전압방정식과 기계적 운동방정식의 모델링으로부터의 해석이 필요하다. 전압방정식은 (1)식으로, 기계적 운동방정식은 (2)식으로 나타낼 수 있다.

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + k_e v(t) \quad (1)$$

$$F = K_f i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + Dv(t) + F_f \quad (2)$$

here,

K_e : 역기전력상수, K_f : 추력상수

$v(t)$: 속도, $\frac{dv}{dt}$: 가속도

M : 이송부하, D : 마찰계수, F_f : 부하

(1)식과 (2)식에서 시간에 대한 전류방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$I = \frac{M}{K_f} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{k_f} v(t) + \frac{F_f}{k_f} \quad (3)$$

(3)식으로부터 전류를 구할 수 있고, 전류변화량으로부터 (1)식을 사용하여 시간에 대한 속도방정식을 구하면 (4)식과 같이 나타낸다.

$$v(t) = \frac{D}{(D-1)} A e^{m_1 t} + \frac{1}{(1-D)} A e^{m_2 t} - A \quad (4)$$

here,

$$A = \frac{k_f R - k_e V}{DR + k_e k_f}, B = \frac{DR}{LM} + \frac{k_e k_f}{LM}, C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}$$

$$D = \frac{m_2}{m_1}, m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4B}}{2}, m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4B}}{2}$$

3.2 동특성 해석 결과

3.1절의 특성식들을 사용하여 설계목표를 얻기 위해 산정한 파라메타값은 Table 3과 같다.

Table 3 동특성 해석 파라메타

항목	값	항목	값
정격속도(v)	2 m/s	가속도	2 G
이송부하(M)	150 Kg	마찰계수	0.1
부하(F _f)	0	병렬회로수	1
역기전력상수 (k _e , 1상)	361.01 V/m/s	추력상수 (k _f , 3상)	1083.12 N/A
코일당 저항	4.572 Ω	코일당 인덕턴스	13.95 mH

이동자 내부의 코일 배선(병렬회로수)을 다양하게 변경해 가면서 시간에 대한 동특성 해석을 실시한 결과, 목표 속도와 가속도를 얻기 위한 전압과 전류의 전기적 사양은 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

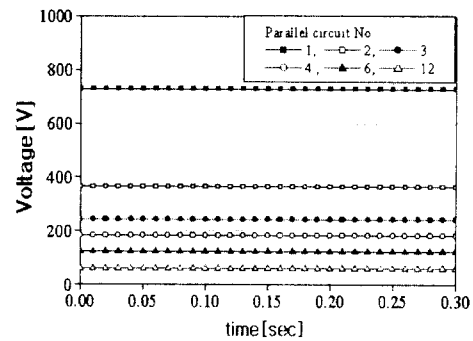


Fig. 6 시간에 따른 전압 특성

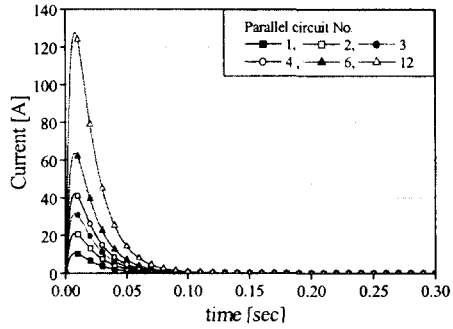


Fig. 7 시간에 따른 전류 특성

위 결과에서 병렬회로수 4개일 경우 최대 상전류가 42.3 A, 상전압이 182 V로 실제 적용가능한 드라이브의 사양을 고려할 때 제작에 반영할 수 있는 최적의 값으로 선정할 수 있다. 시간에 따른 속도 및 추력특성은 Fig. 8, Fig. 9와 같이 얻을 수 있었다.

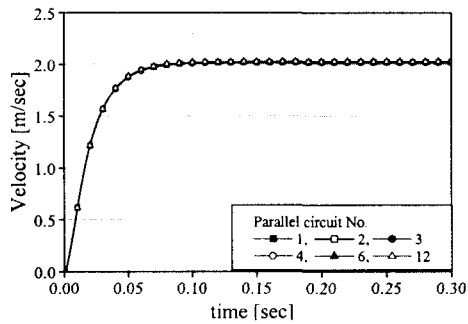


Fig. 8 시간에 따른 속도 특성

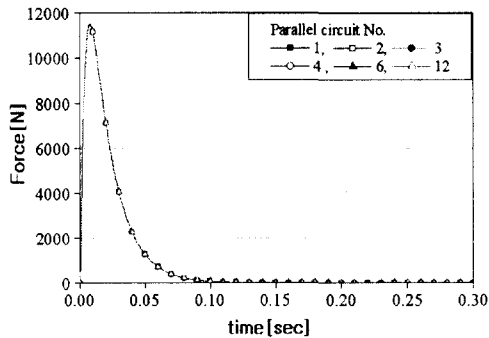


Fig. 9 시간에 따른 추력 특성

Fig. 9에서 속도 2 m/s, 정상상태 도달 시간 0.1초로 가속도 2G가 달성됨을 알 수 있다. Fig. 11에서는

가속도의 증가에 따라 추력의 변화가 급격하게 일어나를 보여준다. 등속구간에서 추력이 적게 나타나는 이유는 마찰력만이 작용하는 경로 해석이 되었기 때문이다. 전반적으로, 전압을 증가함에 따라 속도 및 가속도는 증가하고 부하가 증가할수록 속도가 감소함을 알 수 있다.

5. 결론

목표사양에 맞는 공작기계용 리니어모터를 설계를 위한 및 해석방법을 살펴보았다. 해석결과를 반영한 모터 제작이 현재 진행중인 상태로 조만간 성능평가를 실시할 예정이며, 추력, 전류 등의 설계사양 및 동특성 해석 결과를 바탕으로 성능평가를 실시하여 추후 미비한 부분을 보충, 실제에 가까운 해석이 가능하도록 하여 추가 시제품 설계 및 제작에 반영할 예정이다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점과제인 “고속저능형 가공시스템의 개발(1999.12~2002.9)”중 제5세 부과제인 “고속고강성 이송시스템 기술개발”로 산업자원부의 연구사업비 지원에 의하여 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Syed A. Nasar, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc., 1987
2. Amitava Basak, "Permanent-Magnet DC Linear Motors", Clarendon Press, 1996
3. P. Van Den Bramembussche, "Accurate Tracking Control Of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes", Mechatronics Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.
4. S. A. Nasar and I. Boldea, 1987, Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications, Prentice-Hall, Inc.
5. E. Favre, L. Cardoletti and M. Jufer, "Permanent-magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression", IEEE Trans. Ind. Applic., Vol. 29, pp. 1141-1149, 1993.