

## 2상 8극 HB형 LPM의 위치오차 해석

김성현<sup>°</sup>, 이은웅<sup>\*</sup>, 이동주<sup>\*</sup>  
<sup>°</sup>천안공업전문대, <sup>\*</sup>충남대

### Position Accuracy Error Analysis in 2 Phase 8 Pole HB Type LPM

Kim, Sung-Hun<sup>°</sup>, Lee, Eun-Woong<sup>\*</sup>, Lee, Dong-Ju<sup>\*</sup>  
 Cheonan Technical College, Chungnam National University<sup>\*</sup>

#### Abstract

As the LPM is used for position accuracy decision device it is required that both the reason of position error and the definition of position itself should be cleared. In this study, the precision of the position decision of LPM is affected by the geometrical shape such as tooth shape or processing accuracy. By using the analysis of magnetic circuit, we calculated the permeance come up with the gap. Once the thrust force has been obtained, the permeance due to the mechanical error of the pole pitch and the tooth pitch becomes the error of thrust force. We confirmed as well that it is being affected by the difference due to the variation of the airgap permeance.

#### I. 서 론

2상 8극 HB형 리니어 펄스 모터(Linear Pulse Motor ; LPM)는 개푸프 제어로 높은 위치결정기능을 가지고 있기 때문에 외력이 없는한 정지위치는 추력특성에 의해 결정된다. LPM의 추력은 가동자와 고정자의 상대적인 위치에 따라 분포하는 공극의 퍼미언스 변화로 발생하므로 치형상에 따른 자속분포를 이용하여 추력 특성을 구하는데에는 자기회로 해석법인 퍼미언스 모델법이 유용한 수단이 된다. HB형 시작 LPM은 2상 8극형이면서 같은 여자권선에 의해서 앞뒤의 극이 동시에 여자되며 영구자석의 자로를 자속 횡방향형(Transverse Flux Machine)으로 하였기 때문에 2상 4극 LPM의 자기 등가 회로로부터 추력특성을 구할 수 있다.<sup>[1]</sup>

LPM은 정밀위치 결정장치에 사용되기 때문에 위치 오차의 요인과 오차에 대한 정의를 명확하게 할 필요가 있다.<sup>[2]</sup>

LPM의 위치결정 정도가 치 형상이나 가공정도 등의 기하학적 형상에 영향을 받게 되므로 본 연구에서는 자기회로 해석법에 의해 공극에 미치는 퍼미언스를 계산하였다. 공극에서의 위치에 따른 퍼미언스로부터 각 자극에서 발생하는 추력을 구할 수 있으므로 극피치와 치피치의 기계적 오차에 의한 퍼미언스는 추력의 오차가 된

다. 또한 공극 퍼미언스의 변동분 차에 의해서도 영향을 받고 있는 것을 확인하고자 한다. 그리고 LPM의 위치결정 정도와 치부의 형상이나 가공정도 등의 기하학적 형상에 영향을 받게 되는 이론식을 도출하고자 한다.

#### II. LPM의 자기등가회로

그림 1은 시작기 LPM의 모델이다. 공극에서의 퍼미언스를 계산하기 위한 모델을 나타내고 있다. 앞뒤 가동자 철심F, R는 각각 1/4피치 어긋난 4개씩의 극(가동자 F : F<sub>A</sub>, F<sub>B</sub>, F<sub>A</sub><sup>-</sup>, F<sub>B</sub><sup>-</sup>, 가동자 R : R<sub>A</sub>, R<sub>B</sub>, R<sub>A</sub><sup>-</sup>, R<sub>B</sub><sup>-</sup>)을 가지며 각 극은 치 피치가 3.5[mm]인 4개의 치를 가지고 있다. 여자권선은 극F<sub>A</sub>-R<sub>A</sub>, 극F<sub>B</sub>-R<sub>B</sub>, 극F<sub>A</sub><sup>-</sup>-R<sub>A</sub><sup>-</sup>,

극F<sub>B</sub><sup>-</sup>-R<sub>B</sub><sup>-</sup>에 1개씩 모두 4개의 형권코일 a, b, c, d가 감겨져 있다. 코일 a와 c가 A상 권선이고 b와 d가 B상 권선이다.<sup>[1]</sup>

식(1)은 앞 철심(Front Core)에서의 각 자극의 퍼미언스를 나타낸 것이다.

$$P_B = P_{0B} + P_{1B} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} (x - \frac{\tau}{4}) \quad (1a)$$

$$P_A = P_{0A} + P_{1A} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (1b)$$

$$P_{\bar{A}} = P_{0\bar{A}} + P_{1\bar{A}} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) \quad (1c)$$

$$P_{\bar{B}} = P_{0\bar{B}} + P_{1\bar{B}} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4}\tau\right) \quad (1d)$$

마찬가지로 뒤 철심(Back Core)에서의 각 자극의 퍼미언스는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$P_{A'} = P_{0A'} + P_{1A'} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) \quad (2a)$$

$$P_{B'} = P_{0B'} + P_{1B'} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4}\tau\right) \quad (2b)$$

$$P_{\bar{A}'} = P_{0\bar{A}'} + P_{1\bar{A}'} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} (x - \tau) \quad (2c)$$

$$P_{\bar{B}'} = P_{0\bar{B}'} + P_{1\bar{B}'} \cdot \cos \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{5}{4}\tau\right) \quad (2d)$$

여기서,  $P_{0k}$  는 퍼어미언스의 직류성분  
 $P_{1k}$  는 퍼어미언스의 맥동성분  
 $(k = A, B, \bar{A}, \bar{B}, A', B', \bar{A}', \bar{B}')$   
 $\tau$  는 극간격(Pole pitch)

식(1), (2)의 각 극에 퍼미언스와 기자력 관계를 그림 2에서 등가회로로 나타냈다.

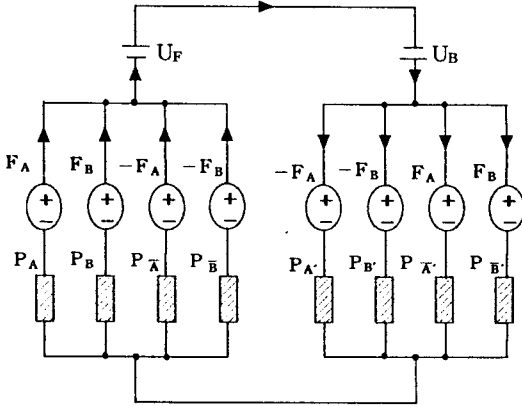


그림 2. LPM의 등가회로

여기서  $U_F$  : Front core의 영구자석에 의한 기자력  
 $U_B$  : Back core의 영구자석에 의한 기자력  
 $F_A$  :  $N_A \cdot i_A$  :  $i_A$ 에 의한 기자력  
 $F_B$  :  $N_B \cdot i_B$  :  $i_B$ 에 의한 기자력

자기 수반에너지(magnetic co-energy)는 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_c(x) = \frac{1}{2} F^2 \cdot P(x) \quad (3)$$

그리고, 정추력은 식(4)와 같이 된다.

$$F(x) = + \frac{dW_c(x)}{dx} = \frac{1}{2} F^2 \cdot \frac{dP(x)}{dx} \quad (4)$$

가동자의 앞 철심(Front Core)의 각극에 걸리는 추력은 식(5)와 같이 된다.

$$F_A(x) = \frac{1}{2} (U_F + F_A)^2 \cdot \frac{dP_A(x)}{dx} \\ = - \frac{P_{1A} \cdot \pi}{\tau} (U_F + F_A)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad (5a)$$

$$F_B(x) = - \frac{P_{1B} \cdot \pi}{\tau} (U_F + F_B)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{4}\right) \quad (5b)$$

$$F_{\bar{A}}(x) = - \frac{P_{1\bar{A}} \cdot \pi}{\tau} (U_F - F_A)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) \quad (5c)$$

$$F_{\bar{B}}(x) = - \frac{P_{1\bar{B}} \cdot \pi}{\tau} (U_F - F_B)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4}\tau\right) \quad (5d)$$

또, 가동자의 뒤 철심(Back Core)의 각극에 걸리는 추력은 식(6)과 같이 된다.

$$F_{A'}(x) = - \frac{P_{1A'} \cdot \pi}{\tau} (U_B - F_A)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{\tau}{2}\right) \quad (6a)$$

$$F_{B'}(x) = - \frac{P_{1B'} \cdot \pi}{\tau} (U_B - F_B)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{3}{4}\tau\right) \quad (6b)$$

$$F_{\bar{A}'}(x) = - \frac{P_{1\bar{A}'} \cdot \pi}{\tau} (U_B + F_A)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} (x - \tau) \quad (6c)$$

$$F_{\bar{B}'}(x) = - \frac{P_{1\bar{B}'} \cdot \pi}{\tau} (U_B + F_B)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{\tau} \left(x - \frac{5}{4}\tau\right) \quad (6d)$$

식(5)와 (6)에서 합성추력은 식(7)과 같이 얻어진다.

$$F_1(x) = F_A(x) + F_{A'}(x) + F_B(x) + F_{B'}(x) \\ + F_{\bar{A}}(x) + F_{\bar{A}'}(x) + F_{\bar{B}}(x) + F_{\bar{B}'}(x) \quad (7)$$

가동자의 극 A-A'에 a권선, 극 B-B'에 b권선, 극  $\bar{A}$ - $\bar{A}'$ 에 c권선, 극  $\bar{B}$ - $\bar{B}'$ 에 d권선의 형권코일은 각각 같고 a, c코일은 A상에 b, d코일은 B상에 연결했을때 각 코일군의 추력은 식(8)과 같다.

$$F_1(x) = F_A(x) + F_{A'}(x) \quad (8a)$$

$$F_2(x) = F_B(x) + F_{B'}(x) \quad (8b)$$

$$F_3(x) = F_{\bar{A}}(x) + F_{\bar{A}'}(x) \quad (8c)$$

$$F_4(x) = F_{\bar{B}}(x) + F_{\bar{B}'}(x) \quad (8d)$$

그리고 총 합성추력은 식(9)과 같이 나타낼 수 있으므로 2상 8극형 LPM을 2상 4극형 LPM의 자기등가회로로 구성하여 여자방식에 따른 토오효를 구할 수 있고 각 극에서 발생하는 위치결정 오차를 구할 수 있다.

$$F(x) = F_1(x) + F_2(x) + F_3(x) + F_4(x) \quad (9)$$

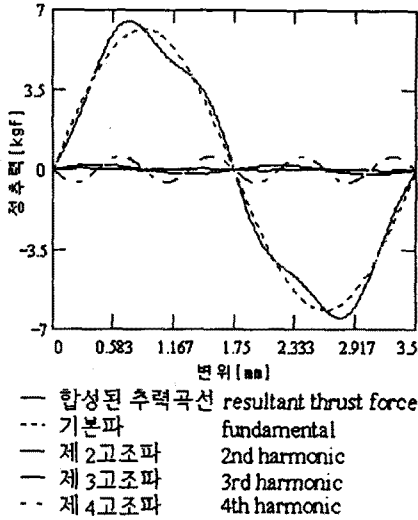


그림 3. LPM의 추력곡선

### III. 위치결정 오차 해석

일반적으로 LPM의 자기회로에서 일어나는 전자력은 자기에너지의 구배로 일어난다. 자유도가 x 방향으로만 규제되어 있는 LPM의 추력은 자기회로가 선형이라고 가정하면 식(10)과 같다.<sup>[2]</sup>

$$f = \frac{dW_c(x)}{dx} = \frac{1}{2} (Ni)^2 \frac{d}{dx} P(x) \quad (10)$$

그림 2의 LPM 등가회로에서 공극부의 퍼미언스는 변위 x의 함수로서 정현적으로 변하며 가공·조립 등에 의한 자극의 기하학적 위치를 고려하면 자극 k에 의한 공극부의 퍼미언스  $P_k$ 는 식(11)과 같이 된다.

$P_{0k}$ ,  $P_{1k}$ 는 공극길이나 치폭 등의 파라미터에 의존하는 정수이고,  $\theta_k$ 는 1차축의 자극상호의 피치 오차와 2차축의 치의 누적 피치 오차에 의해 발생한다.

$$P_1 = P_{01} + P_{11} \cos \frac{2\pi}{r} x \quad (11a)$$

$$P_2 = P_{02} + P_{12} \cos \left( \frac{2\pi}{r} x - \frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \quad (11b)$$

$$P_3 = P_{03} + P_{13} \cos \left( \frac{2\pi}{r} x - \pi - \theta_3 \right) \quad (11c)$$

$$P_4 = P_{04} + P_{14} \cos \left( \frac{2\pi}{r} x - \frac{3}{2} \pi - \theta_4 \right) \quad (11d)$$

철심의 자기저항은 공극부에 비교하여 매우 작으므로 2상 4극형의 LPM의 간략화한 자기등가회로는 영구자석에 의한 기자력  $F_m$ 과 권선전류에 의한 기자력  $Ni$ 는 모두 공극부에서만 소비된다. 이러한 가정에 기초해서 A상에서 발생하는 추력은 식(12a)와 같다.

$$f_1(i_1, x) = \frac{1}{2} (F_m + Ni_1)^2 \frac{dP_1(x)}{dx} \quad (12a)$$

$$= -\frac{P_{11}\pi}{r} (F_m + Ni_1)^2 \sin \left( \frac{2\pi}{r} x \right)$$

B상,  $\bar{A}$ 상,  $\bar{B}$ 상에 대한 추력도 같은 방법으로 구해진다.

$$f_2(i_2, x) = -\frac{P_{12}\pi}{r} (F_m + Ni_2)^2 \sin \left( \frac{2\pi}{r} x - \frac{\pi}{2} - \theta_2 \right) \quad (12b)$$

$$f_3(i_1, x) = -\frac{P_{13}\pi}{r} (F_m - Ni_1)^2 \sin \left( \frac{2\pi}{r} x - \pi - \theta_3 \right) \quad (12c)$$

$$f_4(i_2, x) = -\frac{P_{14}\pi}{r} (F_m - Ni_2)^2 \sin \left( \frac{2\pi}{r} x - \frac{3}{2} \pi - \theta_4 \right) \quad (12d)$$

여기서,

$f_k$ : 자극k에 발생하는 추력

$i_1, i_2$ : A, B상 권선에 흐르는전류

$N$ : 권회수,  $F_m$ : 영구자석의 동작점에서의 기자력

LPM의 전체추력은 각 자극에 발생하는 추력의 합이기 때문에, 각 상에 각각  $I_1, I_2$ 를 인가한 경우 합성추력  $F$ 는 식(13)과 같다.

$$F = f_1(I_1, x) + f_2(I_2, x) + f_3(I_1, x) + f_4(I_2, x) \quad (13)$$

추력식(13)을 이용하여 정지 위치를 구한다. 여기서는 간단히 1상여자에 한정해서 해석한다. 예를 들면, 제1상 여자에 대한 추력은 식(13)에서  $I_1 = I, I_2 = 0$ 로 놓으면 구해진다. 여기서, 권선전류에 의한 기자력을 영구자석에 의한 기자력과 같게 한다. 즉,  $Ni = F_m$ 의 관계가 성립하도록 권선전류를 결정한다. 극피치와 치피치의 기계적 오차에 의한 퍼미언스 오차  $\theta_k$ 는 추력의 오차  $\epsilon_k$ 를 발생시킨다. 따라서 A, B,  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ 의 추력은 일반식(14)와 같이  $F_k$ 로 나타낼 수 있다. A상 여자시 추력은 식(14)과 같다.

$$F_k = -F_{ok} \sin \frac{2\pi}{r} \left( x - \frac{r}{4}(k-1) - \varepsilon_k \right) \quad (14)$$

여기서,  $F_{ok}$  는 1상 여자에 의한 정추력 값이고, 제 k상을 여자시킨 경우, 위치오차  $\varepsilon_k$ 는 식(15)와 같이 된다.

$$\varepsilon_1 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{12} - P_{14}}{4P_{11} - (P_{12}\theta_2 - P_{14}\theta_4)} \quad (15a)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{12}\theta_2 - (P_{13} - P_{11})}{4P_{12} - P_{13}\theta_3} \quad (15b)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{13}\theta_3 + (P_{14} - P_{12})}{4P_{13} - (P_{14}\theta_4 - P_{12}\theta_2)} \quad (15c)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{4P_{14}\theta_4 + (P_{11} - P_{13})}{4P_{14} + P_{13}\theta_3} \quad (15d)$$

외력이 없는 경우 위치결정 안정점은 식(14)에 있어서  $F_k = 0$ , 또는  $dF_k/dx < 0$ 의 조건을 만족하는 점이 된다. 그러므로 제 k상 여자의 안정점은 식(16)과 같다.

$$x_k = \frac{r}{2}(k-1) + \varepsilon_k \quad (16)$$

### 1. 자극간 pitch 오차의 영향

공극길이, 치수법이 각 자극과도 같고,  $P_{11} = P_{12} = P_{13} = P_{14}$  이 되면 식(14)는 근사적으로 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_1 = 0, \quad \varepsilon_2 = \frac{r}{2\pi} \theta_2, \quad \varepsilon_3 = \frac{r}{2\pi} \theta_3, \quad \varepsilon_4 = \frac{r}{2\pi} \theta_4 \quad (17)$$

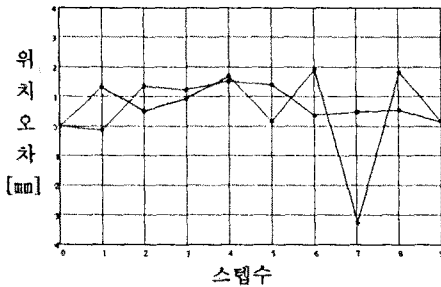


그림 4. 자극간 피치오차의 위치결정 정도

식(17)은 자극간 pitch 오차가 그대로 위치결정 오차가 되는 것을 나타내고 있다. 자극간 pitch 오차는 1차측만이 아니라 scale치의 누적 pitch오차에도 영향을 미친다.

### 2. 공극 permeance의 불균형의 영향

자극간 pitch오차가 전혀 없는 경우 각 상에서 위치에 대한 오차는 식(18)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\varepsilon_1 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{12} - P_{14}}{4P_{11}} \quad (18a)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{13} - P_{11}}{4P_{12}} \quad (18b)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{14} - P_{12}}{4P_{13}} \quad (18c)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{r}{2\pi} \tan^{-1} \frac{P_{11} - P_{13}}{4P_{14}} \quad (18d)$$

이 식(18)에서 어떤 자극 위치 결정 정도는 그 자극과  $\pi/2$  및  $3\pi/2$ 의 관계에 있는 자극의 공극 permeance 변동분의 차에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 1차측과 2차측의 치의 위상에 대응해서 공극부의 퍼미언스를 계산한 결과이다. 사각형 치를  $20^\circ$ 의 경사각으로 테이퍼(taper)한 사다리꼴(wedge head)치의 자극의 퍼미언스변화이다.

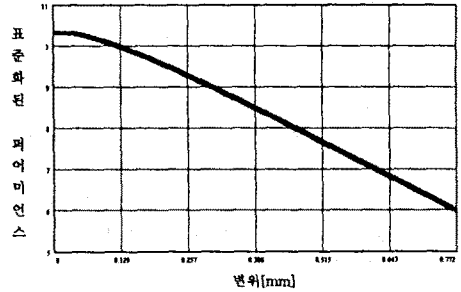


그림 5. 공극퍼미언스의 변화

## IV. 결 론

LPM의 위치 정도의 오차를 명확하게 하기 위하여 위치 결정 정도에 관한 오차의 요인에 따른 이론식을 유도하였다. 오차에 대한 정의와 측정기술의 표준화를 위한 해석적 도대가 마련되므로 사용자가 LPM의 사양설계로부터 위치정도 오차를 선택하기 위한 기준을 얻을 수 있을 것으로 보인다.

### [참고문헌]

- [1] 김성현, 이은용, "2상 8극 HB형 LPM의 마이크로 스텝 구동에 의한 추력특성 개선", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1997. 7
- [2] Toshiki MARUYAMA, Hiroshi NAKAGAWA, Minoru MAEDA, Mitsuji KARITA, "A Study for Position Accuracy of LPM," MAG-86-124.