

리니어 펄스 모터의 치형상에 따른 수직력 및 진동특성 해석

김성종\*, 이은웅\*, 김성현\*\*, 이동주\*, 오영웅\*  
 충남대\* , 천안공대\*\*

**Analysis of Normal Force and Vibration Characteristics with Tooth Shapes in Linear Pulse Motor**

Sung-Jong Kim\*, Eun-Woong Lee\*, Sung-Hun Kim\*\*, Dong-Ju Lee\*, Young-Woong Oh\*  
 Chungnam National University\* , Chonan Technical College\*\*

**Abstract** - The normal force and vibration characteristic are affected by tooth shapes of linear pulse motor . In this paper , we obtained the normal force according to the position of mover and tooth shapes using the finite element analysis. From the result, we can find the vibration characteristics. Also we predict the characteristics of normal force and vibration.

여기서,  $\phi$  : 자속 [Wb] , P : 퍼어미언스 [H]

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리한 퍼어미언스에 의한 수직력  $F_y$  는 다음식과 같다.

$$F_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\phi^2}{P} \right) \frac{dP}{dy}$$

$$= \frac{1}{2 \times 9.8} F^2 \frac{dP}{dy} \text{ [kg} \cdot \text{f]} \quad (3)$$

1. 서 론

리니어 펄스 모터(LPM)는 개루프 제어에 의한 위치 제어가 가능한 직선형 모터로써 정밀한 위치 제어가 가능한 분야에 적합한 구동 장치이다.

LPM의 위치 정밀도를 높이기 위해서는 진동에 관한 상세한 해석이 필요한데 편축식의 경우 수직력이 추력에 비해 약 10배정도 크게 나타나므로 진행방향의 추력 변화에 의한 진동특성 뿐만 아니라 수직력의 변화에 따른 수직방향의 진동특성 까지도 해석이 이루어져야 한다.[1]

진행방향의 진동특성에 관한 연구는 LPM의 구동특성에 지배적인 영향을 미치는 퍼어미언스의 분포에 따른 정추력 특성에 관한 연구가 상당히 이루어져 있지만 수직력에 관한 연구는 미미하다.

따라서 본 논문에서는 LPM의 치형상의 모델을 선정하고 이 모델의 유한요소 해석을 통해서 치형상이 LPM의 수직력에 미치는 영향을 해석하여 앞으로 수직방향의 진동특성에 관한 연구의 기초로 삼고자 한다.

여기서, F ; 기자력 [AT]

위 식에서 알수 있듯이 수직력은 퍼어미언스의 변화량에 비례하게 된다. [1][2]

3 유한요소법에 의한 수직력 해석

3.1 해석 모델의 선정

유도자의 극피치와 치폭비가 약 42%로 하는 것이 퍼어미언스 변화를 최대로 하고 최대 토오크를 얻을 수 있는 조건이라는 연구가 Harris등에 의해 이루어져 있다.[3]

2. 수직력의 이론적 해석

2.1 수직력의 계산

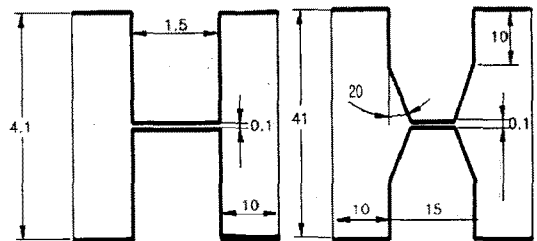
한 개의 치에 해당하는 수직력은 가상변위의 원리에 의해 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F_y = - \frac{1}{9.8} \frac{dW_s}{dy} \text{ [Kg} \cdot \text{f]} \quad (1)$$

여기서, y : 변위 [m] W<sub>s</sub> : 자기 저장 에너지 [J]

식(1)의 자기 저장 에너지는 다음 식(2)와 같다.

$$W_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\phi^2}{P} \text{ [J]} \quad (2)$$



(a) 각형치 (b) 사다리꼴치

그림 1 해석모델의 선정

따라서 그림1에서 보여지는 바와 같이 본 연구에서는 이러한 연구내용과 또한 실제 제작한 시작기와 비교를 위하여 치 피치를 3.5[mm] 로하고 치폭을 1.5[mm], 그리고 공극길이는 0.1[mm]로 하여 약 42.86%의 비를 사용하였다. 치형상은 시작기 LPM과 동일한 20° 각인 사다리꼴형과 일반적인 각형에 대해 적용하였다.

### 3.2 공극 퍼어미언스 분포

그림 2의 해석영역에서 전류원( $J=0$ )이 존재하지 않고 단지 자계  $H$ 만이 존재하므로 그 지배 방정식을 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

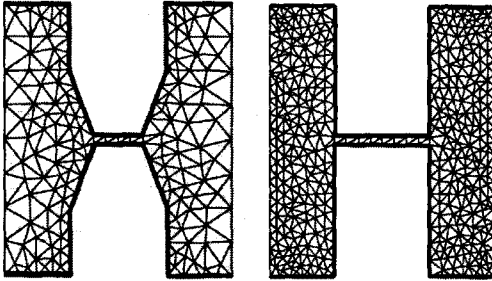


그림 2 해석영역 및 요소 분할도

$$\nabla \times H = 0 \quad (4)$$

$$H = -\nabla \Omega \quad (5)$$

여기서,  $\Omega$  : 자기 스칼라 포텐셜 함수

공극 전체에 분포하는 퍼어미언스 값이  $P$ , 공극에 인가되는 기자력이  $\mathcal{F}$ , 치의 두께가  $\ell$  이라면 이때 해석영역에 저장되는 자기 에너지  $W_s$ 는 식(6)으로 표현된다.

$$W_s = \frac{1}{2} P \mathcal{F}^2 = \int \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \ell dS \quad (6)$$

식(6)으로부터 단위길이당 ( $\ell = 1(m)$ )의 표준화된 퍼어미언스(normalized permeance)  $\bar{P}$ 는 식(7)와 같이 표현된다.[2][4]

$$\bar{P} = \frac{P}{\mu_0} = \frac{\int H^2 dS}{\mathcal{F}^2} \quad (7)$$

### 3.3 변위에 따른 유효공극길이 변화

유효공극길이의 변화를 알아내기 위해서 먼저 카터계수를 산정해야 한다. 우선 변위에 따른 퍼어미언스 값을 구하고 구해진 퍼어미언스 분포를 이용해 유효공극길이를 구할 수 있다.

공극에서의 퍼어미언스는 식(8)과 같이 표현된다.

$$P = \mu_0 \frac{A}{\ell} \quad [mH] \quad (8)$$

여기서,  $A$  : 자로의 단면적[mm<sup>2</sup>]

$\ell$  : 자로의 길이[mm]

단위 길이당 퍼어미언스는 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \mu_0 \frac{t_s}{g} \quad (9)$$

여기서,  $t_s$  : 치 피치[mm],  $g'$  : 유효공극거리[mm]

그리고 카터계수를 이용하여 유효공극길이  $g'$ 와 물리적인 공극길이  $g$ 의 관계를 나타내면 식(10)과 같다.

$$g' = K_c g \quad (10)$$

따라서, 카터계수를 식(11)과 같이 구할 수 있으므로  $t_s = 3.5mm$ ,  $g = 0.1mm$  이므로 해석모델의 경우 변위에 따른 퍼어미언스 값만 알면 카터계수를 구할 수 있다.

$$K_c = \frac{\mu_0 t_s}{P g} \quad (11)$$

식(11)로 구해진 카터계수를 이용해서 각 해석모델의 변위  $x$ 에 대한 유효공극 길이의 변화는 식(10)을 이용해서 구해낼 수 있다.[5]

### 3.4 수직력 분포

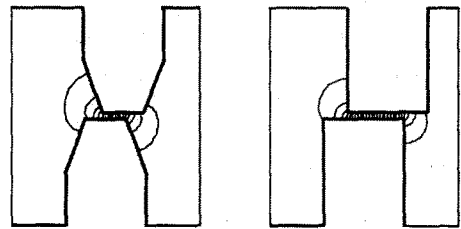
앞의 식(3)을 이용해 수직방향의 변위에 따른 공극 퍼어미언스의 변화를 구하면 수직력을 구할 수 있다.

먼저 유효공극 길이를 구하고 이에 따른 공극 퍼어미언스의 분포 곡선을 구한 다음 산출해낸 유효공극길이를 미분함으로써 수직방향의 즉, 유효공극길이 변화하는 방향의 수직력을 구할 수 있다.

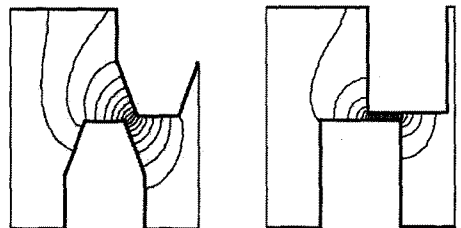
## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1 변위에 따른 자속분포

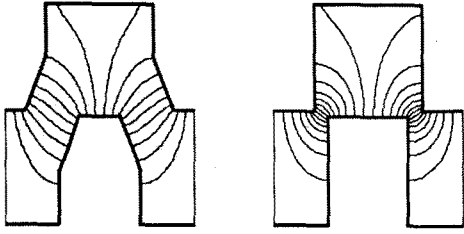
그림3은 두가지 모델의 치에 대해서 유한요소해석을 통해 얻은 자속 분포를 가동자와 고정자의 상대적인 변위  $x$ 에 따른 공극 자속분포로 나타낸 것이다.



(a)  $x = \frac{7}{8}$  (0.4375 (mm))



(b)  $x = \frac{7}{8}$  (1.09375(mm))



(c)  $x = \frac{\tau}{2}$  (1.75[mm])

그림 3 공극자속분포

4.2 변위에 따른 유효공극길이 분포

구해진 퍼미언스 분포를 이용해 유효공극길이를 구해서 큐빅 스플라인 보간법(Cubic spline interpolation)으로 보간하고 식(10)을 이용해 그래프를 그려보면 다음과 같다.

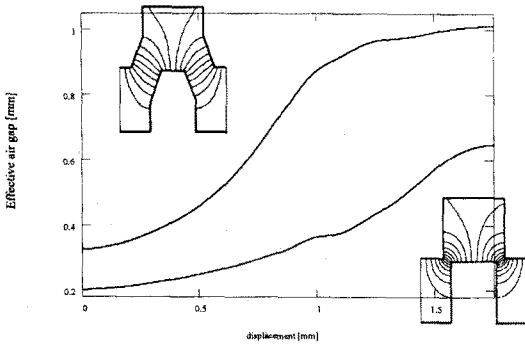


그림 4 변위에 따른 유효공극길이 분포

4.3 변위에 따른 수직력과 추력 분포

해석 결과를 토대로 추력과 유효공극 길이의 변화에 따른 퍼미언스의 변화로써 수직력을 계산했다.

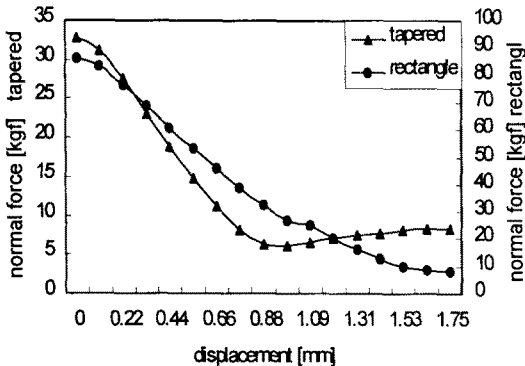


그림 5 가동자의 변위에 따른 수직력분포

그림 5에서 보여지는 바와 같이 각형치에 비해 사다리꼴의 치에서는 수직력이 약 24-38%로 감소하는 것을 뚜렷이 볼 수 있다.

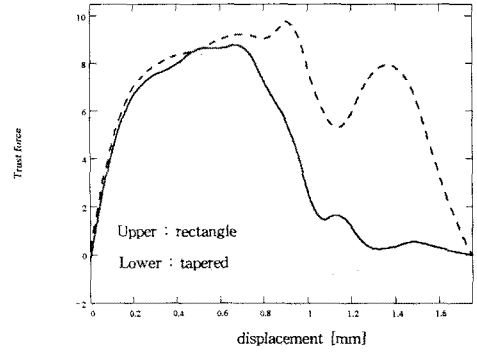


그림 6 변위에 따른 추력분포

또한 그림 6 으로부터 약 24-38%로 감소되어진 수직력을 갖는 사다리꼴의 치에서 추력은 거의 감소하지 않음을 알 수 있다. 따라서 수직력의 저감 방안으로 치를 사다리꼴로 하더라도 추력의 손실은 미미하다는걸 알 수 있어 편축식 LPM의 경우 이러한 장점을 충분히 이용할 수 있음을 알아냈다.

그림 5의 수직력분포 그래프로부터 사다리꼴의 수직력이 최소가 되는 부분은  $\tau/2$  지점이 아니고 약  $\tau/4$  지점이 되는 것을 볼 수 있고 각형은  $\tau/2$  지점에서 최소의 분포를 보임을 알 수 있었다.

두 그래프 모두 안정점 근방에서 최대의 수직력을 보임으로써 안정점 근처에서의 위치 정밀도가 우수하지만 사다리꼴이 각형에 비해 38% 정도의 적은 수직력을 보임으로써 실제로 제작시 위치 정밀도를 떨어뜨리지 않으면서도 지지기구에 부담을 주는 수직력을 저감할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본연구에서는 LPM의 치형상이 수직력에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 그 결과 편축식 LPM의 가장 큰 문제인 수직력 분포를 각형과 사다리꼴에 대해 언어낼 수 있었다.

실제로 그래프를 확대해 보면 사다리꼴치와 각형치 모두 수직력에 맥동성분을 포함하고 있는데 이것이 수직방향의 진동에 영향을 줄것으로 판단된다.

따라서, 추력의 맥동성분이 가동자의 진행방향으로의 진동을 일으키는 것처럼 수직력의 맥동성분이 또한 수직방향의 진동을 얼마만큼 일으킬 것인가 하는것에 대한 연구가 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김성현, 횡자속형 LPM의 정밀위치제어에 관한 연구, 박사학위 논문.
- [2] 이은용, 김일중 " 2상 8극형 HB형 리니어 펄스 모터(LPM)의 자속 분포와 정특성 해석 " 대한전기학회 학회 논문지 42권 9호, pp.9-18, 1993
- [3] Harris etc. Unifying approach to to-static torque of stepping-motor structures Proc. IEEE, Vol.124, No12, 1977
- [4] 이동주, " 리니어 펄스 모터(LPM)의 구동특성 해석 및 마이크로 스텝제어 "석사학위 논문, 1998
- [5] 이은용, 김성중 " 유한요소해석에 의한 리니어 펄스 모터의 카터계수 계산 " 대한전기학회 춘계합동학술발표회 논문지, pp.44-46, 1999