

등가자화전류를 이용한 영구자석형 선형동기전동기의 슬롯을 고려한 공간고조파해석

조 재옥, 강 규홍, 흥 정표, 김 규탁

창원대학교 전기공학과

Space Harmonic Analysis of PM type LSM taking into account Slot by Equivalent Magnetizing Current

Jae-Ok Jo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim
Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

Abstract - This paper propose an efficient space harmonic analysis method for magnetic field. Permanent magnet and primary core considered slot are replaced by EMC(equivalent magnetizing current). And the resultant air gap flux density is calculated by superposition due to the permanent magnet and EMC. We analyze the harmonic distribution of air gap flux density taking into account slot for PMLSM.

1. 서 론

OA, FA기기 등에 에너지밀집도를 높일 수 있는 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM)를 적용하고자하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

슬롯의 영향을 고려하여 해석하는 방법에는 유한요소법(FEM)이나 경계요소법(BEM)과 같은 수치해석법이 있으나, 수치해석법에서는 해석에 필요한 데이터를 만들어주기 위한 전처리작업과 해석결과를 분석하기 위한 후처리작업이 매우 번거로울 뿐 아니라, 데이터의 양이 방대하고, 대량의 컴퓨터 연산을 필요로 한다.

따라서, 이러한 해석상의 번거로움을 피하고 직접적으로 고조파해석이 가능한 여러 가지의 공간고조파해석법이 소개되었으나, 현재까지 발표된 영구내용에서는 1차축 철심을 평활철심으로 보고 해석하고 있기 때문에 슬롯에 의한 슬롯고조파의 영향을 고려해 줄 수가 없다[1].

본 논문에서는 등가자화전류를 이용하여 1차축 철심슬롯의 영향까지 고려한 공간고조파 해석방법을 제안하였다. 투자율이 다른 두 매질 사이의 경계면은 자계의 차이를 이용하여 등가자화전류로 치환할 수 있다. 즉, 1차축 철심을 평활철심으로 본 경우와 공기로 본 경우의 자계의 차이에 의해 철심 표면에 분포하는 등가자화전류를 구할 수 있다. 슬롯부분은 공기이므로 슬롯부분에서는 철심의 등가자화전류에 의한 자속을 '0'으로 하는 가상등가자화

전류가 존재한다고 볼 수 있으며, 가상등가자화전류에 의한 자속밀도분포를 구할 수 있다. 즉, 영구자석에 의한 자계와 슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자계를 독립적으로 계산하여 이를 중첩시켜 합성자계를 계산하였다. 이렇게 하므로써 간단하고 효율적으로 슬롯의 영향을 고려한 공간고조파해석방법을 알 수 있겠 되었다.

본 논문에서 제안한 해석방법에 의한 해석결과를 FEM결과와 비교 검토하여 본 논문에서 제안한 해석방법의 타당성을 검증하였다.

2. 해석모델

그림 1은 양측식 PMLSM의 구조이다. 1차축 철심에는 슬롯이 주기적으로 배치되어 있으며, 영구자석은 이와 대향되게 배치되어 있다. 표 1에 해석모델의 제원을 나타내었다.

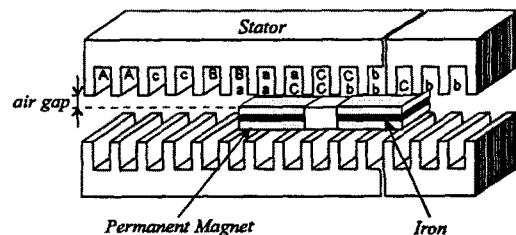


그림 1. 해석모델

표 1. 해석모델의 제원

	항 목	기 호	값 (단위)
1차축 철 심	극 간격	r	72 (mm)
	슬롯 폴치	r_s	12 (mm)
	슬롯 폭	w_s	7 (mm)
영 구 자 석	영구자석 높이	h	10 (mm)
	영구자석 폭	w	50 (mm)
	영구자석 재질		Nd-Fe-B
공 극	기계적 공극	g_m	4.2 (mm)

3. 영구자석에 의한 자계

해석모델을 2차원으로 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 두기로 한다.

- ① 모든 해석영역은 x 방향으로 무한히 길다.
- ② 영구자석은 y 축 방향으로 자화되어 있으며, x 방향으로 주기적으로 배치해 있다.
- ③ 1차축 철심의 투자율은 ∞ 이다.
- ④ 자기포화현상은 없다.

그림 1의 해석모델을 1차축 철심을 평활하게 보고 한쪽 면만을 해석영역으로 하였다.

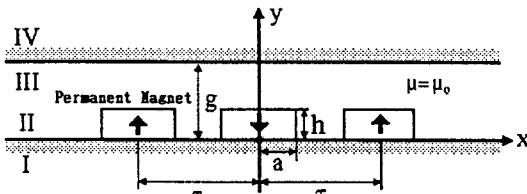


그림 2. 영구자석의 해석모델

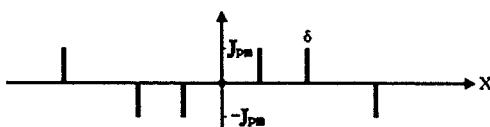


그림 3. 영구자석의 등가자화전류

그림 2의 영구자석 해석모델을 그림 3과 같이 주기적인 분포를 갖는 등가자화전류로 나타낼 수 있으며, 해석영역의 지배방정식은 자기벡터포텐셜 A 를 계변수로하여 맥스웰전자방정식으로 부터 다음 식으로 유도할 수 있다.

-I, III, IV 영역 :

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

-II 영역 :

$$\frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x, y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J_{pn}(x) \quad (2)$$

$$J_{pn}(x) = \sum_{n=1,3}^{\infty} b_{pn} \sin(nkx)$$

$$b_{pn} = \frac{4J_{pn}}{n\pi} [\cos(nka) - \cos(nk(a+\delta))], k = \frac{\pi}{t}$$

위와 같은 미분방정식의 일반해는 식(3)과 같다[2].

$$A = A_0 + Gy + \mu \sum_n Y_n \sin(nkx) \quad (3)$$

여기서, Y_n 은 y 만의 함수이며, 미정계수 A_0 는 편의상 0으로 놓을 수 있다. 자계강도의 접선성분과 자속밀도의 법선 성분에 대한 경계조건을 적용하여 공극에서 해를 구한 후 자속밀도를 구하면 식 (4), (5)와 같다.

$$B_{III}^x = \frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \cdot \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} - \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_{pn}}{nk} \cdot \sin(nkx) \quad (4)$$

$$B_{III}^y = -\frac{\mu_0}{2} \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \right) \cdot \left(\frac{e^{nky}}{e^{nkg}} + \frac{e^{nkg}}{e^{nky}} \right) \cdot \frac{b_{pn}}{nk} \cdot \cos(nkx) \quad (5)$$

한편, 1차축 철심을 공기로 보고 공극자속밀도를 위와 같은 방법으로 구하면 다음과 같다.

$$B_{III}^x = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \sinh(nkh) e^{-nky} \frac{b_{pn}}{nk} \sin(nkx) \quad (6)$$

$$B_{III}^y = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \sinh(nkh) e^{-nky} \frac{b_{pn}}{nk} \cos(nkx) \quad (7)$$

4. 슬롯의 가상등가자화전류에 의한 자계

4.1 철심표면의 등가자화전류

비투자율이 1보다 큰 매질이 자계내에 있을 경우에는 그 매질이 갖고 있는 자화 M 을 등가자화전류로 나타낼 수 있다[3].

$$I_m = \int_S \nabla \times M \cdot dS = \oint M_t dx \quad (8)$$

$\mu_0(M_{t1} - M_{t2}) = B_{t1} - B_{t2}$ 을 이용하여 철심표면의 표면등가자화전류를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (B_{t2} - B_{t1}) \quad (9)$$

여기서, B_{t2} 는 1차축 철심을 평활철심으로 본 경우의 자속밀도이며, B_{t1} 은 1차축 철심을 공기로 본 경우의 자속밀도이다. 철심표면의 등가자화전류는 식 (10)과 같다.

$$J_m = \frac{K_m}{\delta} = b_{en} \sum_{n=1,3}^{\infty} \sin(nkx) \quad (10)$$

여기서, $b_{en} = \sum_{n=1,3}^{\infty} \frac{\sinh(nkh)}{\sinh(nkg)} \cdot \frac{b_{pn}}{nk\delta}$ 이다.

4.2 슬롯의 가상등가자화전류

철심에 의한 등가자화전류는 철심표면에 존재하며, 연속적인 분포를 가진다. 그러나 슬롯이 존재하는 경우, 이 영역은 공기인 경우와 마찬가지가 되므로 슬롯부분에서는 1차축 철심표면의 등가자화전류에 의한 자속을 '0'으로 만드는 가상등가자화전류가 분포해 있다고 볼 수 있으며, 슬롯이 α 에서 β 사이에 있을 때 다음 식을 만족하여야 한다.

$$\Phi_{slot} = -\Phi_{en} \quad (\alpha < x < \beta) \quad (11)$$

여기서, Φ_{slot} 은 슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자속이고, Φ_{en} 은 철심표면의 등가자화전류에 의한 자속이다.

$$\Phi_{slot} = - \int_{\alpha}^{\beta} B_{en} dx dz = \int_0^r B_{cnm} dx dz$$

식 (11)과 $\frac{1}{\mu_0 \delta} \nabla \times \mathbf{B}_{cmn}$ 을 동시에 만족하는 슬롯부분의 가상등가자화전류는 다음 식으로 표현된다.

$$J_{nm} = \sum_{n=1,3}^{\infty} \sum_{m=1,3}^{\infty} [a_{nm} \cos(mkx) + b_{nm} \sin(mkx)]$$

슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자속밀도는 다음과 같다.

$$\mathbf{B}^x = \mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{e^{nk\delta} - 1}{e^{nk\delta}} \right) \cdot \sinh(nky) \cdot$$

$$\left(\frac{b_{nm}}{nk} \sin(nkx) + \frac{a_{nm}}{nk} \cos(nkx) \right)$$

$$\mathbf{B}^y = -\mu_0 \sum_{n=1,3}^{\infty} \left(\frac{e^{nk\delta} - 1}{e^{nk\delta}} \right) \cdot \cosh(nky) \cdot$$

$$\left(\frac{b_{nm}}{nk} \cos(nkx) - \frac{a_{nm}}{nk} \sin(nkx) \right)$$

5. 해석결과

그림 4는 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 슬롯부분의 가상등가자화전류분포를 나타내었으며, 그림 5에는 이 가상등가자화전류에 의한 자속밀도분포를 나타내었다.

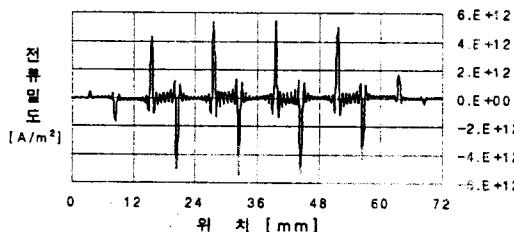


그림 4. 슬롯부분의 가상등가자화전류

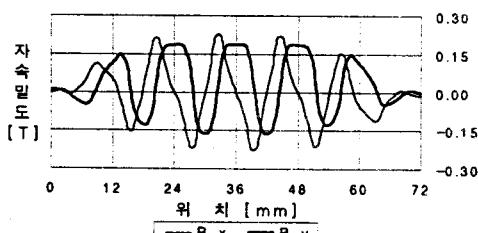


그림 5. 슬롯부분의 가상등가자화전류에 의한 자속밀도분포

그림 6과 7은 공극 중앙에서 종래 방법, FEM과 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 구한 공극자속밀도분포를 비교한 것이다. 종래 방법으로는 슬롯의 영향을 고려하지 못했지만, 본 논문에서 제안한 방법은 슬롯의 영향을 잘 나타내고 있다. 그리고 유한요소법으로 구한 결과와 잘 일치한다.

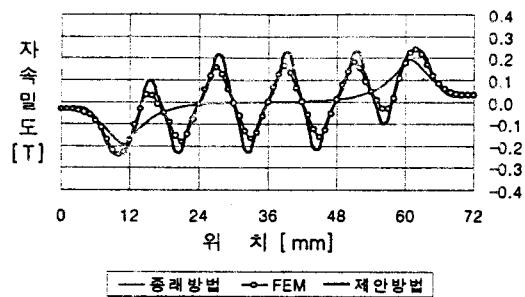


그림 6. B_x 성분 공극자속밀도분포

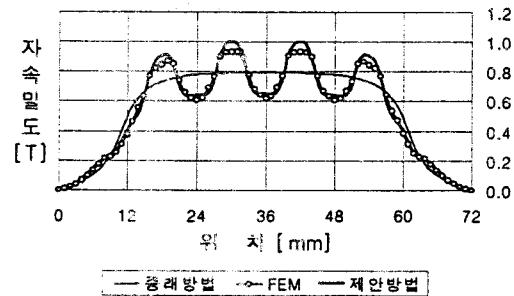


그림 7. B_y 성분 공극자속밀도분포

6. 결 론

본 논문에서는 등가자화전류를 이용하여 PMLSM을 대상으로 1차축 철심슬롯의 영향까지도 고려할 수 있는 효율적인 공간고조파해석방법을 제안하였다.

해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 해석모델의 유한요소법에 의한 해석결과와 제안한 방법에 의한 해석결과를 비교 검토하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

1차축 전류를 여자시킨 경우에도 본 논문에서 제안한 해석방법을 이용하여 자계를 손쉽게 계산할 수 있으며, Detent force나 발생추력도 효과적으로 구할 수 있다.

또한, BLDC 전동기(Brushless DC Motor)를 비롯하여 영구자석을 계자로 이용하고 있는 각종 전기기기의 코오징토오크, 토크리플을 비롯한 기기의 특성해석에 다양하게 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Dal-Ho Im, Jung-Pyo Hong, et al, "The Optimum Design of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", proc. of IEEE CEFC '96, pp.166, 1996
- [2] B.Hague, "The Principles of Electromagnetism Applied to Electrical Machines", Dover Publications, INC., 1962, pp. 292 -297
- [3] 竹山說三, 電磁氣學現象理論, 丸善株式會社, pp.265-269.