

선형 영구자석 기기의 오버행에 따른 특성해석

구민모\*, 최장영\*, 신현재\*, 홍기용\*\*  
 \*충남대학교, \*\*선박해양플랜트연구소

Characteristic Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Machine according to PM Overhang

Min-Mo Koo\*, Jang-Young Choi\*, Hyeon-Jae Shin\*, Keyyong Hong\*\*  
 \*Chungnam National University, \*\*KRISO

**Abstract** - For the design of a permanent magnet linear synchronous machine with slotless stator structure, this paper addresses a three-dimensional (3D) analytical approach for consideration of end effects. In contrast, analytical method can derive solutions in substantially shorter times with high reliability. Therefore, we derive accurate analytical solutions to dramatically reduce the time need for analysis. In addition, we performed characteristic analysis of permanent magnet linear synchronous machine (PMSLM) according to PM overhang length.

1. 서 론

영구자석을 사용하는 선형 기기들은 추력과 고정자 정류사이의 선형적 관계, 고추력, 소형 및 경량화로 높은 성능과 가변속 운전에 매우 적합하다. 최근 다양한 재질 개발과 설계 기술법으로 인하여 선형 영구자석 기기는 회전기와 달리 정밀성이 높고 고추력을 요구하는 특수한 응용분야에 많이 사용되고 있다. 특히 직선 운동을 변환할 경우 사용되는 기어, 볼스크류 등을 사용하지 않아 기계적인 손실을 줄일 수 있는 장점이 많아 과력발전과 같은 상하운동으로 발전하는 시스템에 접목하는 기술 연구가 활발히 진행 중이다 [1].

선형 기기는 회전형 기기와 비교하여 기계적 공극의 길이가 다소 크다. 또한 고정밀 시스템에 사용되는 경우가 많아 추력의 리플을 줄이는 기술이 설계 방법에 매우 중요한 요소가 된다. 특히 추력 리플에 영향이 매우 큰 디텐트력 성분을 제거하기 위해서 고정자의 스킴, 자석의 형상 변경, 고정자 슬롯 구조 설계 등의 다양한 방법이 적용되고 있다. 본 논문에서는 디텐트력의 영향을 제거하기 위하여 고정자 슬롯 구조를 슬롯리스 형태로 설계 되었다 [1].

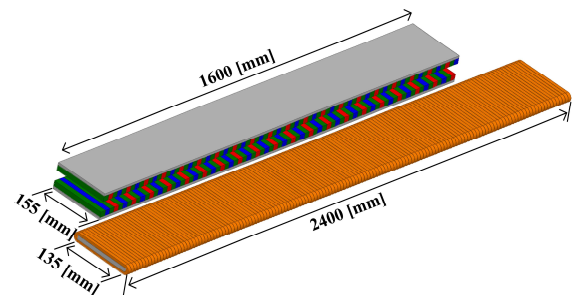
슬롯리스 고정자 구조는 공극에서의 자기에너지의 균일한 구조로 디텐트력의 영향을 최소화할 수 있다. 하지만 자기적 공극의 길이가 슬롯 타입 고정자 구조와 비교하여 다소 크게 설계되어진다. 따라서 직선형 기기의 적층방향으로의 엔드부에서 프린징과 누설 자속등의 다양한 영향이 발생하게 된다. 따라서 이러한 엔드부에서의 영향을 고려한 해석이 필수적이다. 엔드부의 영향을 고려하기 위해서는 3차원 해석방법을 도입해야한다. 본 논문에서는 엔드부에서의 영향을 고려하기 위한 방법으로 3차원 해석적 방법을 도입하였다. 또한 엔드부의 프린징과 누설로 인한 출력 저감을 보완하기 위하여 자석의 적층방향으로의 오버행을 고려하였다. 자석의 오버행은 슬롯리스와 같이 큰 공극을 갖는 기기에 있어서 누설 및 프린징의 영향을 줄이는데 큰 도움이 된다. 하지만 자석량의 증가로 제작 비용의 증가라는 단점을 갖게 된다. 따라서 본 논문에서는 슬롯리스 형태의 선형 영구자석 기기의 자석 오버행을 3차원 해석적 방법을 이용하여 최적의 길이는 제시하였다. 오버행 길이에 따른 자석량 당 증가하는 출력 밀도를 비교하여 최적의 오버행 길이를 제시하였으며, 3차원 해석적 방법을 이용한 오버행 해석법을 다루었다.

2. 본 론

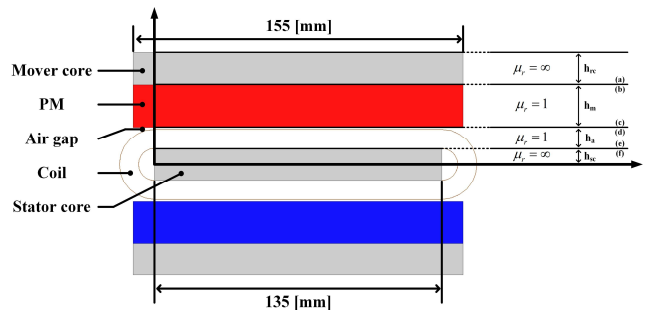
2.1 해석 모델

그림 1은 선형 영구자석기기의 해석 모델의 구조를 보여준다. 슬롯리스의 평와운드 권선 타입의 고정자와 활막 배열 자화 패턴을 갖는 양극식 이동자로 구성되어 있다. 고정자와 이동자는 각각 2400 [mm]와 1600 [mm]의 길이를 갖고, 이동자는 1.6 [m/s]로 직선 왕복 운동을 한다. 또한 자기적 공극의 길이는 10 [mm]이다. 그림 2는 선형 영구자석 기기의 자석 오버행을 고려하여 해석하기 위한 해석적 모델이다. 자석은 적층 방향으로 오버행되어지며 오버행의 길이때문에 해석을 위하여 오버행 길이를 변수로 두었다. 또한 해석적 방법의 적용을 위하여 실 모델을 간략화 시켰으며, 양극식 구조에서 1/2부분만을 이용하였다. 해석적 방법의 해석 모델은 이동자 철심, 영구자석, 공극과 고정자 철심 영역으로

구성되어 있다. 여기서 공극영역은 코일이 포함된 영역으로 자기적 성질이 공극과 코일이 같으므로 포함되었다. 또한  $h_c$ ,  $h_m$ ,  $h_a$  및  $h_s$ 는 각각 이동자 철심 두께, 영구자석 두께, 공극 두께 및 고정자 철심의 두께를 의미한다.



<그림 1> 선형 영구자석 기기의 해석 모델



<그림 2> 오버행이 고려된 해석적 방법의 해석 모델

2.2 해석적 방법을 이용한 자체해석

영구자석 영역에서는 전류원이 없으므로 맥스웰 방정식을 이용하여 자석 영역과 공극영역에서의 지배 방정식을  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H})$  과  $\nabla \times \mathbf{H} = 0$ 에서  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\nabla \times \mathbf{M})$ 을 유도할 수 있다. 따라서 맥스웰 방정식을 이용한 앞에서의 식과 자기벡터포텐셜의 정의를 이용하면 자석 영역과 공극영역에서의 지배방정식을 식 (1)과 (2)와 같이 도출할 수 있다. 식 (1)과 (2)의 지배방정식은 라플라스 방정식과 포와송 방정식으로 표현할 수 있으며 각각의 식을 미분방정식 형태로 변환할 수 있다.

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{\text{air}} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla^2 \mathbf{A}^{\text{mag}} = -\mu_0(\nabla \times \mathbf{M}) \tag{2}$$

여기서 air와 mag는 공극영역과 자석 영역을 의미한다. 또한  $\mu_0$ 는 공기에서의 투자율을 의미한다. 식 (1)과 (2)에서의 자기벡터포텐셜은 식 (3)과 같다. 3차원 해석적 방법이므로 이동방향(x)와 적층방향(z)를 모두 고려하여 표현한 식이다.

$$\mathbf{A}_{n,m} = A_{zn}(y)e^{-j(k_x x + k_n z)} \mathbf{i}_z + A_{xn}(z)e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_x \tag{3}$$

여기서  $n$ 과  $m$ 은 공간고조파 차수를 의미하며,  $k_n$ 과  $k_m$ 은 각각  $n\pi/\tau_p$ 과  $m\pi/\tau_l$ 을 나타낸다. 여기서  $\tau_p$ 와  $\tau_l$ 은 자석의 x 방향과 z 방향으로의 극 피치를 나타낸 것이다. 또한 식 (2)에서의  $\mathbf{M}$ 은 활막 배열 자화 패턴의 3차원 자화모델링을 의미하며 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M} = \sum_n \sum_m (M_{y_n, m} e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_y + M_{x_n, m} e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_x) \quad (4)$$

여기서  $M_{y_n, m}$ 과  $M_{x_n, m}$ 은 할박 배열의 자화 패턴 자화모델링을 위한 푸리에 계수를 의미한다. 따라서 식 (4)의 자화 모델링을 적용하여 지배 방정식을 미분 방정식 형태로 유도하면 식 (5)와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} A_{n, m}(y) - \lambda_{n, m}^2 A_{n, m}(y) = j\mu_0 k_n M_{y_n, m} - j\mu_0 k_m M_{x_n, m} \quad (5)$$

식 (5)와 같이 도출된 미분방정식은 코시-오일러 방정식의 형태이므로 각각 *homogeneous solution*과 *particular solution*을 구한 뒤 *general solution*을 얻을 수 있다. 따라서 자기벡터포텐셜의 일반해를 각 영역간의 관계로 정리할 수 있게된다. 각 영역간의 관계는 전달관계식으로 표현되며 결과는 식 (6)-(8)과 같다. 식 (6)-(8)은 자속의 x방향 성분간의 관계를 나타낸 것으로 z 방향으로의 관계식도 동일한 방법을 이용하여 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_{x_n, m}^b \\ B_{x_n, m}^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_o(h_m) - S_o(h_m) \\ S_o(h_m) - C_o(h_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{z_n, m}^b \\ A_{z_n, m}^c \end{bmatrix} + M_n \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} B_{x_n, m}^d \\ B_{x_n, m}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_o(h_g) - S_o(h_g) \\ S_o(h_g) - C_o(h_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{z_n, m}^d \\ A_{z_n, m}^e \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} B_{x_n, m}^y \\ B_{x_n, m}^z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_o(h_y) - S_o(h_y) \\ S_o(h_y) - C_o(h_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{z_n, m}^y \\ A_{z_n, m}^z \end{bmatrix} \quad (8)$$

접선방향 성분의 영역간의 관계를 나타낸 전달관계 행렬식을 각 영역간의 경계조건에 도입하면 자기벡터포텐셜의 해의 결과를 얻을 수 있다. 경계 조건은 표 1에 나타낸 것으로 정리할 수 있으며 자기벡터포텐셜의 해는 식 (9)와 (10)으로 공극내에서의 결과를 얻을 수 있다.

<표 1> 경계 조건

경계	x-y 평면	y-z 평면
(a)-(b)	$B_{x_n, m}^b = \mu_0 M_{x_n, m}$	$B_{z_n, m}^b = 0$
(c)-(d)	$B_{x_n, m}^c - B_{x_n, m}^d = \mu_0 M_{x_n, m}$	$B_{z_n, m}^c = B_{z_n, m}^d$
	$A_{z_n, m}^c = A_{z_n, m}^d$	$A_{x_n, m}^c = A_{x_n, m}^d$
(e)-(f)	$B_{x_n, m}^e = 0$	$B_{z_n, m}^e = 0$

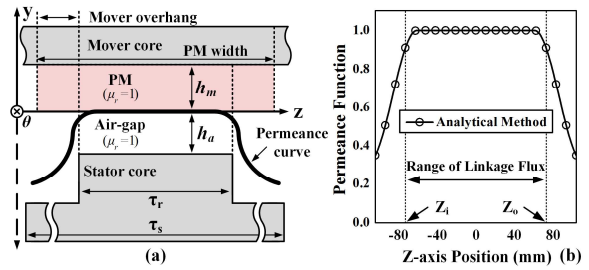
$$A_{z_n, m}^y = \frac{\left\{ \frac{S_o(h_m)}{C_o(h_m)} - 1 \right\} (M_n X_s - \mu_0 M_{x_n, m})}{\frac{S_o^2(h_m)}{C_o(h_m)} - C_o(h_m) - C_o(h_g) + \frac{S_o^2(h_g)}{C_o(h_g)}} \frac{S_o(h_y) S_o(h_y)}{C_o(h_y) C_o(h_y)} \quad (9)$$

$$A_{x_n, m}^y = \frac{\left\{ \frac{S_o(h_m)}{C_o(h_m)} - 1 \right\} M_n X_s}{\frac{S_o^2(h_m)}{C_o(h_m)} - C_o(h_m) - C_o(h_g) + \frac{S_o^2(h_g)}{C_o(h_g)}} \frac{S_o(h_y) S_o(h_y)}{C_o(h_y) C_o(h_y)} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)의 공극내에서의 자기벡터포텐셜의 해를 이용하여 표 2의 자속밀도식에 대입하면 x, y, z방향으로의 자속밀도의 결과를 얻을 수 있다. 도출된 결과를 바탕으로 자석의 적층방향으로의 오버행 길이에 따른 해석을 수행할 수 있다.

<표 2> 공극 자속 밀도

성분	자속밀도
$B_y$	$\sum_n \sum_m \left\{ \frac{\partial}{\partial z} A_{x_n, m} - \frac{\partial}{\partial x} A_{z_n, m} \right\} e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_y$
$B_x$	$\sum_n \sum_m \left\{ \frac{\partial}{\partial y} A_{z_n, m} \right\} e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_x$
$B_z$	$\sum_n \sum_m \left\{ -\frac{\partial}{\partial y} A_{x_n, m} \right\} e^{-j(k_x x + k_m z)} \mathbf{i}_z$



<그림 3> 오버행 해석을 위한 2차원 퍼미언스 적용 모델

### 2.3 오버행을 고려한 자계 특성해석

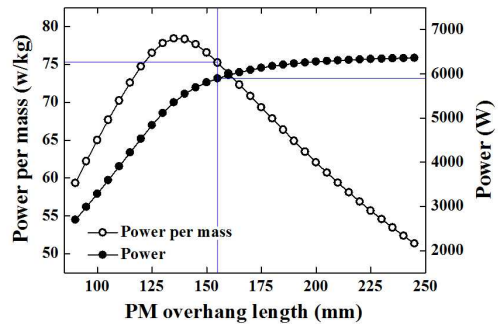
자석의 오버행에 따른 특성해석을 도입하기 위해서는 그림 3과 같은 자석과 고정자간의 자기적인 특징을 고려한 해석이 도입되어야 한다. 그림 3에서 보이는 것과 같이 자석의 오버행에 따라서 공극에서의 자기적인 특징은 축방향에 따라서 다른 구조를 갖게 된다. 이러한 특징을 고려하기 위해서 본 논문에서 2차원 퍼미언스 식을 적용하였다. 퍼미언스 식은 식 (11)에 나타낸 것이며 퍼미언스를 고려한 오버행에 따른 자속밀도는 식 (12)와 같다. 따라서 오버행이 고려된 자속밀도 식을 이용하면 식 (13)과 같은 오버행에 따른 선형 영구자석 기기의 역기전력을 얻을 수 있다.

$$p(z) = A_0 + \sum_{\mu=1}^{\infty} A_{\mu}(z) \cos \mu \frac{2\pi}{\tau_s} z \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_y^{OH} = p(z) \cdot \mathbf{B}_y \quad (12)$$

$$V_{OH} = -N_s \frac{d}{dt} \int_0^{\tau_c} \int_{\tau/2}^{\tau/2} \mathbf{B}_y^{OH}(t) dx dz \quad (13)$$

앞서 도출된 식을 바탕으로 선형 영구자석 기기의 발전모드에서의 출력에 따른 특성을 유도할 수 있다. 따라서 오버행에 따른 기기의 출력 성능을 확인할 수 있다. 그림 5는 선형 영구자석 기기의 발전 모드에서의 오버행 길이에 따른 출력 성능 및 자석량에 따른 출력 밀도를 나타낸 것이다. 오버행에 따라서 출력의 증가량 및 자석량에 따른 출력 밀도의 변화를 확인할 수 있다.



<그림 5> 오버행 해석을 위한 2차원 퍼미언스 적용 모델

### 3. 결 론

본 논문에서는 선형 영구자석 기기의 오버행에 따른 해석에 있어서 3차원 해석적 방법을 적용하였다. 오버행의 길이에 따른 변화를 유한요소법을 사용할 경우 해석적 부담 및 해석 시간의 단점을 갖지만 본 논문에서 제시한 해석적 방법은 해석 시간에 매우 큰 장점을 갖는다. 따라서 앞으로의 선형 영구자석 기기의 설계에 있어서 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

본 연구는 해양수산부의 해양청정에너지개발사업 "10MW급 부유식 파력-해상풍력 연계형 발전시스템 개발 및 인프라 구축"의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### [참고 문헌]

[1] M. M. Koo, J. Y. Choi, Y. S. Park, and S. M. Jang, "Influence of Rotor Overhang Variation on Generating Performance of Axial Flux Permanent Magnet Machine Based on 3-D Analytical Method," IEEE Trans. on Magn., vol. 50, no. 11, Nov. 2014.