

磁氣 隋伴에너지를 이용한 Hybrid형 LPM의 定推力 計算

이재봉**, 조운현*, 신판석**

* 한국 전기연구소 전력기기연구실 ** 홍익 대학교 전기공학과

The static thrust calculation of a Hybrid-type LPM calculated by the Coenergy Method

Jae-bong Lee*, Yun-hyun Cho*, Pan-seok Shin**

* Korea Electrotechnology Research Institute ** Hong-ik University

ABSTRACT

This paper presents the static thrust of a hybrid-type LPM by coenergy method. First, the nonlinearities of the permanent magnet, the primary core and the secondary are interpolated by the cubic spline method. Then the equivalent magnetic circuit including airgap reluctance, which is a function of displacement, modelled by the permeance method is obtained. From the derivative of coenergy with displacement computed by Newton Raphson method, the static thrust is calculated at each displacement with certain exciting current.

1. 서론

선형 펄스전동기(LPM)는 회전형 펄스전동기와 같이 개루프 제어를 할수 있으며 디지털 제어회로와 결합하여 여자 권선에 입력 펄스를 가하면 직접 직선 왕복운동의 구현으로 전 위치 제어가 가능하다. 최근에 OA기기, FA기기등 직선운동이 요구 되는 분야에 경량 박형화 구조의 액츄에이터로서의 LPM의 응용이 활발히 연구되고 있다[1][2].

LPM의 특성해석 방법으로는 공극 자기저항을 Permeance법으로 근사화한 등가회로법 및 유한 요소법이 있다. 먼저 유한요소법으로 LPM을 해석할 경우를 생각해 보면 LPM의 특징인 미소공극으로 인해 요소분할의 어려움과 해석 시간의 과다라는 단점이 있어 초기 설계 및 해석 단계에서의 그 적용은 비효율적이다. 반면에 등가회로법을 이용한 경우 그 정확도만 만족 된다면 해석시간의 단축이라는 점에서 매우 효과적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 근사등가회로법 해석시에 재질의 자기적 특성을 선형 근사하여 해석함으로써 인한 정확도 문제를 보완하여 자기적 비선형성을 고려해 Coenergy로 부터 정 추력을 계산하는 방법을 제안하였으며 영구자석형 양측식 LPM의 정추력 해석에 적용하였다.

2. 기본 구조와 자기 회로

해석에 적용한 Hybrid형 양측식 LPM의 구조는 그림 1.과 같고 그 설계 data는 표1.에 제시하였다.

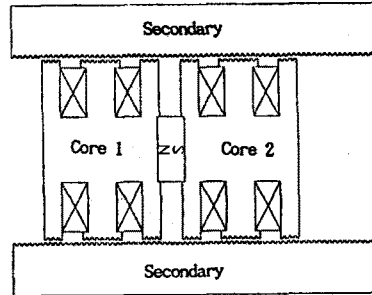


그림 1. 영구자석형 양측식 LPM의 구조

Fig. 1. Configuration of Hybrid-type double side LPM

표 1. 적용 LPM의 설계 data

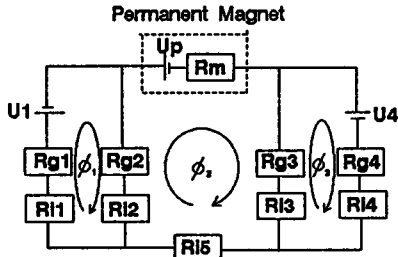
Table 1. The design data of a LPM

```

*****
* THE DATA OF A HYBRID-TYPE DOUBLE SIDE LPM *
*****
TOOTH WIDTH OF PRIMARY POLE      = 1.00000 mm
SLOT WIDTH OF PRIMARY POLE        = 1.00000 mm
SLOT DEPTH OF PRIMARY POLE        = 1.00000 mm
WIDTH OF PRIMARY                   = 69.00000 mm
Z-THICKNESS OF PRIMARY             = 50.00000 mm
Z-THICKNESS OF SECONDARY          = 50.00000 mm
THE HEIGHT OF SECONDARY           = 20.00000 mm
THE POLE HEIGHT OF PRIMARY        = 22.00000 mm
NUMBER OF TOOTH IN PRIMARY POLE   = 8
PERMANENT MAGNET LENGTH           = 10.50000 mm
PERMANENT MAGNET WIDTH             = 25.00000 mm
PERMANENT MAGNET THICKNESS        = 50.00000 mm
POLE PITCH OF PRIMARY             = 22.50000 mm
TOOTH WIDTH OF SECONDARY          = 1.00000 mm
SLOT WIDTH OF SECONDARY           = 1.00000 mm
SLOT DEPTH OF SECONDARY           = 1.00000 mm
NUMBER OF TURN                     = 200 [turn]
    
```

1차측 코어의 재질은 규소강판(PN23), 2차측 재질은 순철로 보고 그 B-H data를 사용하였으며, 영구자석은 회로류계의 NdFeB의 감자곡선을 이용하였다.

그림 1의 양축식 LPM에 대하여 주자속은 이동자의 영구자석과 양쪽 규소강판의 중심으로 통과한다고 가정하고 상하의 대칭성을 고려하여 1/2만 자기 등가 회로로 나타내면 그림 2와 같다.



U1, U2, U3, U4 : magnetomotive forces by input power
 Up : magnetomotive force by permanent magnet
 Rg1, Rg2, Rg3, Rg4 : airgap reluctance in each pole

그림 2. LPM의 자기 등가 회로
 Fig. 2. Equivalent magnetic circuit of a LPM

그림 2에서 \$U_1, U_4\$는 전원에서의 기자력이고, \$U_p\$는 영구자석에 의한 기자력이다. 또한, \$R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4}\$는 각 극에서의 공극 자기저항이고 \$R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}, R_{i5}\$는 코어 각 자로에서의 자기저항을 나타내며, \$R_m\$은 영구자석의 내부 자기저항을 표시하고 있다.

철실부의 자기저항 \$R_{ik}(k=1,2,\dots,5)\$은 식 (1)로 표시되며, 공극 자기저항은 그림 3과 같은 Permeance 법을 사용해 이동 방향 변위의 함수로서 표현된다. [3]

$$R_{ik} = \frac{l_{ik}}{\mu_k S_k} \quad (k=1, 2, \dots, 5) \quad (1)$$

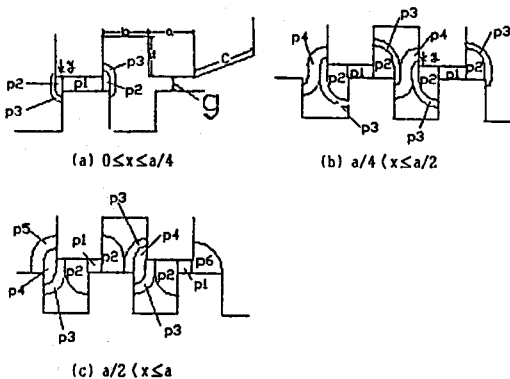


그림 3. 공극의 퍼미언스 모델
 Fig. 3. The permeance model of airgap

그림 3의 퍼미언스 모델에 의해 근사화된 각 극의 변위에 따른 공극 자기저항의 변화는 그림 4에 나타내었다.

THE AIRGAP RELUCTANCE IN EACH POLE (gap=0.2[mm], tau=2[mm])

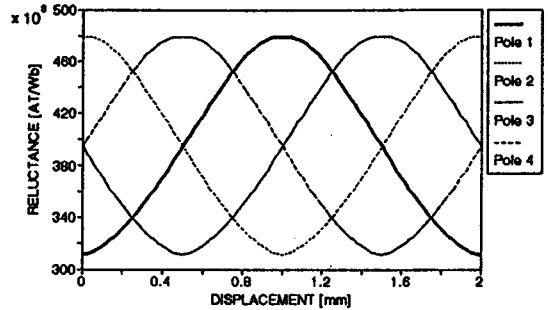


그림 4. 퍼미언스법으로 근사화된 공극 자기저항
 Fig. 4. The airgap reluctance modelled by Permeance Method

3. Coenergy법에 의한 추력 계산

3.1 자기에너지와 coenergy

그림 1의 양축식 LPM과 같이 전기적 입력에너지를 기계적 에너지로 변환하여 동력을 얻는 계에서 손실이 없다고 가정하면 coenergy의 개념을 도입하여 추력을 계산할 수 있다.

자성체는 일반적으로 전기적 입력 기자력 \$Ni\$와 자속 \$\phi\$의 관계는 자기회로의 성질에 의하여 일반적으로 그림 5와 같이 비선형성을 가진다.

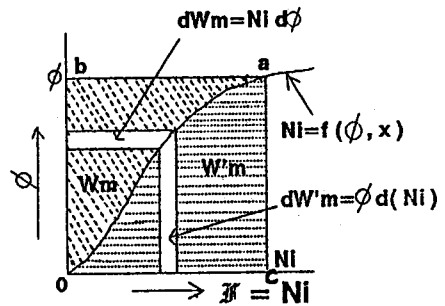


그림 5. 자기 에너지와 자기 수반에너지
 Fig. 5. Magnetic Energy and Magnetic Coenergy

그림 5에서 면적 oab는 자기에너지 \$W_m\$를, 면적 oac는 자기 수반에너지 \$W'_m\$를 나타내며, 이로부터 힘을 구하면 (2)식과 같다[4].

$$f_x = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial x} \quad (2)$$

3.2 Newton Raphson 법을 이용한 추력의 계산

그림 2의 자기 동기회로에 대한 등가 방정식을 구하면 다음 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{e1} + R_{l1})\phi_1 + (R_{e2} + R_{l2})(\phi_1 - \phi_2) + U_1 \\
 f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{e2} + R_{l2})(\phi_2 - \phi_1) + (R_{e3} + R_{l3})(\phi_2 - \phi_3) \\
 &\quad + (R_{l5} + R_e)\phi_2 + U_p \\
 f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) &= (R_{e3} + R_{l3})(\phi_3 - \phi_2) + (R_{e4} + R_{l4})\phi_3 + U_4
 \end{aligned} \quad (3)$$

위의 비선형 방정식의 해를 구하기 위해서는 본 연구에서는 Newton-Raphson 법을 사용하였으며 LPM 특성해석 프로그램의 흐름도는 그림 6.과 같다.

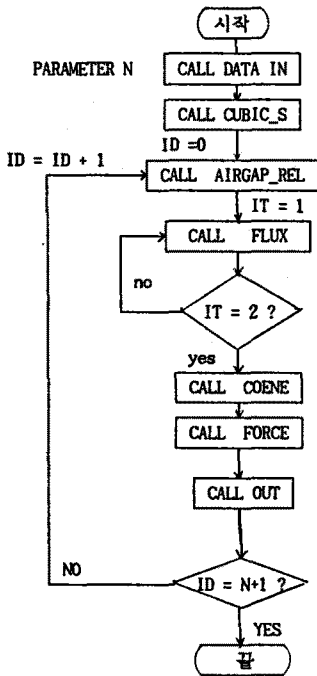


그림 6. LPM 특성 해석 Main 프로그램 흐름도
Fig. 6. The main flow chart of the analysis

서브루틴 FLUX의 상세 흐름도는 그림 7.과 같다.

그림 7. 에서 $d\phi$ 는 식(4)이고 이때 $\frac{\partial f_i}{\partial \phi_k} (i, k = 1, 2, 3)$ 는 식(5)로부터 계산한다.

$$d\phi = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \phi_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \phi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \phi_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \\ f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \phi_k} = - \frac{\partial f_i}{\partial \nu_j} \frac{\partial \nu_j}{\partial \phi_k} \quad (i, k = 1, 2, 3) \quad (5)$$

여기서, ν_j 는 각 자로의 자기저항률

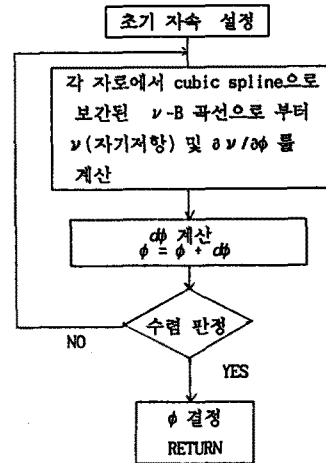


그림 7. 자속 계산 흐름도
Fig. 7. Flow chart of FLUX

위의 알고리즘을 각 변위마다 반복 수행하고 수렴된 최고 자속으로부터 자기 수반에너지를 구한 다음 그 변위 X 에 대한 편미분을 취하여 정추력을 계산한다.

4. 특성 고찰

그림 8.은 1상 여자시 공극이 0.2 mm일 때 권선당 전류가 1[A]인 경우와 2[A]인 경우 및 전류가 1[A]일 때 공극이 0.1 mm 인 경우의 정추력특성을 나타내며 2상 여자시는 공극 0.2 mm, 전류 1[A]인 경우의 특성을 나타내었다. 2상 여자시에는 1상 여자의 안정점을 기준으로 $\tau/8$ 만큼 왼쪽으로 안정점이 이동되었음을 알 수 있다.

The Static Thrust of Double Side LPM (Hybrid Type, $\tau = 2$ (mm))

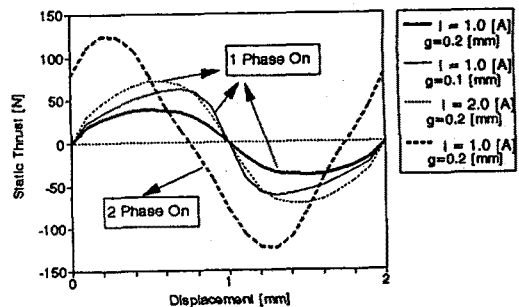


그림 8. Hybrid형 양측식 LPM의 정추력
Fig. 8. The static thrust of Hybrid-type Double side LPM

그림 9.는 1상 여자시 공극이 0.2 mm일 때 권선 당 여자 전류가 증가할 경우의 정추력을 나타내고 있다. 그림9.에서 전류가 증가할 경우 그림 10.에 나타난 바와 같이 최대 정추력의 포화현상을 볼수있다.

The Static Thrust of Double Side LPM
(Hybrid Type, tau = 2 [mm])

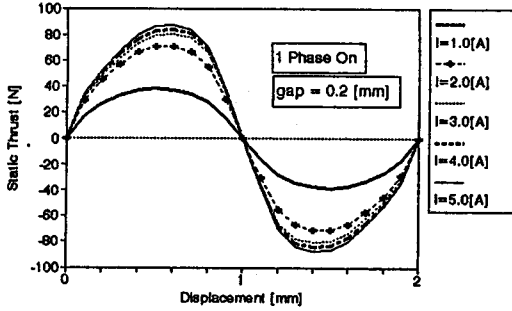


그림 9. 전류 증가와 정추력의 변화(1상 여자시)
Fig. 9. The static thrust with the increased exciting current(1 Phase On)

The Static Thrust of Double Side LPM
(Hybrid Type)

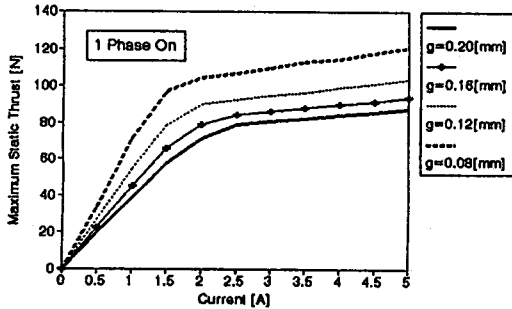


그림 10. 최대 정추력의 포화(1상 여자)
Fig. 10. The saturation of the maximum static thrust(1 Phase On)

The Static Thrust of Double Side LPM
(Hybrid Type, tau = 2 [mm])

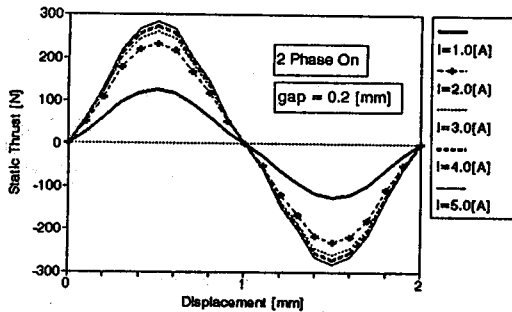


그림 11. 전류 증가와 정추력의 변화(2상 여자시)
Fig. 11. The static thrust with the increased exciting current(2 Phase On)

그림 11.은 공극이 0.2 mm일때 2상 여자시 전류증가에 따른 정추력의 변화를 나타낸다.이 경우도 1상 여자의 경우와 마찬가지로 최대 정추력의 포화 현상을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 영구자석을 포함한 LPM의 정특성 해석에 자기 수반에너지를 이용한 비선형 해석을 제안하고 그로부터 전류 및 공극 변화에 따른 정추력의 포화 및 변화추이를 살펴보았다. 해석 수행시 요구되는 시간은 유한 요소법에 비해 대단히 단축되었으며 이에 따라 다양한 시뮬레이션이 가능하게 되었다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 이용한다면 인덕턴스 계산도 가능하리라 생각되며, 초기설계 단계에 적용한다면 효율적 연구가 가능하리라 생각된다.

참고 문헌

- [1] Takashi Kenjo, Stepping motors and their microprocessor controls, CLARENDON PRESS, 1984
- [2] Syed A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1987
- [3] 山本 行 雄, 山田 一, "平板狀 리ニア리스모터의磁氣回路と推力解析", Mag-83-12, JEEE Report (In Japanese)
- [4] S.A. NASAR, "ELECTROMAGNETIC ENERGY CONVERSION DEVICES AND SYSTEMS", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970