

양측식 리니어 펄스 모터의 2차원 유한요소해석

이동주*, 이은웅*, 김성현**, 김일중¹, 김성종*
 충남대*, 천안공대**, 주성대학³

2D Finite Element Analysis of Double-side LPM

Dong Ju Lee*, Eun Woong Lee*, Sung Hun Kim**, Il Jung Kim¹, Sung Jong Kim*
 Chungnam Nat'l Univ.*, Chun An College**, Ju Sung College³

Abstract - Hybrid type LPM can be widely applied in the precise position controlled device because precise linear motion can be directly obtained by the simple control circuit without backlash in the rotary-type stepping motor. Also, LPM can increase the position resolution, which was limited by mechanical manufacturing limit and characteristic of magnetic material, using micro-step drive method to decrease the noise and vibration further. Especially, Double-side LPM may be replaced the solenoid as the valve driving device without difficulty and give full play to control the valve accurately. Hence, In this paper, magnetic circuit of double-side LPM was confirmed and static thrust force curve according to the relative displacement between stator and mover, was analyzed by the two dimensional finite element method. From this results, we can suppose the excitation current to be controlled optimally.

편측식과 비교하여 정립하고 간소화된 2차원 유한요소 모델을 가지고 가동자와 고정자의 상대적인 변위에 따른 정추력 특성을 해석하였다. 이 해석 결과로부터 제작될 양측식 리니어 펄스 모터를 구동시, 가장 양호한 제어 특성을 얻을 수 있는 구동 전류를 제시하고자 한다.

2. 양측식 리니어 펄스 모터

2.1 기계·자기적인 구조

그림 1.(a)는 기존에 제작된 편측식 리니어 펄스 모터의 구조를 나타내고 있다. 반면에 그림 1.(b)는 양측식 2상 8극 리니어 펄스 모터의 구조를 나타내고 있으며 기계적으로 편측식 2상 4극 리니어 펄스 모터 2개가 서로 가동자를 중심으로 서로 마주보고 있는 구조를 하고 있다.

1. 서 론

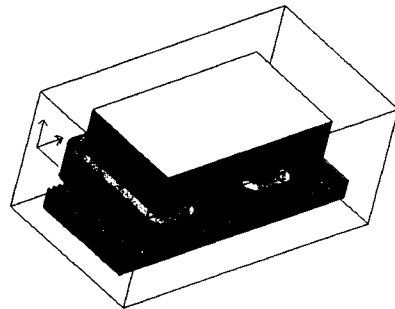
하이브리드형 리니어 펄스 모터는 회전형 스텝 모터와는 달리 백래쉬(Backlash)없이 직선운동을 할 수 있어 고정밀 위치제어가 요구되는 산업분야에 적용하면, 우수한 위치 제어 특성을 얻을 수 있다. 그리고 가공상의 기계적인 한계 및 자성 재료의 특성으로 인해 제한되는 위치 정밀도를 비교적 간단한 마이크로 스텝 구동 제어로 향상시킬 수 있으며 또한 구동시 소음 및 진동을 현저히 감소시킬 수 있다.

특히 양측식 리니어 펄스 모터는 편측식에 비해 발생 추력을 증대시킬 수 있어 미국, 일본 등의 선진국에서는 인공심장이나 고정밀·고신뢰도를 요구하는 산업분야에 적용하기 위해 많은 연구가 수행된 바가 있다. [1]~[2]

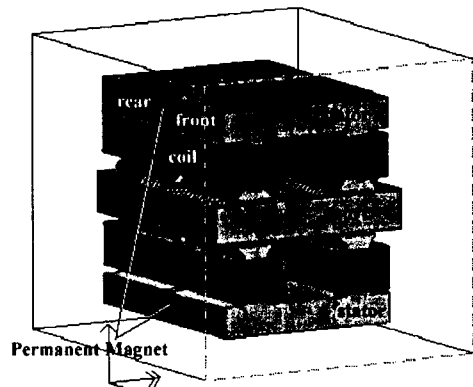
양측식 리니어 펄스 모터는 지지기구에 부담을 적게 주기 때문에 구조상 밸브 구동장치에 적용이 용이한 구조를 하고 있어 현재, 비례 제어 밸브에 사용되고 있는 솔레노이드형 구동장치에 대체되어 사용된다면 우수한 제어특성을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구실에서는 그 동안 편측식 리니어 펄스 모터를 설계·제작하여 추력특성 및 위치정밀도 등의 주요특성을 해석하고 실험을 통하여 확인한 바가 있다. [3]~[9] 이러한 해석 및 실험을 통해 얻은 리니어 펄스 모터의 기초 설계 자료와 여러 특성 해석자료를 기초로 하여 기존의 제어밸브에 사용되고 있는 솔레노이드를 대체할 수 있는 양측식 리니어 펄스 모터의 설계·제작이 진행중이다.

따라서 본 연구에서는 비례제어 밸브용으로 제작될 양측식 리니어 펄스 모터의 기본적인 자기회로의 특성을



(a) Single-side LPM



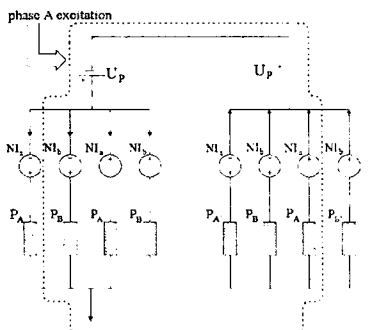
(b) Double-side LPM

그림 1. 리니어 펄스 모터의 구조
 Fig. 1. Structure of Hybrid type LPM

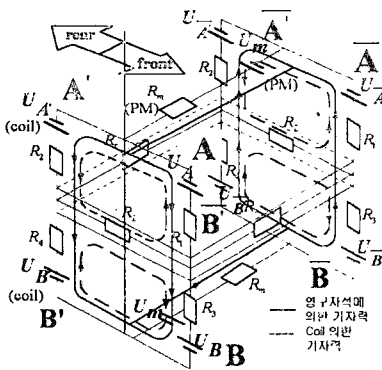
이것은 기존에 본 연구실에서 설계·제작자가 있는 편측식 2상 8극 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 자기 회로를 2개로 분리하여 서로 마주보게 하고 여자권선 및 영구자석이 위치하고 있는 계절부분은 정지해 있고 중앙의 철심이 가동자의 역할을 하는 자기적인 구조를 가지고 있다. 표 1은 제작하기 위해 검토중인 양측식 리니어 펄스 모터의 전기적·기계적인 사양을 나타내고 있다.

표 1. 양측식 리니어 펄스 모터의 전기·기계적 사양
Table 1. Mechanical/Electrical Specification of Double-side LPM Model

No. of Phase	2 [phases]	
No. of Pole	8 [poles]	
Airgap Length	100 [μm]	
Step Length	0.4 [mm]	
Specification	stator	movar
No. of Tooth	10 [ea/pole]	-
Tooth Pitch	1.60 [mm]	1.60 [mm]
Tooth Width	0.64 [mm]	0.64 [mm]
Slot Width	0.96 [mm]	0.96 [mm]
Thickness of Core	44.5 × 2 [mm]	93.00 [mm]
Thickness of PM	4 [mm]	-
Excitation Winding	100 [turn/phase]	-
Excitation Current	1 [A/phase]	-
Permanent Magnet	Nd-Fe-B Alloy	-



(a) Single-side LPM



(b) Double-side LPM

그림 2. 자기등가회로
Fig. 2. Magnetic equivalent circuit

2.2 자기 등가 회로

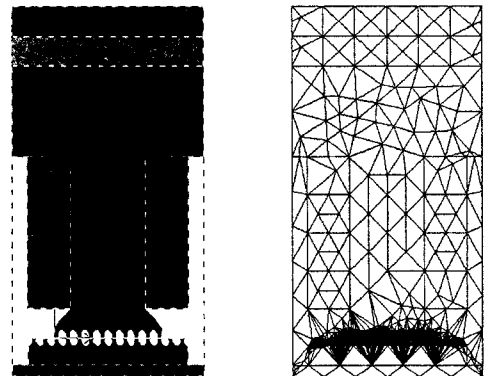
그림 2.(a)는 기존에 제작된 편측식 리니어 펄스 모터의 자기등가회로를 나타내고 있다. 그리고 그림 2.(b)는 비례제어밸브의 슬레노이드를 대신에 사용되기 위해 제작될 양측식 리니어 펄스 모터의 자기등가회로를 나타내고 있다. 양측식 리니어 펄스 모터는 그림 2.(a)의 극 A, A', A', A'을 한 개의 자기회로로 구성하고 극 B, B', B', B'을 다른 한 개의 자기회로를 구성하여 하나의 가동자를 통하여 서로 자기적으로 연결된 구조를 하고 있어 편측식에 비해서 다소 더욱 복잡한 3차원적인 자로 분포를 가지고 있으나 발생 추력의 증대나 지지 기구의 경감 등의 측면에서 보면 많은 장점을 가지고 있다.

그리고 기존의 편측식 리니어 펄스 모터에서는 수직력을 경감시면서 위치정밀도를 향상시키고자 사다리꼴 형태의 치 구조를 하고 있었는데 반하여, 제작중인 양측식 리니어 펄스 모터는 구조적으로 수직력을 서로 상쇄할 수 있는 구조를 가지고 있기 때문에 수직력 경감보다는 위치정밀도 향상 및 발생 추력의 증대를 위해서 고정자와 가동자의 치 구조가 원형으로 설계·제작될 예정이다. 특히, 기존의 편측식의 치 구조에서는 치와 슬롯의 비가 1:1.33(tooth : slot = 1.5mm : 2.0mm)인데 반하여 제작될 양측식의 치 구조에서는 치와 슬롯의 비가 1:1.5(tooth : slot = 0.64mm : 0.96mm)로 설계되어 있어 위치제어시 안정점 부근에서의 위치 정밀도가 우수할 것으로 예상된다.

3. 정추력 특성 해석

3.1 유한 요소 해석

그림 2.(b)에서와 같이 양측식 리니어 펄스 모터는 편측식에 비해 다소 복잡한 자기회로로 구성되어 있기 때문에 단순히 해석적인 방법으로 정추력 특성을 정확히 해석하기는 어렵다. 그리고 공극에 인가되는 영구자석의 기자력과 여자전류에 의한 권선 기자력의 상호작용에 의해 공극 자속 분포가 크게 영향을 받기 때문에 그 결과 발생하는 추력 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에는 양측식 리니어 펄스 모터의 한 개의 극에 해당하는 간략화된 2차원 해석모델을 선정하여 유한요소법으로 정추력 특성을 해석하였다.



(a) Analysis model (b) Initial mesh

그림 3. 유한요소모델

Fig. 3. Finite element model

그림 3.(a)는 고정자의 계절부분의 투자율이 매우 커서 기자력 강하가 무시할 만큼 작다고 가정하고 해석을

위해 간략화된 해석 모델이고 이 모델의 극에 위치한 권선의 턴 수는 100(turns)이고 인가된 전류는 1.0 [A/phase]이다. 그림 3.(b)는 유한요소해석에 사용된 해석영역의 초기요소망을 나타내고 있다. 그리고 해석의 정밀도를 높이고자 고계차(Polynomial order)는 2로 하여 해석하였고 해석영역의 상부와 하부에는 자연경계 조건을 적용하여 해석하였다.[10]

3.2 자속분포 해석 결과 및 검토

그림 4는 그림 3.(a)의 해석모델의 권선에 $I_a = 1.0[A]$ 를 인가한 경우에, 2차원 유한요소법으로 가동자의 주위위치에서 치 및 극에 분포하는 자속 분포를 나타내고 있다.

자속 분포도에서 알 수 있는 바와 같이 고정자와 가동자의 상대적인 변위가 $x = \tau/4$ 또는 $x = \tau/3$ 일 때 보다 변위가 $x=0$ 일 때 고정자의 영구자석 부근의 자속밀도가 높아 쉽게 포화된 것은 이 위치에서의 공극 자기 저항이 상대적으로 작기 때문에 공극에서의 기자력 강도가 상대적으로 작아 상대적으로 큰 기자력이 영구자석이 위치한 계철 부근에 집중되기 때문으로 예상된다.

그래서 고정자와 회전자의 치가 정렬된 위치($x=0$)에서 극의 전체적인 자속밀도가 높고 상대적인 변위가 증가함에 따라서($x = \tau/2$), 극의 전체적인 자속밀도가 낮은 것으로 해석된 것이다.

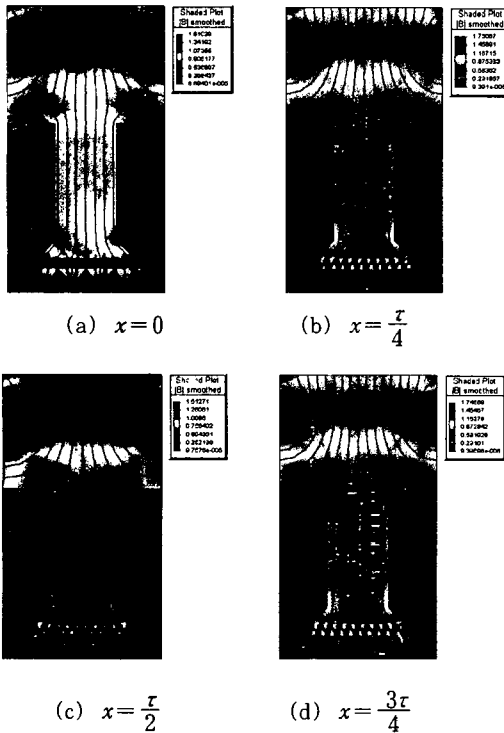


그림 4. 자속분포
Fig. 4. Flux distribution

3.3 정추력 특성 곡선 해석결과 및 검토

그림 5는 2차원 유한요소해석 결과로부터, 고정자와 가동자의 상대적인 변위에 따른 정추력 특성 곡선을 해석한 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 정추력 특성이 정현적인 분포를 합을 알 수 있다. 제작된 양극식 리니어 펄스 모터는 90도 위상차를 정현적인 전류를 각 권선에 인가하고 그 발생 추력이 정현적이라고 가정하고

구동하는 마이크로 스텝 제어방식에서 적합한 자기적인 구조를 갖고 있다고 할 수 있다. 따라서 비례제어밸브의 솔레노이드 장치를 대체하여 사용될 때, 제어되는 위치 정밀도를 충분히 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

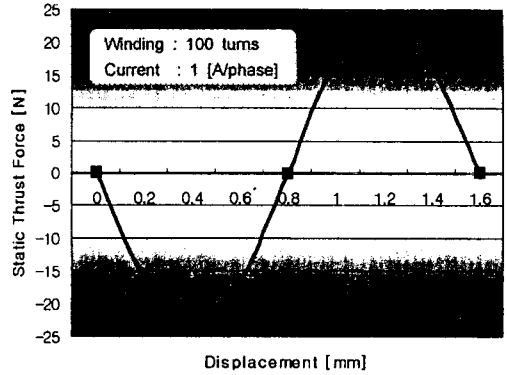


그림 5. 정추력 곡선
Fig. 5. Static thrust force curve

4. 결론

본 논문에서는 기존에 설계·제작된 편축식 2상 8극 리니어 펄스 모터와 제작 예정인 양극식 리니어 펄스 모터의 자기회로를 비교·검토하였고 한 극에 해당하는 간소화된 2차원 해석모델을 가지고 가동자의 위치에 따른 자속분포와 정추력 특성을 해석하였다.

그 결과, 여자전류를 약 1.0[A]정도 인가할 때 얻은 정추력 곡선이 정현적인 것으로 보아 정현적인 추력 특성을 요구하는 마이크로 스텝 제어에 적합한 자기적인 구조를 하고 있음을 확인하였다.

따라서 이와 같이 지지기구에 부담을 거의 주지않는 양극식 리니어 펄스 모터를 비례제어밸브의 솔레노이드 장치에 대체되어 사용될 때, 마이크로 스텝 제어에 의해서 제어되는 위치정밀도를 향상시키고 소음 및 진동을 저감시킬 수 있음을 예상할 수 있었다.

앞으로 비례제어밸브에 적용하기 위한 양극식 리니어 펄스 모터의 보다 상세한 해석을 위해서 3차원 유한요소법과 같은 수치해법을 이용하여 각 극에서의 영구자석 및 권선 기자력 상호작용에 관한 보다 상세한 해석이 필요하다.

[참고 문헌]

- [1] H. Yamada, "Performance Analysis of Flat Linear Pulse Motor for Implantable Artificial Heart", JIEE, MAG-87-146, 1987.
- [2] H. Yamada, "Improvement of Characteristics on Linear Pulse Motor for Artificial Heart Drive", JIEE, LD-89-18, 1989.
- [3] 김일중, 이은용, "HB리니어펄스모터(LPM)의 구동특성", 대한전기학회논문지, 42권 6호, pp.1-8, 1993
- [4] 이은용, 김일중, "2상8극형 HB형 리니어펄스모터(LPM)의 자속분포와 정특성 해석", 대한전기학회논문지, 42권 9호, pp.9-18, 1993.
- [5] 이은용, 김일중, 김성현, "편축식 리니어펄스모터(LPM)의 자기회로 설계와 제어기개발", 대한전기학회논문지, 44권 6호, pp.743-749, 1995.
- [6] 김일중, "磁氣回路의 平衡을 고려한 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 特性解析", 박사학위논문, 충남대, 1995
- [7] 이동주, "리니어 펄스 모터의 구동특성 해석 및 마이크로 스텝제어", 석사학위논문, 충남대, 1998
- [8] 김성현, "회자속형 LPM의 정밀위치제어에 관한 연구", 박사학위논문, 1999
- [9] 이동주, 이은용, 김성현, "리니어 펄스 모터에서 치 형상 및 기자력 불평형이 정추력 특성에 미치는 영향", 대한전기학회논문지, 49권 3호, 2000.
- [10] MagNet version 6.4 Tutorials", Infolytica, Corporation, 1999.