

농형 2차축을 갖는 선형유도전동기의 설계

박 승 찬*, 우 경 일**

*동양대학교 시스템제어공학부, **한양대학교 공학기술연구소

Design of a Linear Induction Motor with Squirrel Cage Secondary

Seung-Chan Park*, Kyung-il Woo**

*School of System Control Engineering, Dongyang Univ., **RIET, Hanyang Univ.

Abstract - In this paper, design procedures of a linear induction motor(LIM) with squirrel cage secondary are presented. The electrical and magnetic loadings are determined by the conventional criteria of the linear induction motors with sheet secondary. Electromagnetic fields of the designed motor are analyzed using finite element method, and characteristics of thrust and currents are presented.

작으며 회전형 유도 전동기보다 더 동기계(銅機械)인 성향을 지닌다.

$$AC = 3.7 \left(\frac{S}{f}\right)^{0.44} \quad (3)$$

$$\phi = 0.127 \left(\frac{S}{f}\right)^{0.56} \quad (4)$$

1. 서 론

선형 유도 전동기의 2차축은 일반적으로 평판형인 경우가 많으며, 이것은 구조가 간단하여 제작이 용이하기 때문이다. 그러나, 2차축의 구조를 회전형 유도전동기와 같이 농형으로 하면, 역률 및 효율 상승에 의한 에너지 절감과 함께 추력이 상대적으로 증가하는 효과가 있다 [1-3].

본 논문에서는 농형 2차축을 갖는 편축식 선형 유도 전동기의 설계과정을 장하분배법을 이용하여 제시한다. 전기장하 및 자기장하의 분배는 기존의 선형유도전동기의 장하분배통계를 사용한다[4,5]. 설계 사양으로서는 정격 추력 30[N], 최대 추력은 70[N]이며, 최대 속도는 2[m/sec]이다. 또한 1차축의 길이 제한은 20[cm]이며, 2차축의 길이는 1.2[m]이내이다.

기본 설계 후에는 시간차분 유한요소법을 이용한 전자기 해석을 통하여 기동시의 추력 리플 및 전류 특성을 고찰한다.

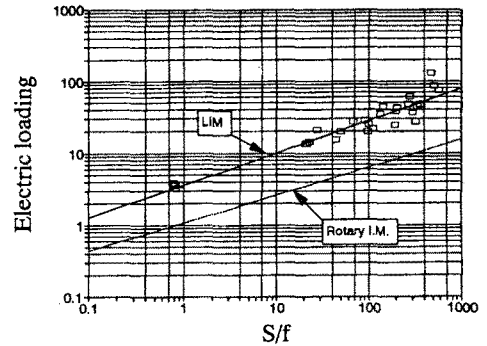
2. 선형유도전동기의 전기 및 자기 장하 통계

전기기기의 전기 장하($AC = AC \times 10^{-3}$: AC = 1극당 압페어도체수)와 자기장하($\phi = \phi \times 10^2$: ϕ = 극당 자속량[wb])는 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다[6].

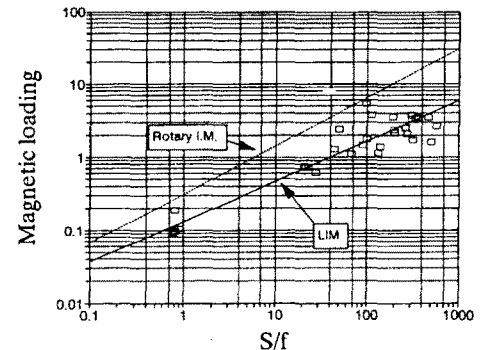
$$AC = AC_0 \left(\frac{S}{f}\right)^{1/(1+\gamma)} \quad (1)$$

$$\phi = \phi_0 \left(\frac{S}{f}\right)^{\gamma/(1+\gamma)} \quad (2)$$

여기서, AC_0 및 ϕ_0 는 각각 S/f 가 1일때의 장하로서, 기준 전기장하 및 기준 자기장하이다. S 는 1극당 용량(= kVA/p)이며, f 는 100 Hz 당 주파수(= $f/100$)를 나타낸다. LIM의 비용량과 전기장하 및 자기장하의 관계를 기존의 설계 자료로부터 통계를 구하면, 그림 1과 같으며, 이로부터 식 (3)과 식 (4)를 얻을 수 있다. 또한, LIM의 설계에 있어서, 자기비장하(공극자속밀도의 최대치)와 기준 자기장하의 범위를 회전형 유도전동기와 비교하여 나타내면 표 1과 같다. 표 1에서, LIM은 흡인력과 공극 무효 전력량의 감소를 위하여 자기 비장하가



(a) 비용량과 전기장하



(b) 비용량과 자기장하

그림 1. 선형유도전동기의 장하분배

표 1. 유도전동기의 장하 분배 정수 및 자기장하

	장하분배정수 γ	기준 자기장하 ϕ_0 [Wb]	자기비장하 [T]
회전형 유도전동기	1.3	0.335×10^{-2}	0.65 ~ 0.85
선형 유도전동기	1.27	0.127×10^{-2}	0.2 ~ 0.5

3 기본 설계 과정

3.1 사양 및 제약 조건의 결정

설계하고자하는 선형 유도 전동기의 정격 추력은 30[N], 최대 추력은 70[N]이며, 최대 운전 속도는 2[m/sec]이다. 최대 속도를 base 속도로 하면, 설계를 위한 출력은 60 [W]으로 선정된다.

설계 제약 조건으로서, 1차측의 길이는 200 [mm], 1차 철심의 높이 및 직층폭은 각각 35 [mm], 40 [mm] 이내로 설정하였다. 2차측의 길이는 1.2[m] 이내로 한다. 공극의 길이 g 는 기계적인 조건을 고려하여 1.5 [mm] 로 결정하였다. 또한, 극수 p 와 매극매상당 슬롯수 q 는 1차측의 길이 제한을 고려하여 각각 4와 2로 선정하였다.

3.2 1차측의 주요치수 결정

선형유도전동기의 효율 \times 역률($\eta \cos \phi$)은 2차측이 농형형인 경우를 포함하여, $0.1 \leq \eta \cos \phi \leq 0.5$ 의 범위에 있다[1]. 차량 추진용의 경우, $\eta \cos \phi$ 는 비교적 높아 0.4 정도이며, 소형의 반송용일 경우는 보통 0.2 이하이다. 설계하고자하는 전동기의 $\eta \cos \phi$ 라 예상하면, 식 (5) ~ 식 (8)의 값들을 계산할 수 있다.

$$\text{입력 용량 } kVA = \frac{P_{out}}{\eta \cos \phi} \quad [\text{kVA}] \quad (5)$$

$$\text{선전류 } I_1 = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} \quad [\text{A}] \quad (6)$$

$$\text{매극의 용량 } S = \frac{kVA}{p} \quad [\text{kVA}] \quad (7)$$

$$\text{비용량(比容量)} : \frac{S}{f \times 10^{-2}} \quad (8)$$

매극당의 자속 ϕ 는 식 (2)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \phi \times 10^{-2} = 0.127 \left(\frac{S}{f} \right)^{0.56} \times 10^{-2} \quad [\text{Wb}] \quad (9)$$

1차 철심의 슬롯에 분포되어 있는 매극당의 암페어 도체 수 AC 는 식 (1)에 의하여 식 (10)과 같이 되며, 이로부터 m 상 중 1상의 직렬턴수를 구하면, 식 (11)와 같이 된다.

$$AC = AC \times 10^3 = 3.7 \left(\frac{S}{f} \right)^{0.44} \times 10^3 \quad [\text{A}] \quad (10)$$

$$N_{ph} = \frac{pAC}{2mI_1} \quad [\text{turns}] \quad (11)$$

매극매상의 슬롯수를 q 로 하면, 1 코일당 턴수 $N = N_{ph}/pq$ 이 된다.

공극의 자계 분포가 정현적이라고 가정하면, 매극당 자속은 $\phi = \frac{2}{\pi} \tau h_i B_{gm} \times 10^{-4}$ [wb] 이므로, (τh_i) 는

$$(\tau h_i) = \frac{\phi \times 10^4}{\frac{2}{\pi} \times B_{gm}} \quad [\text{cm}^2] \quad (12)$$

이 된다. 여기서, h_i 는 1차철심의 유효폭이다. 따라서, 1차철심의 유효폭 h_i 는 식 (13)과 같이 계산된다.

$$h_i = \frac{(\tau h_i)}{\tau} \quad [\text{cm}] \quad (13)$$

한편, 슬롯내 도체의 전류밀도를 J_1 [A/mm²] (일반적으로 3 ~ 5 [A/mm²] 정도의 범위로 하지만, 운전의 듀티 사이클 및 소형화 설계를 고려하여 본 논문에서는 10 [A/mm²]로 선정함) 이라 두면, 도체의 단면적 Δ_c 는

$$\Delta_c = I_1/J_1 \quad [\text{mm}^2] \quad (14)$$

가 되며, 이로부터 슬롯내의 도체가 차지하는 면적 A_c 를 구하면 식 (15)와 같으나, 실제의 규격도체를 선택하면 이 면적은 약간 변경된다.

$$A_c = 2 \times N \times \Delta_c \quad [\text{mm}^2] \quad (15)$$

점적율을 S_f 로 나타내면, 도체를 수용하기 위한 슬롯면적 A_s 는

$$A_s = A_c/S_f \quad [\text{mm}^2] \quad (16)$$

으로 된다. 슬롯의 면적이 구해지면, 슬롯 폭과 슬롯 깊이를 결정하기 위하여, 슬롯 피치에 대한 슬롯 폭의 비 ($k_t = W_s/t_s$)를 먼저 결정한다. 이 비는 자기 비장하와 치에서의 최대 자속 밀도 값에 따라서 결정되며, 일반적으로 0.6 ~ 0.75 사이에 있다. 따라서, 슬롯 폭 W_s 는

$$W_s = k_t \times \tau/mq \quad [\text{mm}] \quad (17)$$

로 결정할 수 있다. 또한, 슬롯 깊이는

$$d_s = A_s/W_s \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

그리고, core-back 부분의 두께 d_c 는 아래의 수식으로부터 구한다.

$$(d_c h_i) = \frac{\phi/2}{l_m \times B_c} \quad (19)$$

$$d_c = (d_c h_i)/h_i \quad (20)$$

여기서, l_m 은 철심의 적층율이며, B_c [T] 는 core-back 내에서의 자속밀도이다.

3.2 2차측의 주요치수 결정

단부효과를 무시하면, 공극을 통하여 2차측으로 입력되는 전력량은 식 (21)로 표현된다.

$$P_2 = \frac{Z_2}{(p/2)} E_b I_b \frac{p}{2} \cos \phi_2 \quad [\text{W}] \quad (21)$$

여기서, Z_2 , E_b , I_b , $\cos \phi_2$ 는 각각 도체바(bar)의 갯수, 도체바의 유효기전력, 도체바 전류 및 2차 역률을 나타낸다. Z_2 는 추력 리플 감소와 제작비를 고려하여 28 (고정자의 4극 길이에 해당되는 회전자 바의 갯수)로 하였다. 출력은 식 (22)와 같이 근사적으로 계산 가능하다.

$$P_{out} = (1-s) Z_2 E_b I_b \cos \phi_2 \quad [\text{W}] \quad (22)$$

식 (22)로부터 I_b 를 할 수 있다. 또한, 엔드링의 전류값 I_r 은 식 (23)에 의하여 얻어진다.

$$I_r = \frac{Z_2}{p\pi} I_b \quad [\text{A}] \quad (23)$$

따라서 바의 단면적은 식 (24)에 의하여 결정된다.

$$q_b = \frac{I_b}{\Delta_b} [\text{mm}^2] \quad (24)$$

여기서, Δ_b 는 바의 전류밀도이며, 바의 재질을 동(銅)으로 하여 $7 [A/\text{mm}^2]$ 로 선정하였다.

엔드바의 전류밀도를 $\Delta_r = 8.5 [A/\text{mm}^2]$ 으로 하면, 엔드바의 단면적은 식 (25)에 의하여 계산된다.

$$q_r = \frac{I_r}{\Delta_r} \quad (25)$$

3.3 설계된 전동기의 주요 치수

본 논문에서 설계한 전동기의 주요치수를 표 2.1에 나타내었으며, 1차측과 2차측의 단면도를 그림 2에 나타내었다.

표 2. 주요 치수

파라미터	단 위	설계치	
선간전압	V _L	V	220
주파수	f	Hz	60
전류	I _L	A	1.6
용량	kVA	kVA	0.6
정격슬립	s _n		0.35
추력	F _x	N	30
동기속도	V _s	m/sec	4.8
1차측 길이	L	mm	200
상수	m		3
극수	p		4
1차철심 적층폭	h	mm	40
매극대상 슬롯수	q		2
슬롯피치	t _{s1}	mm	6.6
슬롯폭	W _s	mm	3
단절율	β		5/6
1코일당 턴수	N	turns	104
1상의 직렬턴수	N _{ph}	turns	832
반코일 길이	l _a	mm	90
1차측 저항	R ₁	Ω	19.6
기계적 공극	g	mm	1.5
2차측 슬롯피치	t _{s2}	mm	5.7
back-iron 두께	d _{iron}	mm	10
back-iron 폭	W	mm	40
바저항률(Cu)		Ωm	1.73 × 10 ⁻⁸
바직경	D _{bar}	mm	3
엔드바단면적	q _r	mm ²	15

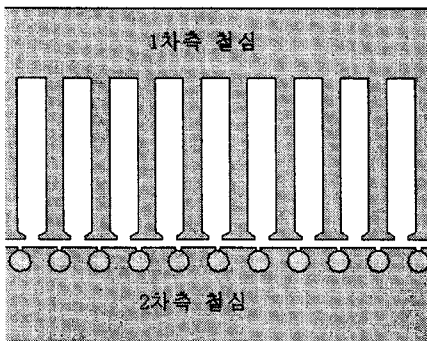


그림 2. 설계한 전동기의 1, 2차측 철심의 단면도

4. 특성 해석

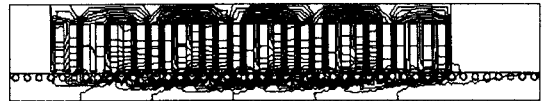
4.1 유한요소법에 의한 전자계 해석

시간 차분 유한요소법을 이용하여 설계한 전동기의 기동시 전자계를 해석하였다. 해석을 위한 지배방정식은 식 (26)과 같다[7].

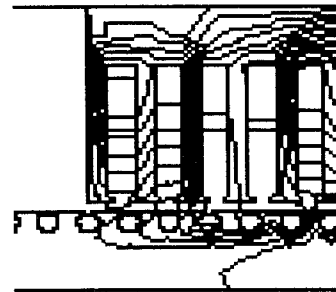
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \quad (26)$$

여기서, A는 자기벡터 포텐셜이며, J₀, σ 는 1차측의 권선 전류밀도 및 2차측의 도전율이다. ∇φ 는 2차측 바 전체에서의 전류 연속성을 고려하기 위한 항이다.

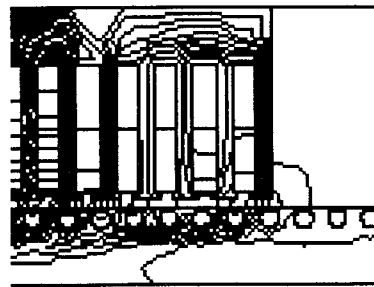
그림 3은 구속시의 전동기 전체, 입구단 및 출구단부에서의 자속 분포도를 보여준다. 출구단 부근에서의 2차측 전류를 충분히 고려하기 위하여 출구단부의 해석 영역을 입구단보다 크게 설정하였다.



(a) 전동기 전체



(b) 입구단부



(c) 출구단부

그림 3. 구속시의 자속 분포도 (전압 220 V, 주파수 60Hz)

4.2 추력 특성 및 전류 특성

그림 4는 구속시의 추력 특성으로서, 추력의 리플이 존재함을 알 수 있다. 공극의 길이를 1.5[mm]에서 1[mm]로 변경하면 추력의 평균치가 증가하지만 추력 리플 또한 증가하게 된다. 추력 리플은 전동기의 속도 및 위치제어에 악영향을 미치므로, 기본 설계시에 가정한 공극길이인 1.5[mm]가 적합함을 알 수 있다. 그림 5는 구속시의 상전류 특성을 보여준다. 그림 6은 인버터 운전시 전압/주파수의 비가 일정한 경우의 추력 특성으로서 저주파수 운전영역으로 갈수록 1차측 임피던스에 의한 전압강하에 의하여 발생 추력이 점차로 감소함을 알 수 있다. 따라서, 저주파수 운전영역에서는 전압강하 보상을 위하여 인버터 출력전압의 부스트가 필요하게 된다.

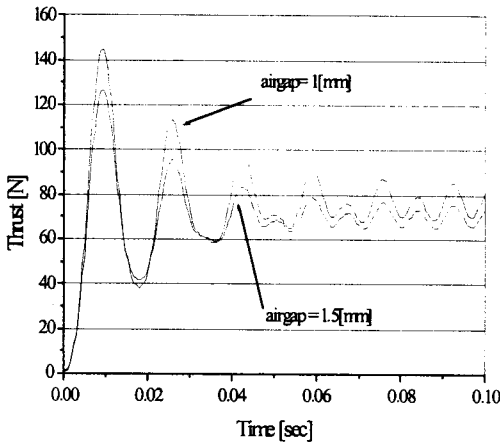


그림 4. 공극변화에 따른 구속시 추력 특성

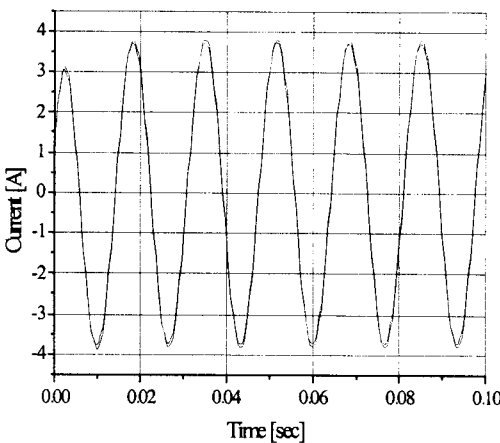


그림 5. 구속시 상전류 특성

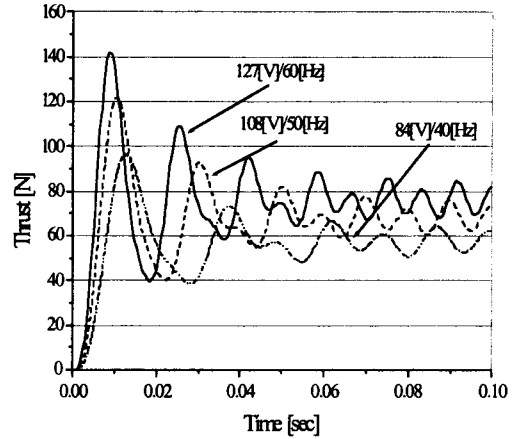


그림 6. 전압/주파수 일정 운전시의 기동추력 변화 (g = 1mm 일때)

5. 결 론

본 논문에서는 장하분배법을 이용하여 농형 2차측을 갖는 선형 유도 전동기의 주요치수를 결정하는 설계과정을 제시하였다. 전기장하 및 자기장하의 분배는 평판형 2차측을 갖는 선형유도전동기의 장하통계를 기초로 하여 이루어졌다. 유한요소법을 이용하여 설계한 전동기의 구속시 특성을 해석한 결과, 평균 추력 70[N]을 갖는 만족할 만한 결과를 얻었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jacek. F. Gieras, *Linear Induction Drives*, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [2] Takafumi Koseki, Satom Sone et al., "Investigation of Secondary Slot Pitches of a Cage-Type Linear Induction Motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.29, no.6, pp.2944-2946, 1993.
- [3] N.Fujii and T. Harada, "A New Viewpoint of End Effect of Linear Induction Motor from Secondary Side in Ladder Type Model", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.35, no.5, pp.4040-4042, 1999.
- [4] 원종수 역, *전기설계학*, 동일출판사, 1994.
- [5] Dal-Ho Im, Seung-Chan Park and Il-Ho Lee, "Inverse Design of Linear Induction Motor for Subway Using Neural Network and FEM", *Proc. of LDIA, Japan*, 1995.
- [6] 박승찬, 김규탁, 장석명, "리니어 모터의 설계 기술", *전기학회지*, 제 48권, 2호, pp.21-26, 1999.2
- [7] B.I.Kwon, K.I.Woo, S.Kim, S.C.Park, "Analysis for Dynamic Characteristics of a Single-Sided Linear Induction Motor Having Joints in the Secondary Conductor and Back-Iron", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.36, no.4, pp.823-826, 2000.