

공극 길이 차이가 양측식 리니어 펄스 모터의 특성에 미치는 영향

論 文

52B-1-1

Effect of Airgap Length Difference on the Characteristics of the Double-Sided Linear Pulse Motor

李 東 周* · 李 殷 雄** · 金 成 憲*** · 孫 洪 寬§ · 金 成 鐘§§

(Dong Ju Lee · Eun Woong Lee · Sung Hun Kim · Hong Kwan Sohn · Sung Jong Kim)

Abstract - Generally, thrust force of double-sided LPM is more powerful than that of single-sided LPM. Also, double-sided LPM can be effectively applied to the high-precision position system with its simple control scheme. However, An equality between two airgap lengths is a necessary condition for its high performance. If a little difference between two airgaps is existed, unbalanced normal force and undesirable vibration will be generated. Additionally, even though two airgap lengths are absolutely same, undesirable vibration can be generated because the direction of instantaneous normal force on mover is changed according to excitation methods.

An effect of inequality of two airgap lengths is presented in this paper. Distribution of airgap permeance vs. relative displacement is analyzed by two dimensional finite element method. Excitation From this results, current waveforms to reduce the undesirable vibration is proposed.

Key Words : Double-sided linear pulse motor, Finite element analysis, Normal force, Static thrust force

1. 서 론

고정밀 위치제어가 요구되는 산업분야의 구동원은 백래쉬(backlash)가 없는 하이브리드형 리니어 펄스 모터가 적합하다. 또한 미세구동방식으로 가공상의 한계와 자성재의 물성으로 인해서 제한되는 위치 정밀도를 높일 수 있어 소음 및 진동을 현저히 감소시킬 수 있다.[1][2]

리니어 펄스 모터는 추력과 수직력이 동시에 발생하여 수직력이 추력보다 매우 크기 때문에 수직력을 최소화하거나 상쇄시키는 것이 중요하다. 양측식 리니어 펄스 모터(double-sided linear pulse motor)는 편측식 리니어 펄스 모터(single-sided linear pulse motor)에 비해 상하에서 발생하는 수직력을 상쇄하기 때문에 지지기구의 부담을 경감시키고, 발생 추력을 증대시킬 수 있다. 그래서 미국, 일본 등의 선진국에서는 인공심장이나 고정밀·고신뢰도를 요구하는 산업분야에 응용하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다.[3][4]

양측식 리니어 펄스 모터는 상부와 하부에 있는 두 가동자에서 추력과 수직력을 각각 발생한다. 여자 방식으로는 1상 여자보다는 상부와 하부의 고정자 권선을 동시에 여자시키는

2상 여자를 채용함으로써 서로 반대방향으로 발생하는 수직력을 상쇄시켜 자기적 흡인력과 자속 손실을 경감시킬 수 있다. 따라서 양측식 리니어 펄스 모터에서는 수직력을 상쇄시키기 위해 상부와 하부에 존재하는 공극의 길이가 완전히 동일하도록 하여야 하지만, 제작상 어려움이 있다.

본 연구에서는 시작기로 제작한 2상 8극 양측식 리니어 펄스 모터의 자기등가회로를 구성하여 그 구동원리를 소개하였다. 그리고 상부와 하부의 공극 길이 차이가 양측식 리니어 펄스 모터의 특성에 미치는 영향을 상세히 검토하기 위해서 2차원 유한요소해석을 하였고 그 결과로부터 공극길이 차이가 수직력 및 정추력에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였다.

또한 양측식 리니어 펄스 모터에 적합한 2상 여자구동시, 각 극에서의 고정자와 가동자간의 상대적인 변위가 같지 않아서 서로 상쇄되지 않는 수직력을 완전히 상쇄시킬 수 있는 2상 여자전류 파형을 제시하였다.

2. 양측식 리니어 펄스 모터

2.1 전기·기계적 구조

그림 1은 양측식 리니어 펄스 모터의 기계적인 구조와 자기등가회로를 나타내고 있다. 상부 A와 하부 B의 고정자들은 A와 \bar{A} , A'과 \bar{A}' 그리고 B와 \bar{B} , B'과 \bar{B}' 으로 각각 2개의 "Π"형 적층 철심으로 구성되어 있으며, 각 "Π"형 철심상의 2개 극 간의 전기적인 위상차는 $\tau/2$ (여기서, τ =치 피치, 1.6[mm])이다. 그리고 두 개의 철심으로 구성된 가동자의 상

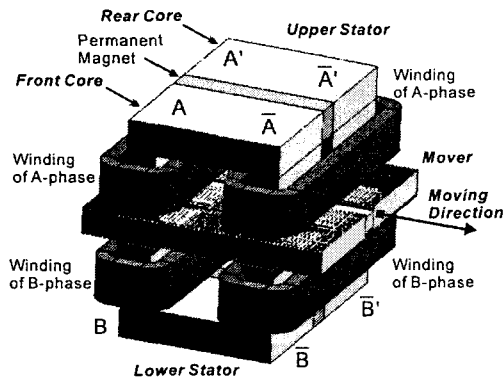
* 正 會 員 : 忠南大學 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 忠南大學 電氣工學科 教授 · 工博
*** 正 會 員 : 天安工業大學 制御計測科 教授 · 工博
§ 準 會 員 : 忠南大學 電氣工學科 博士課程
§§ 正 會 員 : 忠南大學 電氣工學科 碩士
接受日字 : 2002年 3月 21日
最終完了 : 2002年 12月 11日

부극 \bar{A} 의 진행 방향 첫 치와 하부극 \bar{B} 의 진행 방향 첫 치 간에서는 공간적으로 $\tau/4$ 어긋나 있으며 진행방향에서 볼때, 왼쪽극 \bar{A} 와 오른쪽 \bar{A}' 밑의 가동자의 치 간에는 공간적으로 $\tau/2$ 어긋난 구조이다.

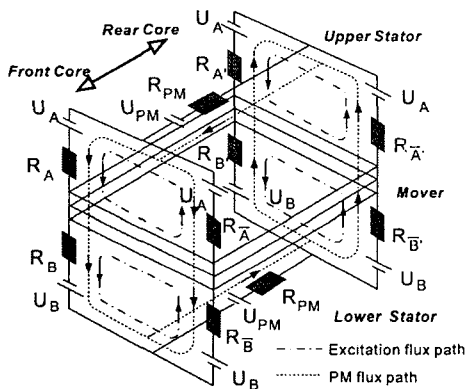
이와 같은 구조의 각 극의 전기적인 위상차를 피어미언스 함수로 나타내면 식(1)과 같다. “'” 기호가 있으며 앞쪽 극이고 “ ” 기호가 없으면 뒤쪽 극이다.

$$\begin{aligned}
 P_A &= P_0 + P_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}x\right) = P_{\bar{A}'} \\
 P_B &= P_0 + P_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}\left(x - \frac{\tau}{4}\right)\right) = P_{\bar{B}'} \\
 P_{\bar{A}} &= P_0 + P_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}\left(x - \frac{\tau}{2}\right)\right) = P_{A'} \\
 P_{\bar{B}} &= P_0 + P_m \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}\left(x - \frac{3\tau}{4}\right)\right) = P_{B'}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, P_0 : 공극 피어미언스의 직류성분
 P_m : 공극 피어미언스의 교류성분 최대값



(a) 기계적인 구조
 (a) Mechanical structure



(b) 자기등가회로
 (b) Magnetic equivalent circuit

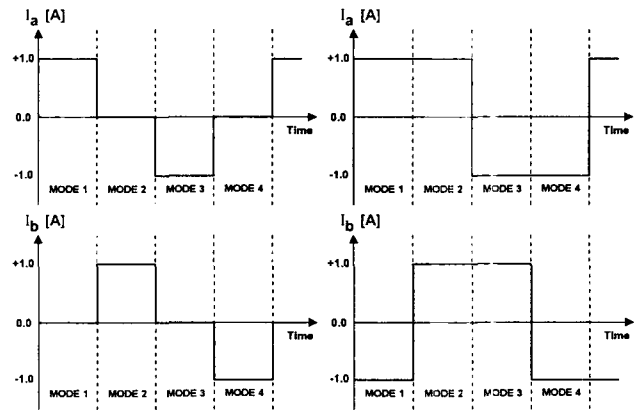
그림 1 양측식 리니어 펄스 모터
 Fig. 1 Double-sided LPM

그림 1(b)는 양측식 리니어 펄스 모터의 자기등가회로를 나타낸다. 그림 1(b)에서 U_A, U_B 는 각각 A상 권선과 B상 권선에 의한 권선 기자력을 나타내고 U_{PM} 는 상부와 하부의 영구자석에 의한 기자력을 나타낸다. 그리고 $R_A, R_{A'}, R_{\bar{A}}, R_{\bar{A}'}$ 는 상부 고정자의 각 극과 가동자간의 자기저항을 나타내며 $R_B, R_{B'}, R_{\bar{B}}, R_{\bar{B}'}$ 는 하부 고정자의 각 극과 가동자간의 자기저항을 나타낸다.

2.2 구동방식 비교 검토

양측식 리니어 펄스 모터는 상부 고정자에 a상 권선을 감고 하부 고정자에는 b상 권선이 감겨져 있어 1상 여자 또는 2상 여자방식의 구동이 가능하다.

1상 여자방식의 경우, 그림 2의 (a)와 같이 전류가 일정시간 동안 정전류를 상부와 하부의 고정자 권선에 교대로 반복 여자시켜 $\tau/4$ 씩 가동자를 이동시키기 때문에 가동자의 상부와 하부에서 발생하는 수직력을 대응적으로 상쇄시킬 수 없다. 그래서 상 절환시 불평형 수직력에 의한 진동을 유발시키며, 구동시 추력의 맥동 성분이 매우 크다. 따라서 2상 여자방식은 양측식 리니어 펄스 모터에는 부적당한 구동방식이다.



(a) 1상 여자 (a) One-phase excitation
 (b) 2상 여자 (b) Two-phase excitation

그림 2 여자전류 파형
 Fig. 2 Waveform of excitation current

2상 여자방식의 경우, 그림 2(b)와 같이 각 상의 고정자 권선 전류가 일정시간동안 정전류 제어되어 가동자를 빼고 상하 고정자 극만의 그림 3에서 나타낸 것과 같이 상부와 하부의 고정자극들이 서로 동시에 여자된다. 그렇기 때문에 점선으로 표시한 합성 자속경로를 따라서 주된 자기회로가 구성되어서 가동자의 상부와 하부에서 발생하는 수직력을 상쇄시킬 수 있어 구동시, 추력의 맥동을 줄일 수 있으며 상 절환시 발생하는 진동을 감소시킬 수 있다.

본 논문에서 양측식 리니어 펄스 모터는 2상 여자 방식을 채용하여 수직력이 상쇄되도록 하는 구조로 하였으며 위치 정밀도 향상 및 발생 추력의 증대를 위해서 고정자와 가동자의 치는 각형으로 하고 슬롯은 원형으로 설계·제작하였다. 특히, 편측식의 치 구조에서는 치와 슬롯의 비가 1:1.33 (tooth : slot = 1.5mm : 2.0mm)인데 반하여 제작한 양측식의

치 구조에서는 치와 슬롯의 비가 1:1.5 (tooth : slot = 0.64mm 0.96mm)로 설계·제작하였기 때문에 마이크로 스텝 구동으로 정밀 위치제어를 할 때 소숫점 없는 정지 위치값을 갖도록 하였다.[5]

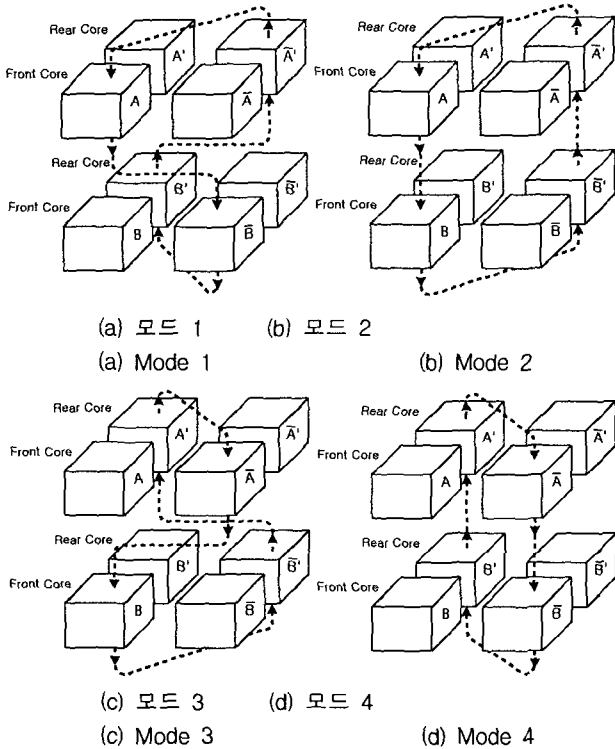


그림 3 2상 여자방식에 의한 여자 순서
Fig. 3 Excitation sequence by 2 phase excitation

2.3 제작한 양측식 리니어 펄스 모터

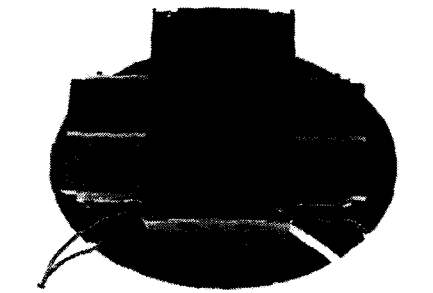


그림 4 양측식 리니어 펄스 모터의 시작기
Fig. 4 Prototype double-sided LPM

그림 4는 양측식 리니어 펄스 모터 시작기 외형을 나타낸 사진이며, 표 1은 전기적·기계적 세부 설계 사양이다.

3. 공극 길이 차이에 의한 영향 해석 및 검토

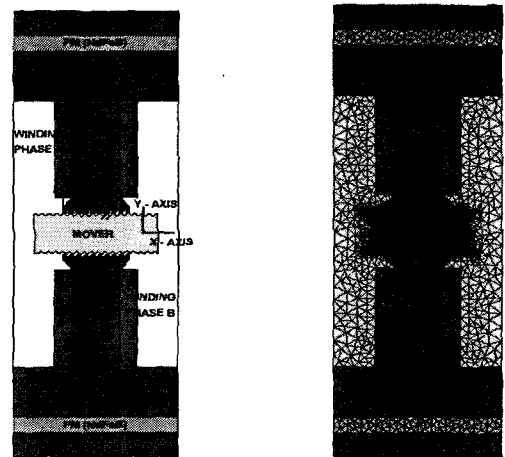
양측식 리니어 펄스 모터는 2상 여자방식에 의해서 가동자의 상부와 하부에 작용하는 수직력을 서로 상쇄시켜 가동자가 받는 수직력을 없앨 수 있다. 그러나 상부와 하부 공극길이의 차이가 심하면 구동 자체가 불가능할 수도 있으므로 수

표 1 전기·기계적 사양

Table 1 Electrical·mechanical specification

No. of phase	2	
No. of pole	8	
Airgap length [μm]	100	
Step length [mm]	0.4	
Specification	stator	mover
No. of tooth	10 [ea/pole]	-
Tooth pitch (τ)	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	-

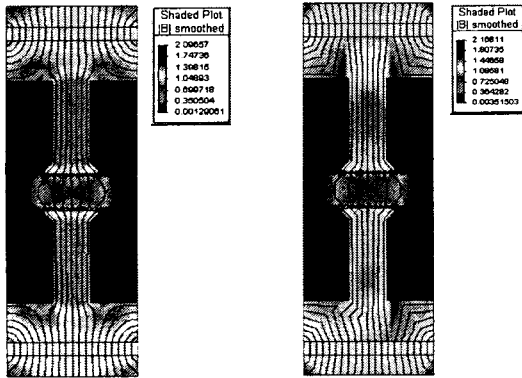
직력을 최소화해야 한다. 수직력을 없애려면 첫째로 상부와 하부의 공극길이가 완전히 같아야 한다. 하지만 제작 및 조립 과정상에 공극길이를 완전히 동일하게 하는 것은 매우 어렵다. 상부와 하부의 공극길이 차이에 따른 양측식 리니어 펄스 모터의 수직력과 정추력 특성을 상세히 해석하기 위해 그림 1(b)에서 고정자 철심의 투자율이 충분히 커서 철심에서의 기자력 강하를 무시할 수 있다면 z축 방향으로 자화된 영구자석을 그림 5(a)에서와 같이 영구자석을 y축 방향으로 배치된 2차원적 모델로 변환할 수 있다. 그리고 그림 5(a)에서 상부 고정자의 극 A의 상대적인 변위는 $x=0$ 이고 하부 고정자의 극 B의 상대적인 변위는 $x=\tau/4$ 이며 그림 5(b)는 해석모델의 요소 분할도이다.



(a) 해석 모델 (b) 초기 분할 요소
(a) Analysis model (b) Initial mesh

그림 5 유한요소 해석 모델
Fig. 5 Finite element analysis model

그림 5의 해석모델에서 상부의 공극길이(g)가 0.085[mm]에서 0.115[mm]까지 변화하면 하부의 공극길이는 $g=0.115\sim 0.085$ [mm]로 변할 때, 2차원 유한요소해석을 하였다. 그림 5(a)의 여자 권선의 턴 수는 100[turns]이며 인가된 전류는 1.0 [A/phase]이다. 그림 5(b)는 유한요소해석에 사용된 초기 요소망이다.



(a) $g = 0.1$ [mm] (b) $g = 0.115$ [mm]

그림 6 자속 분포
Fig. 6 Flux distribution

2차원 유한요소해석결과, 상부와 하부의 공극길이의 차이가 존재하지 않는 그림 6(a)의 경우($g=0.1$ [mm])와 공극길이 차이가 존재하는 그림 6(b)의 경우($g=0.115$ [mm])의 자속분포에서 공극길이 차이가 존재하는 경우 자속분포가 좀더 왜곡되는 것을 알 수 있다.

그리고 상부의 극 A가 $x=0$ 에 있을때, 하부의 극 B이 $x=\tau/4$ 의 차이가 있는 상부의 공극길이(g)만을 0.085[mm]에서 0.115[mm]까지 변화할때, 하부의 공극길이(g)는 0.115~0.085[mm]로 변시키면서 해석하여 얻은 단위길이당의 수직력과 정추력은 그림 7과 같다.

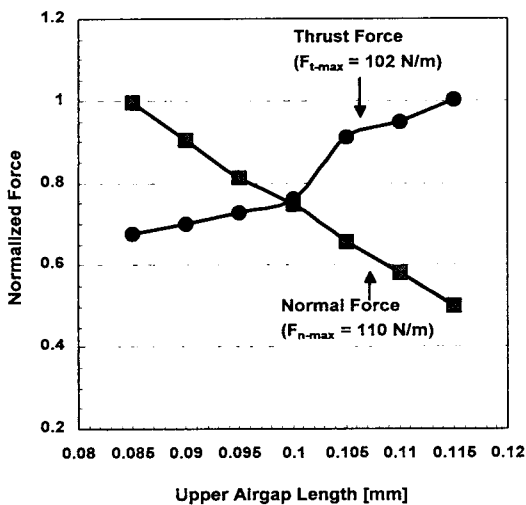


그림 7 수직력 및 정추력
Fig. 7 Normal force and static thrust force

그림 7에서 정격전류로 구동시에 공극길이의 차이에 따라 수직력이 거의 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 그리고 공

극길이 차이가 존재하지 않는 $g=0.1$ [mm]에서도 수직력이 존재할 수 있는 이유는 구동원리상 상부의 극 A는 $x=0$ 에 위치할때 하부의 극 B는 $x=\tau/4$ 에 위치하도록 제작되었기 때문에 극 A와 극 B에 같은 전류가 인가되어도 완전히 수직력이 상쇄되지 못하고 공극 자기저항이 작은 쪽으로 수직력이 작용된다. 그러나 편축식 리니어 펄스 모터에서는 수직력이 추력의 약 5~10배 정도가 되는 것에 비하면, 양축식 리니어 펄스 모터는 수직력이 상당히 감소될 수 있음을 알 수 있다.

그림 7의 공극길이에 따른 선형적인 수직력의 변화에서 공극길이 차이가 전혀 없어도 존재하는 수직력은 가동자를 일정한 위치에 고정시키는데는 유효하지만 여러 스텝 이동시킬 때는 진동을 발생시키기 때문에, 가동자를 탈조시킬 수도 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 양축식 리니어 펄스 모터를 안정적으로 구동하기 위해서는 구동시 발생하는 수직력의 맥동에 의한 가동자의 진동을 제한할 필요가 있다.

4. 구동시 수직력 저감 방안

4.1 여자상태에 따른 수직력 분포

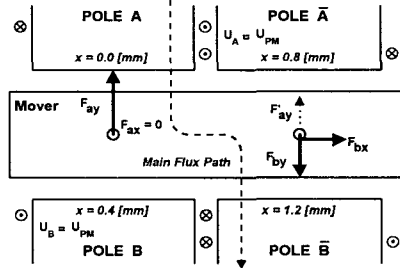
영구자석에 의한 기자력 U_{PM} 과 여자 전류에 의한 기자력 U_A, U_B 가 서로 같아서 순간적으로 U_A 와 U_B 중의 하나와 U_{PM} 이 서로 상쇄된다고 가정하고, 양축식 리니어 펄스 모터의 그림 2(b)와 같은 2상 여자 구동을 하는 경우, 각 극에서 발생하는 수직력 및 추력의 분포는 그림 8과 같다. 그런데 이 그림 8에서 영구자석 기자력과 여자전류 기자력이 서로 크기는 같고 방향이 반대인 극에는 기자력이 서로 상쇄되어 자료가 형성되지 않으며 두 기자력이 서로 같은 방향인 극으로만 자료가 형성된다.

그림 8(a)의 모드 1에서 극 A는 가동자와의 상대적인 변위가 $x=0$ 이고 극 B는 가동자와의 상대적인 변위가 $x=3\tau/4 (=1.2$ [mm])이므로 극 A에서는 거의 추력은 발생하지 않고 매우 큰 수직력이 발생할 것이며 극 B는 상대적으로 작은 수직력을 발생시킬 것이다. 따라서 모드 1에서는 A, B의 두 수직력의 차이에 의해서 가동자가 상부로 힘을 받게 된다.

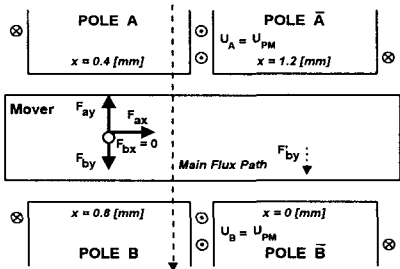
그림 8(b)의 모드 2에서 한 스텝 좌측으로 가동자가 움직여 가동자와 극 B가 $x=0$ 위치에 일치하였기 때문에 극 A는 가동자와의 상대적인 변위가 $x=\tau/4 (=0.4$ [mm])이고 극 B는 가동자와의 상대적인 변위가 $x=\tau/2 (=0.8$ [mm])이므로 극 B에서는 거의 추력은 발생하지 않고 수직력이 발생할 것이며 극 A에서는 추력과 수직력을 동시에 발생할 것이다. 따라서 모드 2에서는 두 수직력의 차이에 의해서 가동자가 상부로 비교적 작은 힘을 받게 된다. 마찬가지로 모드 3에서는 가동자가 상부로 큰 수직력을 받으며 모드 4에서도 가동자가 상부로 비교적 작은 수직력을 받게 된다. 이때 모드 1에서 수직력은 $x=0$ 인 위치에서 주로 발생하며 모드 2에서 수직력은 $x=\tau/2 (=0.8$ [mm])인 위치에서 주로 발생하기 때문에 각각의 수직력의 크기가 다르다. 이와 같이 상 전환시, 수직력의 차이에 의해서 가동자가 연속해서 여러 스텝을 이동할 때, 진동하게 된다. 따라서 구동시 이와 같은 수직력의 불평형에 의해 발생하는 가동자의 진동을 저감시킬 필요가 있다.

4.2 구동시 수직력 저감 방안

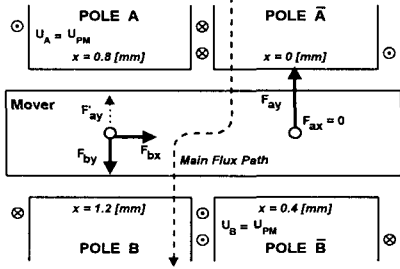
그림 8(a)의 모드 1에서 상부 고정자에 의한 수직력 F_{ay} 와 하부 고정자에 의한 수직력 F_{by} 를 고정자 치와 가동자 치의 상대적 순시 공극형상을 보상하는 카터 계수를 고려하여 구하면 식 (2), (3)과 같다.



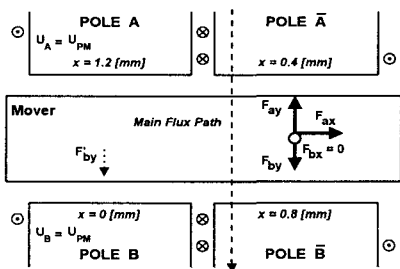
(a) 모드 1
(a) Mode 1



(b) 모드 2
(b) Mode 2



(c) 모드 3
(c) Mode 3



(d) 모드 4
(d) Mode 4

그림 8 각 모드에서의 수직력 분포

Fig. 8 Normal force distribution on each modes

$$F_{ay} = \frac{1}{2} \frac{w\mu_0 n^2 (I_{pm} + I_a)^2}{k_{c1}g} \quad [N/m] \quad (2)$$

$$F_{by} = \frac{1}{2} \frac{w\mu_0 n^2 (I_{pm} + I_b)^2}{k_{c1}g} \quad [N/m] \quad (3)$$

여기서, w : 극 폭[mm], g : 물리적인 공극 길이[mm]

n : a상 권선 턴수

k_{c1} : $x=0$ 에서의 카터 계수

k_{c4} : $x=3\tau/4 (=1.2[mm])$ 에서의 카터 계수

I_{pm} : 영구자석의 등가 여자전류($=1.0[A]$)

$$(\because U_{pm} = n \times I_{pm} = U_A = n \times I_a)$$

(1) 기자력 불균형을 고려한 경우

모드 1에서 극 A와 극 \bar{B} 의 위상차 $\tau/4$ 로 인해 발생하는 수직력의 불균형을 없애기 위해서는 a상 여자전류를 감소시켜야 한다. 그런데, 상부 고정자의 극 A와 극 \bar{A} 는 서로 기자력이 반대방향이 되도록 a상 여자권선이 감겨져 직렬로 결선되어 있으므로 수직력을 상쇄시키기 위해서 a상 여자전류 값을 줄이면 극 A의 수직력은 줄어들지만, 기자력 평형을 이루고 있던 극 \bar{A} 에서는 영구자석 기자력과 여자전류에 의한 기자력의 차가 발생하게 되어 추가적인 수직력 F'_{ay} 가 발생하게 된다.

$$F'_{ay} = \frac{1}{2} \frac{w\mu_0 n^2 (I_{pm} - I_a)^2}{k_{c3}g} \quad [N/m] \quad (4)$$

여기서, k_{c3} : $x=\tau/2 (=0.8[mm])$ 에서의 카터 계수

따라서, 영구자석과 여자전류에 의한 기자력이 같지 않아서 발생하는 추가적인 수직력 F'_{ay} 을 없애야만 하기 때문에 식 (5)를 만족해야 한다.

$$F_{ay} + F'_{ay} = F_{by} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (2), (3), (4)를 대입하여 풀면, 모드 1에서 상하 수직력을 상쇄시키기 위한 a상 여자전류 I_{a1} 과 b상 여자전류 I_{b1} 의 관계식을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$I_{a1} = \frac{\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{1}{k_{c1}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c1}} - \frac{1}{k_{c3}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}}\right)\left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}} - \frac{(1+I_{b1})^2}{k_{c4}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}}\right)} \quad (6)$$

같은 방법으로 모드 2, 모드 3, 모드 4에서 상하 수직력을 상쇄시키기 위한 a상 여자전류와 b상 여자전류의 관계식을 구하면 식 (7), (8), (9)와 같다.

$$I_{b2} = \frac{\left(\frac{1}{k_{c1}} - \frac{1}{k_{c3}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{1}{k_{c1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}}\right)\left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}} - \frac{(1+I_{a2})^2}{k_{c2}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}}\right)} \quad (7)$$

$$I_{a3} = \frac{\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{1}{k_{c1}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{1}{k_{c1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}}\right)\left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}} - \frac{(1+I_{b3})^2}{k_{c4}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c1}} + \frac{1}{k_{c3}}\right)} \quad (8)$$

$$I_{b4} = \frac{\left(\frac{1}{k_{c1}} - \frac{1}{k_{c3}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{1}{k_{c1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}}\right)\left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}} - \frac{(1+I_{a4})^2}{k_{c2}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c3}} + \frac{1}{k_{c1}}\right)} \quad (9)$$

여기서, $k_{c2} : x=\tau/4 (=0.4[\text{mm}])$ 에서의 카터 계수

(2) 기자력 불균형을 무시한 경우

위상차로 인한 수직력을 없애기 위해 a상 또는 b상 여자전류를 작은 범위에서 증감시키므로써 균형을 잃은 극에 발생하는 추가적인 수직력이 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하는 경우이다.

따라서, 모드 1에서 수직력을 완전히 상쇄시키기 위한 조건은 식 (10)이 된다.

$$F_{ay} = F_{by} \quad (10)$$

식 (10)에 식 (2)와 식 (3)을 대입하여 수직력을 상쇄시키는 a상 여자전류와 b상 여자전류의 관계를 구하면 식 (11)과 같다.

$$I_{a1} = \frac{\left(-\frac{1}{k_{c1}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c1}}\right)\left(\frac{1}{k_{c1}} - \frac{(1+I_{b1})^2}{k_{c4}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c1}}\right)} \quad (11)$$

같은 방법으로 모드 2, 모드 3, 모드 4에서 수직력을 상쇄시키기는 a상 여자전류와 b상 여자전류의 관계를 구하면 식 (12), (13), (14)와 같다.

$$I_{b2} = \frac{\left(-\frac{1}{k_{c3}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c3}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c3}}\right)\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{(1+I_{a2})^2}{k_{c2}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c3}}\right)} \quad (12)$$

$$I_{a3} = \frac{\left(-\frac{1}{k_{c1}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c1}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c1}}\right)\left(\frac{1}{k_{c1}} - \frac{(1+I_{b3})^2}{k_{c4}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c1}}\right)} \quad (13)$$

$$I_{b4} = \frac{\left(-\frac{1}{k_{c3}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{k_{c3}}\right)^2 - \left(\frac{1}{k_{c3}}\right)\left(\frac{1}{k_{c3}} - \frac{(1+I_{a4})^2}{k_{c2}}\right)}}{\left(\frac{1}{k_{c3}}\right)} \quad (14)$$

따라서, 이상과 같이 기자력 불평형을 고려한 경우에는 식 (6)~(9)와 기자력 불평형을 무시한 경우에는 식 (11)~(14)를 만족하도록 a상 여자전류와 b상 여자전류를 제어하면 가동자에 발생하는 수직력을 상쇄시킬 수 있다. 따라서 a상 여자전류 I_a 와 b상 여자전류 I_b 를 정확히 제어하기 위해서는 각 모드에서의 정확한 카터 계수 $k_{c1}, k_{c2}, k_{c3}, k_{c4}$ 를 구하는 것이 필요하다.

5. 유한요소법에 의한 카터 계수 산출

본 연구에서 제작한 양측식 리니어 펄스 모터는 원형의 슬롯으로 되어 있어 해석적인 방법으로 카터계수를 구하기는 어렵다. 그래서 본 논문에는 2차원 유한요소법으로 각 위치에서의 카터 계수를 구하였다.

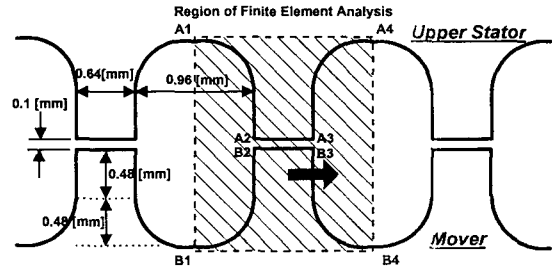


그림 9 유한요소해석 영역
Fig. 9 Region of finite element analysis

가동자의 주요 위치에서의 카터 계수를 구하기 위해서 그림 9의 영역“A1-A4-B4-B1”을 유한요소해석 영역으로 정하고 상부 고정자와 가동자 철심의 투자율이 공극의 투자율보다 매우 커서 철심에서의 기자력 강하가 거의 무시할 수 있을 정도로 작을 것으로 판단하고 상부 고정자 치면(A1-A2-A3-A4)과 가동자 치면(B1-B2-B3-B4)을 따라서 분포하는 자위(magnetic potential)는 동일하다고 가정하였다.

그림 9의 해석영역에서 전류원($J=0$)이 존재하지 않고 단지 자계 H만이 존재하므로 유한요소해석 영역의 전자계 방정식은 식 (15), (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (15)$$

$$\mathbf{H} = -\nabla \Omega \quad (16)$$

여기서, Ω : 자기 스칼라 포텐셜(magnetic scalar potential)

그리고 위의 전자계 방정식 (15), (16)을 풀기 위해서 전자계 유한요소해석 프로그램인 MagNet 소프트웨어[6]를 이용하였고 프로그램으로 해석시, 상부 고정자의 치면에는 $\Omega=1$ 을, 가동자의 치면에는 $\Omega=0$ 인 고정경계조건을 적용하였으며 선A1-B1과 선A4-B4에는 자연경계조건을 적용하였으며 해석하였다.

해석영역의 공극 퍼어미언스 값 P, 공극이 인가되는 기자력 \mathcal{F} , 치의 두께 ℓ 이라면 이때 공극에 저장되는 자기 에너지 W_s 는 식 (17)과 같다.

$$W_s = \frac{1}{2} P \mathcal{F}^2 = \int \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \ell dS \quad (17)$$

여기서 μ_0 : 진공중의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

식 (17)로부터 단위길이당 ($\ell=1[m]$)의 표준화된 퍼어미언스(normalized permeance) \bar{P} 는 식 (18)과 같다.

$$\bar{P} = \frac{P}{\mu_0} = \frac{\int H^2 dS}{\mathcal{F}^2} \quad (18)$$

그리고 카터 계수 k_c 와 유효공극길이 $g' = k_c \times g$ 를 이용

해서 표준화된 퍼미언스 값 \bar{P} 를 수식으로 표현하면 식 (19)와 같다.

$$\bar{P} = \frac{P}{\mu_0} = \frac{\tau}{k_c \times g} \quad (19)$$

식 (19)로부터 카터 계수를 구하면 식 (20)과 같다.

$$k_c = \frac{\tau / g}{P} \quad (20)$$

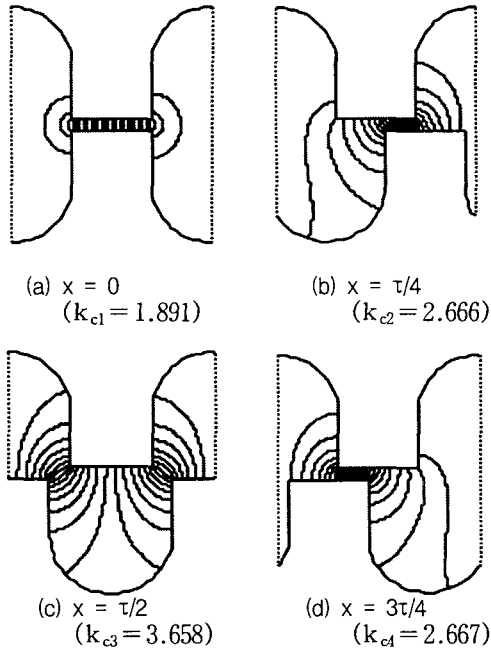


그림 10 공극에서의 자속분포
Fig. 10 Flux distribution in air gap

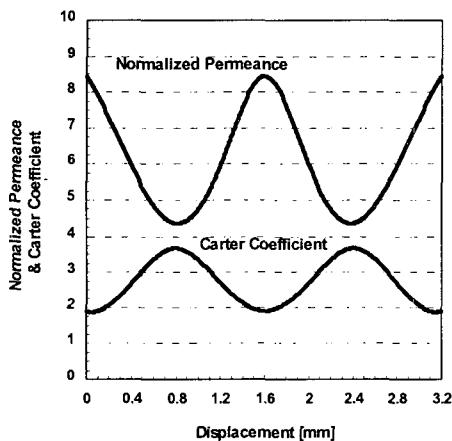


그림 11 표준화된 퍼미언스와 카터 계수
Fig. 11 Normalized permeance & Carter coefficient

따라서, 그림 9에서 가동자를 x방향으로 이동시키면서, 유한요소해석으로 식 (18)의 관계로부터 표준화된 퍼미언스 \bar{P} 값을 구하고 이를 식 (20)에 대입하면 가동자의 위치에 따른 카터 계수 k_c 의 분포를 얻을 수 있다.[7]

이와 같이 유한요소 해석으로 구한 가동자와 고정자의 상대적인 변위 x에 따른 카터계수를 구하기 위한 공극 자속분포는 그림 10과 같다. 그리고 유한요소해석 결과로부터 구한 가동자의 위치에 따른 표준화된 퍼미언스 값과 식 (20)으로부터 구한 카터 계수값들을 큐빅 스플라인 보간법(cubic spline interpolation)으로 구하여 그래프로 나타내면 그림 11과 같다.

6. 수직력 저감을 위한 여자 전류 계산

6.1 기자력 불균형을 고려한 경우

5장에서 유한요소해석으로 구한 각 위치에서의 카터 계수값들을 식 (6)~(9)에 대입하면, 여자전류의 증감에 따른 기자력 불균형을 고려한 2상 여자시, 각 모드에서 발생하는 수직력의 불균형을 제거할 수 있는 a상 여자전류와 b상 여자전류를 표 2와 같이 구할 수 있다.

표 2 수정된 여자 전류값 (1)

Table 2 Modified excitation current (1)

모드	a상 전류	b상 전류
1	0.67[A]	1.00[A]
2	1.00[A]	1.30[A]
3	0.67A]	1.00[A]
4	1.00[A]	1.30[A]

따라서, 정격전류가 1[A]인 경우, 모드 1과 모드 3에서는 a상 여자전류를 정격전류보다 약0.67배로 줄이고, 모드 2와 모드 4에서는 b상 여자전류를 정격전류보다 약1.30배로 늘려 양측식 리니어 펄스 모터를 구동시키면 추력의 맥동에는 영향을 미치지 않으면서 수직력의 맥동에 의한 가동자의 진동을 감쇠시킬 수 있다. 이와 같은 a상 여자전류와 b상 여자전류의 파형은 그림 12(a)와 같다.

6.2 기자력 불균형을 무시한 경우

앞장에서 구한 각 위치에서의 카터 계수를 식 (11)~(14)에 대입하면, 여자전류의 증감에 따른 기자력 불균형을 무시한 경우에 각 모드에서 수직력을 상쇄시키기 위한 a상 여자전류와 b상 여자전류를 표 3과 같이 구할 수 있다.

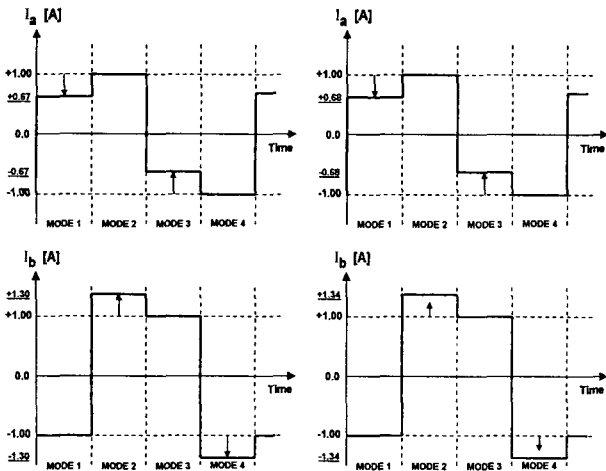
표 3 수정된 여자 전류값 (2)

Table 3 Modified excitation current (2)

모드	a상 전류	b상 전류
1	0.68[A]	1.00[A]
2	1.00[A]	1.34[A]
3	0.68[A]	1.00[A]
4	1.00[A]	1.34[A]

즉, 정격전류가 1[A]인 경우, 모드 1과 모드 3에서는 a상 여자전류를 정격전류보다 약0.68배로 줄이고, 모드 2와 모드 4에서는 b상 여자전류를 정격전류보다 약1.34배로 늘려 구동시키면 상하로 작용하는 가동자의 수직력을 상쇄시킬 수 있다. 이와 같은 a상 여자전류와 b상 여자전류를 파형은 그림 12(b)과 같다. 그림 12의 (a)와 (b)에서 알 수 있는 바와

같이, 기자력 불균형을 고려한 경우와 무시한 경우에 수직력을 상쇄시키기 위한 각 모드에서의 전류값의 크기를 보면 약 1~4%의 작은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 수직력 상쇄를 위해 a상 또는 b상 전류를 비교적 작은 범위에서 변화시키는 경우, 기자력 불균형에 의한 추가적인 수직력 F'_{ay} 에 의한 영향이 매우 작을 것을 예상할 수 있다.



(a) 기자력 불균형을 고려한 경우 (b) 기자력 불균형을 무시한 경우
 (a) Considering of unbalance mmf (b) Ignoring of unbalance mmf

그림 12 수정된 여자전류 파형
 Fig. 12 Modified excitation current waveform

5. 결 론

양축식 리니어 펄스 모터의 제작 과정시 발생할 수 있는 상하의 고정자와 가동자사이의 공극길이가 같지 않아서 수직력과 정추력에 미치는 영향을 해석하였다. 또한 상부와 하부의 공극이 같고 상부와 하부의 고정자에 같은 여자전류가 인가한다고 하더라도 상부 또는 하부 고정자 치와 가동자 치 사이의 상대적인 변위 때문에 발생하는 수직력이 서로 완전히 상쇄될 수 없음을 정량적으로 규명하였다. 그리고 이러한 상하 고정자의 상대적인 변위로 인해 발생하는 수직력을 제거하기 위하여 여자전류를 증감함에 따른 기자력 불균형으로 인해 추가적인 수직력이 발생함을 이론적으로 밝혔다. 그리고 이 추가적인 수직력을 고려한 경우와 무시한 경우, 수직력을 상쇄시키기 위한 여자전류 파형을 제시하였다. 또한 수직력 저감을 위한 각 상의 여자전류의 변화에 의해 발생하는 기자력 불균형이 수직력 상쇄를 위한 여자전류 파형에 무시할 수 있을 정도로 매우 작은 영향을 주는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 김성현, 이은웅, 이동주, "비례제어 펄스용 LPM의 특성 해석", KIEE, 하계학술대회 논문집, pp891~893, 2000. 7.
 [2] 김성현, 이은웅, 이동주, 김일중, 김성중, "공극 길이 차이가 양축식 리니어 펄스 모터의 특성에 미치는 영향", KIEE, 하계학술대회 논문집, pp.657-659, 2001. 7.
 [3] 山田一, 佐藤右・外 5人, 人工心臓駆動用 リニアバルスモータの性能改善, 電氣學會研究會 資料, MAG-89-106, LD-89-18, pp.77-87, 1989.
 [4] 山田一, 佐藤右・外 5人, 리ニアバル스모-타 驅動型 兩心 人工心臓의 開發成果, 電氣學會研究會 資料, MAG-91-37,

LD-91-11, pp.101-114, 1991.
 [5] 김성중, 이은웅, 김성현, 이동주, 오영웅, "리니어 펄스 모터의 치형상에 따른 수직력 및 진동특성 해석", KIEE, 하계학술대회, pp 89-91, 1999.
 [6] E.M.Freeman, "MagNet 5 User Guide", Infolytica, 1992.
 [7] 이동주, 이은웅, 김성현, 김성중, "리니어 펄스 모터에서 치형상과 기자력 불평형이 정추력 특성에 미치는 영향", 대한전기학회논문지, 49B권, 3호, pp.131-137, 2000.

저 자 소 개



이 동 주 (李東周)
 1973년 7월 31일생. 1996년 충남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1999년~현재 (주)이타아이 기술연구소 근무
 Tel : 031-760-1661
 E-mail : dave@eti21.com



이 은 응 (李殷雄)
 1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~83년, 85년~86년 캐나다 McGill 대학 방문교수. 1987~현재 당 학회 평의원. 1995년 당학회 편집위원장 및 전기기기연구회 간사장. 1997~2000 당학회 부회장 역임. 현재 충남대학교 전기공학과 교수. Tel:042-823-6426, E-mail:ewlee@cnu.ac.kr



김 성 현 (金成憲)
 1954년 9월 10일 생. 1981년 숭실대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 천안대학교 제어계측공학과 교수
 Tel : 041-550-0288
 E-mail : shkim@dragon.cntc.ac.kr



손 홍 관 (孫洪寬)
 1962년 3월 21일생. 1985년 충남대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1987년~현재 한국전기연구원 선임연구원.
 Tel : 055-280-1341
 E-mail : hksohn@keri.re.kr



김 성 중 (金成鍾)
 1973년 4월 9일생. 1999년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년~현재 (주)LG 근무. Tel : 017-404-3553
 E-mail : cronoss@lge.com