

해석적인 방법에 의한 직선형 유도 전동기의 전자기적 특성해석

장석명*, **최지환***, 고경진*, 김현규*, 김일중**
충남대*, 호서대**

Analysis on electromagnetic characteristics of linear induction motor using the analytical method

Seok-Myeong Jang*, Ji-hwan Choi*, Kyoung-Jin Ko*, Hyun-Kyu Kim*, Il-Jung Kim**
Chungnam National University*, Hoseo University**

Abstract - This paper deals with analysis on electromagnetic characteristics of linear induction motor(LIM) using the analytical method. As a analytical method, space harmonics method which is applied to multilayer region is used in this paper. Using the flux density obtained by analytical method, thrust and normal force are calculated through Maxell stress tensor. The results such as flux density, eddy current and force are verified by comparison between analytical results and FEM.

1. 서 론

직선형 유도전동기는 일반 회전형 유도 전동기를 축방향으로 잘라 펼친 형태로 회전형 기기에 비해 공극이 크며, 입구단과 출구단의 존재로 인해 발생하는 단부효과와 횡방향의 edge effect 등 직선형 전동기에서만 발생하는 특수한 현상들로 인하여 추력을 비롯한 제반 특성이 회전기에 비해 떨어지는 단점이 있다. 그러나 이와 같은 단점에도 불구하고 직선운동을 필요로 하는 시스템에서는 회전운동을 직선운동으로 변환시키는데 필요한 기어나 랙크 등의 기구가 필요치 않아 이들 변환 장치에 의한 손실이나 소음, 진동 등이 발생하지 않으며 회전형 기기에 비해 운전속도에 제한이 없는 등의 장점으로 인하여 직선운동이 필요한 공장자동화 서보시스템, 반송시스템 및 초고속 자기부상열차, 경전철, 엘리베이터 등 그 용도가 점차 증가하고 있다.

직선형 유도전동기의 설계에 있어서 에너지 효율과 힘 특성이 우수한 기기를 설계하기 위해선 기초설계가 중요하며, 기초설계에 흔히 사용되는 유한요소해석법(FEM)은 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 전자장 해석을 통한 기기의 특성해석은 유한요소해석법에 비해 해석시간을 단축할 수 있으며, 그 정확도 또한 신뢰할 만하다. 본 논문에서는 직선형 유도전동기의 공간 고조파법을 사용한 전자장 해석을 통해 공극자속 밀도, 와전류 밀도를 예측하고 이를 토대로 Maxwell stress tensor를 사용하여 추진력 및 수직력을 계산하였다. 해석적 결과는 유한요소 해석의 결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.[1]

2. 전자기적 특성 해석

2.1 공간 고조파법에 의한 전자장 해석

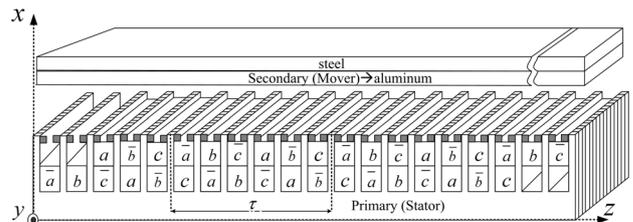
그림 1은 직선형 유도전동기의 설계모델이며, 그림 2는 직선형 유도전동기의 전자기적 특성해석을 위한 2차원 해석모델이다. 1차측 전기자 권선영역에서 권선에 의한 전류밀도는 등가 면전류 밀도로 치환하였으며, 2차측은 도체판과 백아이언으로 구성되어 있다. μ 는 투자율, σ 는 도전율을 나타내며, 알루미늄이 사용된 도체판은 $3 \times 10^8 (m/\Omega)$ 의 도전율을 가지고 있다. τ 는 극피치를 나타내고, 백아이언과 고정자 철심코어는 적층되어 있으므로 무한대의 투자율과 0의 도전율을 갖는다고 가정하였다. 해석모델에서 모든 전류의 방향은 y성분만을 가지며 특성해석에서 모델의 길이를 무한으로 가정함으로써 단부효과는 고려하지 않았다. 그림 2의 해석모델에서 맥스웰 기본 방정식에 의한 지배방정식은 식(1)로부터 유도된다.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{1.1}$$

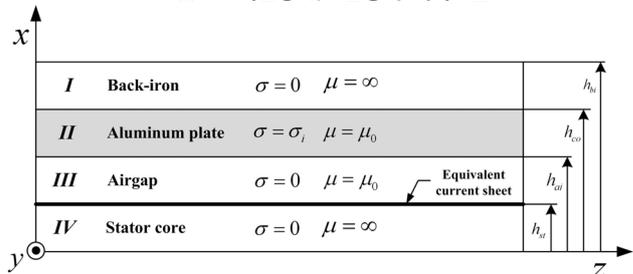
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1.2}$$

$$B = \nabla \times A \tag{1.3}$$

식(1.1)에서 기기의 동작 주파수에 의한 변위전류 성분은 매우 작으므로 무시하며, 1차측의 고정자 권선에 의한 자속에 의해 2차측 알루미늄판에 유기되는 와전류는 옴의 법칙을 통해 $J_e = \sigma(E + U \times B)$ 와 같이 유도기전력과 속도기전력의 합으로써 표현된다.[1]



<그림 1> 직선형 유도전동기 해석모델



<그림 2> 4영역을 갖는 직교좌표축 2차원 해석모델

해석모델에서 자기벡터퍼텐셜 A 는 전류의 방향을 가지며, 매질의 높이를 변수로 하는 함수이고, z 방향으로 분포하므로 식(2)와 같이 정의 되어진다.

$$A(x, t, z) = A(x) e^{j(\omega t - k_n z)} i_y \tag{2}$$

여기서, ω 는 각주파수, k_n 은 공간고조파 차수를 의미하며, A 를 식(1)에 대입함으로써 와전류 J_e 를 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$J_e = \sigma(-j\omega A_y - U_m \frac{\partial A_y}{\partial z}) i_y = \sigma(-j\omega A_y + jk_n U_m A_y) i_y \tag{3}$$

여기서 U_m 는 가동자의 속도를 의미하며, 식(1), (2), (3)으로부터 투자율 μ , 도전율 σ 를 갖는 모든 영역에 대해 만족하는 일반화된 지배방정식이 식(4.1)로 정리된다. 여기서, 슬립 $s = (U_s - U_m)/U_s$ 를 도입하면, 고정자 권선이 만드는 회전자계의 속도, 즉 동기속도로써 식(4.2)와 같이 표현 되어질 수 있다.

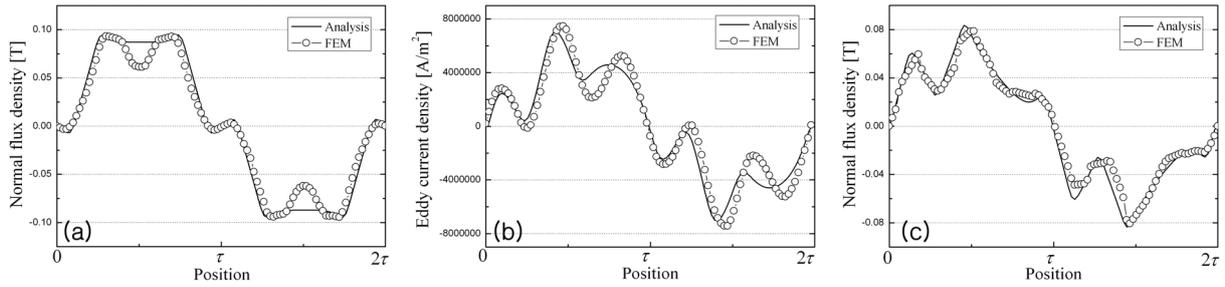
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y - (k_n^2 - \sigma\mu j\omega - jk_n U_m) A_y = 0 \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_y - \{k_n^2 - \sigma\mu j\omega - jk_n (1-s) U_s\} A_y = 0 \tag{4.2}$$

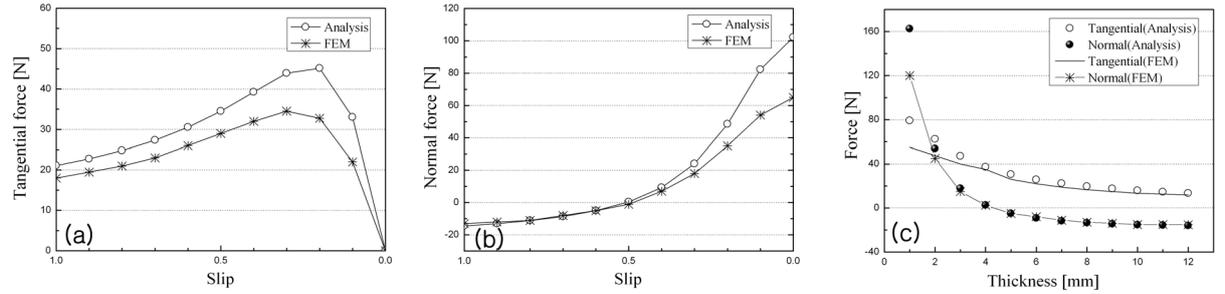
2차 방정식의 형태로 표현된 식(4)의 일반해를 식(5)와 같이 구할 수 있으며, 여기서 $\alpha^2 = k_n^2 + j\sigma\mu\omega - jk_n\sigma\mu U_s + jk_n\sigma\mu U_s$ 으로써 투자율과 도전율, 슬립에 의해 변화하는 함수이다.

$$A(x, t, z) = \text{Real}\{ (c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x}) e^{j(\omega t - k_n z)} \} i_y \tag{5}$$

자기벡터퍼텐셜에 대한 일반해인 식(5)를 식(1)에 적용하여 해석모델의 각 매질에서의 특성방정식을 식(6)과 같이 구할 수 있다.



〈그림 3〉 LIM의 전자기 해석결과: (a) 고정자 권선에 의한 공극자속밀도, (b) 알루미늄표면의 와전류밀도, (c) 와전류가 고려된 공극자속밀도



〈그림 4〉 LIM의 힘특성: (a) 슬립에 따른 추력특성, (b) 슬립에 따른 수직력 특성, (c) 알루미늄판의 두께에 따른 힘특성

- Region I, IV steel ($\sigma=0, \mu=\mu_s$)

$$A_y^H(x, t, z) = (c_5 e^{k_x x} + c_6 e^{-k_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.1)$$

$$H_z^H(x, t, z) = 0 \text{ (assuming } \mu_s = \infty \text{)} \quad (6.2)$$

$$H_x^H(x, t, z) = j \frac{k_n}{\mu_s} (c_5 e^{k_x x} + c_6 e^{-k_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.3)$$

- Region II, Aluminum plate ($\sigma=\sigma_i, \mu=\mu_0$)

$$A_y^H(x, t, z) = (c_3 e^{\alpha_x x} + c_4 e^{-\alpha_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.4)$$

$$H_z^H(x, t, z) = \frac{\alpha_n}{\mu} (c_3 e^{\alpha_x x} - c_4 e^{-\alpha_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_z \quad (6.5)$$

$$H_x^H(x, t, z) = j \frac{k_n}{\mu} (c_3 e^{\alpha_x x} + c_4 e^{-\alpha_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.6)$$

$$J_e = \sigma_i (-j\omega - jk_n U_n) A_{yn} \quad (6.7)$$

- Region III, airgap ($\sigma=0, \mu=\mu_0$)

$$A_y^I(x, t, z) = (c_1 e^{k_x x} + c_2 e^{-k_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.8)$$

$$H_z^I(x, t, z) = \frac{k_n}{\mu_0} (c_1 e^{k_x x} - c_2 e^{-k_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.9)$$

$$H_x^I(x, t, z) = j \frac{k_n}{\mu_0} (c_1 e^{k_x x} + c_2 e^{-k_x x}) e^{j(\omega t - k_x z)} i_y \quad (6.10)$$

해석모델의 경계에서 다음과 같은 경계조건을 사용하여 각 매질의 특성 방정식의 계수를 행렬식을 사용한 반복계산을 통해 구할 수 있다.

- i) $y = \pm \infty$ 에서 자기벡터퍼텐셜은 존재하지 않는다.
- ii) 각 경계면에서 자기벡터퍼텐셜은 연속이다.
- iii) 각 경계면에서 전류가 존재하지 않는다면 자계의 세기의 H 의 접선 성분은 연속이고, 전류가 존재한다면 $H_i - H_{(i+1)} = J$ 이다.

그림 3은 전자기 해석을 통해 구한 자속밀도의 유한요소해석을 통한 검증 결과를 보여준다. 그림 3.(a)는 알루미늄의 도전율을 0으로 가정하여 고정자 권선에 의한 공극자속밀도를 구한 것으로, 고정자 권선의 전류를 등가 면전류로 치환하여 치슬롯구조가 고려되지 않은 해석치와 치슬롯 구조가 고려된 유한요소해석값이 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.(b)는 알루미늄판 표면에 유기된 와전류를 보여주고 있으며, 그림 3.(c)는 유기된 와전류의 역자계가 고려된 공극자속밀도를 보여주고 있다. 치슬롯 구조가 고려되지 않았음에도 유한요소해석결과와 거의 일치함을 볼 수 있다.

2.2 힘 특성식

직선형 유도전동기의 추력 및 수직력은 맥스웰 응력법을 이용하여 구할 수 있다. 힘 특성식은 $F = J \times B$ 로 표현되며, 알루미늄판 표면에서의 와전류 $J_e = \sigma(E + U \times B)$ 를 대입하고, Maxwell stress tensor에 의한

면적 적분에 의해 추력과 수직력이 식(7)과 같이 자계의 수평방향성분과 수직방향성분으로 표현되어 진다.

$$F_{thrust} = -S\mu_0 (H_x H_z) = -\frac{S\mu_0}{2} \sum_{n=0}^{\infty} H_x H_z^* \quad (7)$$

$$F_{normal} = -\frac{S\mu_0}{2} (H_x H_x - H_z H_z) = -\frac{S\mu_0}{4} \sum_{n=0}^{\infty} (H_x H_x^* - H_z H_z^*) \quad (8)$$

여기서 ‘*’은 켈레복소를 의미하고, $S=2\pi p$ 로써 고정자 권선에 의한 자속밀도 B 와 알루미늄판에 유기되는 와전류 J_e 에 의한 상호작용에 의해 실질적으로 힘이 발생하는 면적을 의미하며, 여기서 p 는 쌍극수이다.

그림 4는 직선형 유도전동기의 추력과 수직력 특성을 나타낸다. 슬립이 1이라는 것은 가동자가 정지되어 있음을 의미하며, 슬립 0은 가동자의 속도가 동기속도와 같아 컸음을 의미한다. 추력은 슬립이 작아질수록 증가하다가 슬립이 0에 가까워 지면서 0으로 수렴함을 볼 수 있으며, 수직력은 슬립이 작아질수록 커짐을 알 수 있다. 또한, 슬립이 0.5보다 작아지면 백아이언에서 발생하는 반발력보다 알루미늄판에서 발생하는 흡인력이 커짐을 확인할 수 있다. 추력과 수직력의 해석치를 유한요소해석치와 비교하였을 때 슬립이 작아질수록, 즉 가동자의 속도가 동기속도에 가까워 질수록 불일치의 정도가 심해지는 것을 확인할 수 있는데 이는 직선형 유도전동기의 속도가 증가할수록 기기의 양쪽 말단에서 발생하는 단부효과와 영향이 커지기 때문이다.[2] 그림 4.(c)는 알루미늄판의 두께에 따른 추력과 수직력의 힘 특성을 보여주고 있다. 단부효과와 영향이 적은 값을 취득하기 위해 슬립 0.6에서의 값을 취득하였으며, 판의 두께가 1mm일때 가장 큰 추력과 수직력을 보이며 두께가 커질수록 힘이 줄어들다가 수렴함을 볼 수 있는데 이것은 알루미늄판의 두께가 두꺼울수록 2차축의 저항이 커져서 유기되는 와전류가 작아지기 때문이다.

3. 결 론

본 논문에서는 공간 고조파법을 사용한 전자기 해석을 통하여 직선형 유도전동기의 전자기 특성을 해석하고 Maxwell stress tensor에 의해 추력과 수직력을 구하였다. 이러한 해석적 접근방법과 그에 대한 결과는 기기의 기초설계에 토대로 작용할 것이며, 동특성 모델링 및 시뮬레이션에 필요한 설계 파라미터들을 제공할 수 있을 것이다. 해석적 결과와 유한요소해석의 결과를 비교하여 치슬롯 구조와 단부효과와 영향을 볼 수 있었으며, 추후 해석적 영역을 확장하여 이러한 치슬롯구조나 단부효과 및 edge effect에 대한 영향을 고려한 해석을 수행할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 권정기, “Design and vector control of linear induction motors”, 충남대학교 석사학위논문, p16-38, 2004.
- [2] S.A. NASAR, “Linear motion electric Machines”, p63, 1976.