

주파수변환에 의한 3상 선형유도전동기의 추력 특성에 관한 연구

임 달호 김 학련 오강 도현
(한양 대학교 전기 공학과)

A study on the thrust characteristics of three phase linear induction motor by frequency variation

Dal-Ho Im Hak-Lyun Kim Do-Hyun Kang
(Department of Electric Eng. Han-Yang University)

ABSTRACT

In this paper, the governing equation of the three phase linear induction motor is induced by the method that current in the primary winding is assumed as a current sheet. The steady state flux and the flux that is produced by end effect are mathematically analysed by electromagnetic equation. Each thrust of these flux is respectively induced. So in this paper, it is proved that linear motor is highly affected by end effect at high speed and speed-thrust characteristics of three phase linear induction motor are shown by frequency variation in the actual model.

2장 3상 선형 유도전동기의 이론

2-1 해석을 위한 제반 조건 및 공극자계의 계산

2-1-1 1차 전기자권선에 의한 전류와 Current Sheet

그림 (1)은 4 극 24 Slot 3상 선형 전동기의 권선도를 나타내고 있다. 3상 교류전원을 인가하면 전류는 Slot 에 집중된 도체에만 흐르며 이 전류는 진행하는 자계를 발생시킨다. 이 경우 기자력은 이산적으로 분포되기 때문에 그대로 계산하는 것은 매우 어렵다. 계산식을 간단히 하기 위하여 선형 유도전동기의 실제 실험성을 잃지 않을 정도로 간소화 한 것이 그림 (2)이다. 그림 (1)과 그림 (2)가 같은 정현적인 기자력을 가진다고 가정하면 1차 전류는 식 (1)과 같이 Current Sheet로 표현된다.

$$i_1 = \frac{3\sqrt{2} W_L K_w}{p_1 \tau} \exp j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) = J_1 \exp j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x) \quad (1)$$

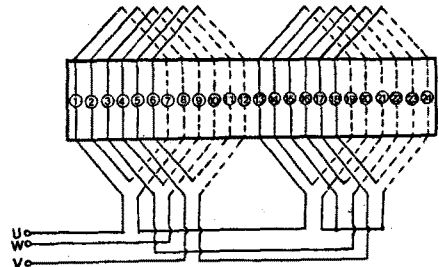


그림 (1) 3상 선형 유도전동기의 1차 권선도

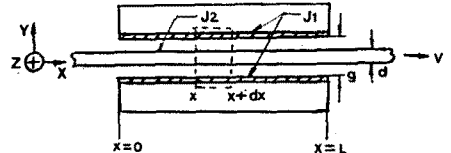


그림 (2) 이상화된 선형 유도전동기 MODEL

2-1-2 제반 조건 및 가정

그림 (1)의 모델을 그림 (2)의 모델로 간이화하고 전자기 이론의 계산식을 간단히 하기 위하여 아래와 같은 여러 조건의 가정이 필요하다.

- (1) 1차 여자권선에 의한 도체의 전류분포는 Z축 방향으로만 흐르고 공간적인 X 변화와 시간적 변화는 정현적 기본파만 취급한다.
- (2) 1차 축의 자성체는 무한대이다.
- (3) 2차 도체판에서의 포피효과는 무시하고 2차 축은 X 방향으로만 진행한다.
- (4) 공극 자계는 Y 방향 성분만 있다고 본다.

1장 서론

현재 산업분야에 널리 사용되는 전동기는 회전형이 주종을 이루고 있으며 직선운동계에 사용할 경우에는 기계적인 동력 변환 장치가 필요하다. 회전 운동은 원심력 때문에 이용할 경우 전달 기계적인 동력 변환 장치를 사용하지 않고도 사용되는 전동기는 직접 직선 추력을 발생시키는 선형전동기의 이용이 바람직하다. 선형유도전동기는 회전형 유도전동기를 축방향으로 잘라 펼친 형태로 이동자계에 의해서 직접 직선 추력을 발생시키는 기계적인 동력 변환 장치가 필요없으며, 원심력의 제한을 받지 않으므로 허용되는 범위 내에서 주파수만의 제논이면 거의 무제한으로 속도를 높일 수 있다. 또한 기동력과 제동력이 우수하며 보수가 간편하다. 산업이 고도화 Speed화 됨에 따라 선형유도전동기의 필요성이 증가되고 있다. 그 일부 응용예를 살펴보면 초고속 운전자속 전철, Liquid Metal Pump, Conveyor System, X-Y Plotter, 위치제어용 서보기구 등의 정오기기 산업에 응용되고 말로 그 응용범위는 더욱 확대될 것으로 기대된다.

선형유도전동기는 2차 축(이동자)에서의 와전류 및 공극에서의 자속관계에서 추력이 발생하고 전원주파수 및 극간격에 따라서 동기속도가 결정된다. 특히 선형 유도전동기는 회전형 유도전동기에 비해서 1차 축의 입구단과 출구단이 존재하기 때문에 단부효과(End-Effect)가 발생하는데 이 효과는 속도가 증가할수록 선형전동기의 운전에 상당한 악영향을 미친다.

따라서 본 연구에서는 선형전동기에 대해서 (1) 1차 전류가 일정할 때 Maxwell의 전자기방정식을 이용하여 공극자속을 구하고 (2) 일정한 주파수에서 속도(Sleep) 변화에 따르는 추력을 구하고, (3) 단부효과에 의한 End-Effect Wave의 침부깊이, 진행속도 및 추력을 구하고 (4) 전원주파수 변화에 따라 속도(Sleep) - 추력 관계를 규명한다. 특히 단부효과에 의한 자속 및 추력을 중점적으로 고찰하여 정상추력에 어떤 영향을 미치는지 검토하여 단부효과 감소에 대한 정성적, 정량적 기본자료를 제공하고자 한다.

2-1-3 공극 자계의 계산

Ampere의 법칙을 그림 (2)의 사각형 loop에 적용하면 식(2)을 얻을 수 있다.

$$\frac{g}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial x} = J_1 + J_2 \quad (2)$$

2차도체판에서 발생하는 변압기 기전력과 운동기전력에 의해서 2차도체판에 발생하는 Electromotive Force와 자속밀도의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial E_2}{\partial x} = \frac{\partial B}{\partial t} + v \frac{\partial B}{\partial x} \quad (3)$$

2차 유효전압, 표면저항률 및 유효전류사이에서 식 (4), (5)를 구한다.

$$E_2 = J_2 \rho_s \quad (4) \quad \rho_s = \rho / D \quad (5)$$

식 (2), (3), (4)에서 다음 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - \frac{v \mu_0 \partial B}{\rho_s g \partial x} - \frac{1}{\rho_s g} \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\mu_0 \partial J_1}{g \partial x} \quad (6)$$

위 식은 $\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}$ 는 $\frac{\pi^2}{4} B$ 로, $\frac{\partial B}{\partial x}$ 는 $-j\omega B$ 로, $\frac{\partial B}{\partial t}$ 는 $j\omega B$ 로 놓을 수가 있고 식 (6)은 2계 비제차 미분 방정식이므로 공극 자속 밀도의 일반해와 특이해를 구하면 다음과 같다.

$$B(x, t) = B_0 \exp(j\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \delta_0) + B_1 \exp(-\frac{\alpha_1}{\tau} x + j(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x + \delta_1)) + B_2 \exp(\frac{\alpha_2}{\tau} x + j(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x + \delta_2)) \quad (7)$$

B_0 와 δ_0 는 식 (6)의 특이해에서 구할 수 있는데 식 (8)과 식 (9)로 나타낸다.

$$B_0 = \sqrt{\frac{(\frac{\pi}{\tau} B_0)^2 + (\frac{1}{\rho_s} (u_0 - v))^2}{\mu_0 \tau (u_0 - v)}} \quad (8) \quad \delta_0 = \tan^{-1} \frac{\pi \rho_s g_0}{\mu_0 \tau (u_0 - v)} \quad (9)$$

α_1, α_2 그리고 τ_0 는 식 (6)의 일반해에서 구할 수 있는데 다음과 같다.

$$\alpha_1 = \frac{2 \rho_s g_0}{\rho_s g_0 X - \mu_0 v} \quad (10) \quad \alpha_2 = \frac{2 \rho_s g_0}{\rho_s g_0 X + \mu_0 v} \quad (11)$$

$$\tau_0 = 2\pi / \gamma \quad (12)$$

여기서 X Y는 다음과 같다.

$$X = \frac{2\omega \mu_0}{Y \rho_s g} \quad (13)$$

$$Y = \frac{\mu_0}{\rho_s g_0} \sqrt{\frac{-v^2 + \sqrt{v^2 + (\frac{4\omega \rho_s g_0}{\mu_0})^2}}{2}} \quad (14)$$

2-2 경계 조건에 의한 공극 자계의 상수 결정

식 (7)에서 상수는 B_1, δ_1, B_2 및 δ_2 이다. B_1 항은 forward traveling wave 이고 B_2 항은 backward traveling wave 이고 $v_0 = 2\omega f$ 이다. B_2 항의 침부길이 α_2 는 매우 적으므로 backward traveling wave는 무시한다. 식 (3)에서 공극의 입구단에서 자속은 급격히 변화하므로 다음 조건이 성립된다.

$$\left| v \frac{\partial B}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right| \quad \text{그러므로 식 (3)은 다음과 같이 된다}$$

$$\rho_s \frac{\partial J_2}{\partial x} = v \frac{\partial B}{\partial x} \quad (15)$$

식 (15)에서 자속의 누설이 없으면 $x < 0$ 에 대해서 $B=0, J_2=0$ 이므로 식 (16)이 유도된다.

$$J_2|_{x=0} = \frac{v}{\rho_s} B|_{x=0} \quad (16)$$

고속 운전시 자계는 입구단에서 매우 적어지므로 J_1 의 여자는 무시할 정도가 되므로 $J_1 = -J_2|_{x=0}$ 이 성립하므로 식 (17)식이 유도된다.

$$B|_{x=0} = -\frac{\rho_s}{v} J_1|_{x=0} \quad (17)$$

식 (2)에 $\frac{\partial B}{\partial x}|_{x=0}$ 식 (16) 및 J_1 을 대입하면 B_1 과 δ_1 은 다음과 같다.

$$B_1 = -\frac{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{v} J_1 + B_0 \cos \delta_0\right)^2 + \left(\frac{\rho_s}{v} \frac{\pi}{\tau} B_0 \cos \delta_0\right)^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\rho_s g}{\alpha_1 v \mu_0}\right)^2 + \left(\frac{\rho_s g \pi}{v \mu_0 \tau}\right)^2}} \quad (18)$$

$$\delta_1 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\rho_s g \pi B_0 \cos \delta_0}{\mu_0 \tau + v B_0 \cos \delta_0} \right\} - \tan^{-1} \frac{\rho_s g \pi}{1 + \frac{\rho_s g}{\alpha_1 v \mu_0}} \quad (19)$$

2-3 직선 추력의 계산

공극 자계의 해를 얻었으므로 선형전동기의 추력을 Lorentz의 힘의 방정식에서 구한다.

$$F = D \int_0^L \text{Re}(J_1) \text{Re}(B) dx = F_n + F_e \quad (20)$$

$$F_n = \frac{D L J_1 B_0}{2} \cos \delta_0 \quad (21)$$

$$F_e = \frac{D J_1 B_0}{2} \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1}\right)^2 + \pi^2 \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_0}\right)^2} \left\{ \frac{1}{\alpha_1} \left[\cos \delta_1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_1}\right) \cos\left(\delta_1 - \pi\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_0}\right)L\right) + \pi\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_0}\right) \times \left[\sin \delta_1 - \exp\left(-\frac{1}{\alpha_1}\right) \sin\left(\delta_1 - \pi\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_0}\right)L\right) \right] \right] \right\} \quad (22)$$

식 (21)는 정상자계의 B_0 성분에 의한 추력이고 식 (22)은 End-effect wave의 B_1 성분에 의한 추력이다.

3장 선형 유도 전동기 특성의 이론적 고찰

3-1 정상자계의 크기 및 진행속도의 고찰

정상자계의 크기는 식 (8)에 의해서 속도에 비례하고 진행속도 $v_s = 2\tau f$ 이다. 그림 (3)은 속도(Sleep)변화에 대한 B_0 의 크기를 나타내고 있다.

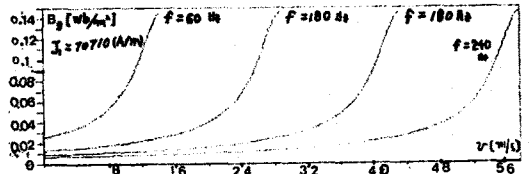


그림 (3) 2차도체판이동속도 (Sleep) 변화에 대한 B_0 크기 3-2 단부효과에 의한 파형 (End-effect Wave)의 고찰

3-2-1 단부에서 진행되는 파형의 침부길이

입구단과 출구단에서 진행되는 end-effect wave의 침부길이는 식 (10), (11)로 나타나며 이동속도(Sleep)에 대한 크기는 다음의 그림 (4), (5)와 같다.

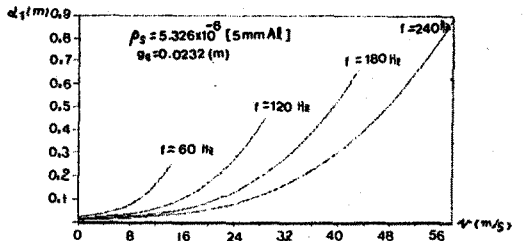


그림 (4) 2차 이동속도와 입구단 진행파의 침부길이

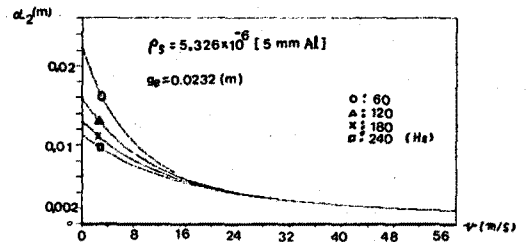


그림 (5) 2차 이동속도와 출구단 진행파의 침부길이

3-2-2 단부 효과에 의한 진행파 (end-effect wave)의 진행속도

End-effect Wave의 진행속도는 식 (23)와 같다. $v_e = 2\tau_0 f$ (23)

3-3 공극 자계의 특성고찰

3-3-1 1차의 길이 방향에 대한 공극자속의 특성

식 (7)에서 밝힌 바와 같이 입구단에서는 단부효과(end effect) 때문에 자속이 감소하는 것을 그림 (6)에서 알 수 있다. 주파수와 Sleep을 변화시킬 때 그림 (6)의 (a)는 1차의 길이 X에 대한 정상상태 자계이고 (b)는 입구단 End-effect Wave에 의한 자계이고 (c)는 합성 자계이다.

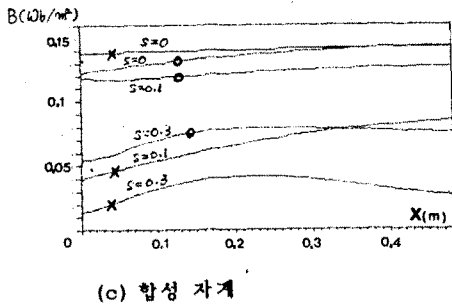
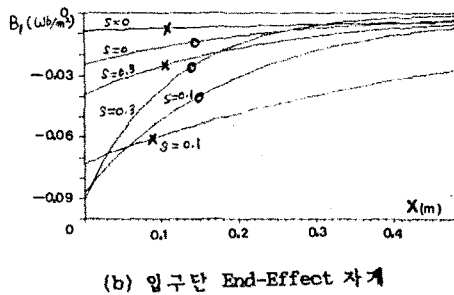
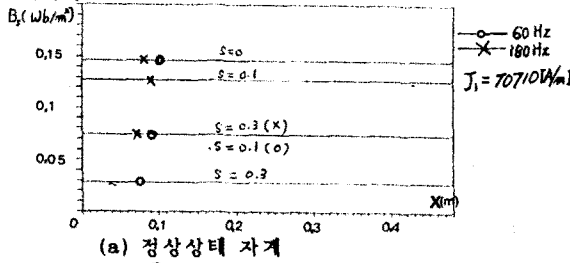
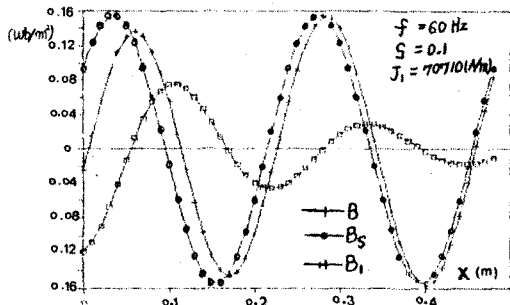


그림 (6) 1차의 길이 X변화에 대한 자속값

3-3-2 시간에 (wt=0) 대한 공극자속의 특성

시간에 (wt=0) 대한 공극자속의 변화방은 그림 (7)과 같다.



3-4 추력 특성 고찰

3-4-1 1차의 길이 변화에 대한 추력의 특성

철심의 길이 X 방향에 대한 추력은 식 (1)과 식 (7)의 곱에서 알 수 있다. 주파수와 Sleep을 변화시킬 때 그림 (8)의 (a)는 X에 대한 정상추력이고, (b)는 End-Effect Wave에 대한 추력이고, (c)는 합성추력이다.

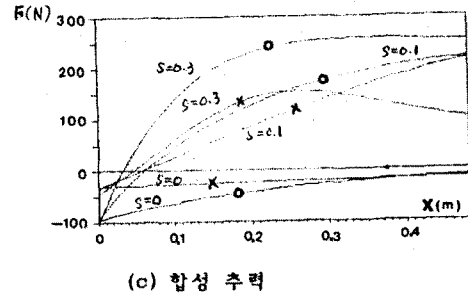
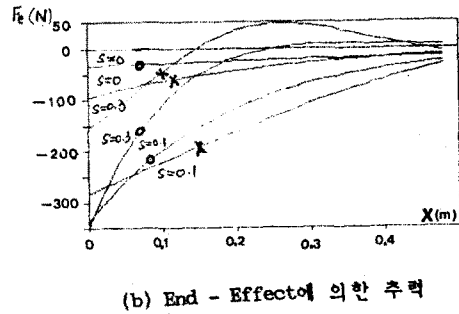
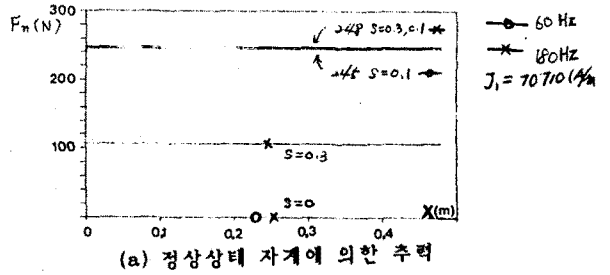


그림 (8) 철심의 길이 X 변화에 대한 추력의 크기

3-4-2 시간에 (wt=0) 대한 추력의 특성

시간에 (wt=0) 대한 추력의 변화방은 식 (1)과 식 (7)의 곱에서 알 수 있다. 그림 (9)는 X에 대한 추력곡선 이다

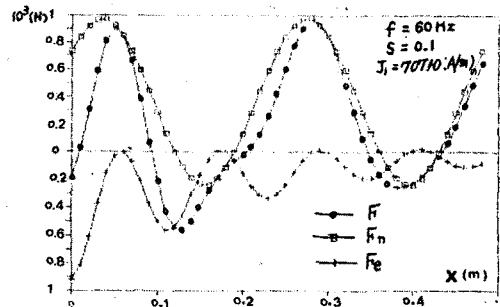
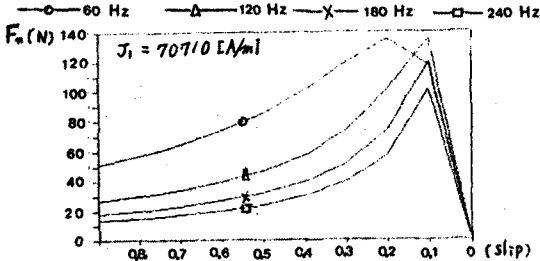


그림 (7) 시간에 (wt=0) 대한 공극자속의 크기

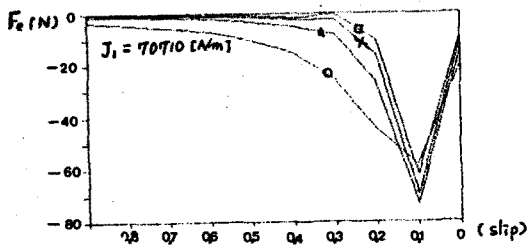
-75- 그림 (9) 시간에 (wt=0) 대한 추력의 크기

3-4-3 주파수 및 이동속도(Sleep)변화에 대한 추력특성

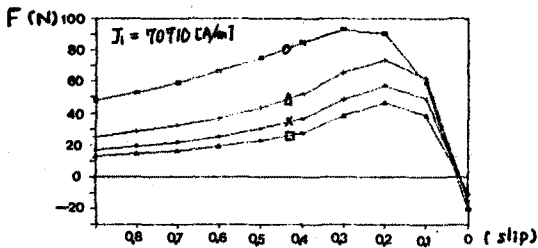
2차의 이동속도(Sleep) 변화에 대한 추력특성은 식 (20), (21), (22)로 나타난다. 주파수 및 이동속도(Sleep)를 변화시킬때 그림(10)의 (a)는 정상추력, (b)는 End-Effect Wave에 의한 추력 (c)는 합성추력을 나타내고 있다.



(a) 속도변화에 대한 정상상태 추력



(b) 속도변화에 대한 End - Effect Wave의 추력



(c) 속도변화에 대한 합성추력

그림 (10) 주파수 및 속도(Sleep)변화에 대한 추력

4장 결론

본 연구에서는 주파수를 변화시킬때 선형전동기의 기본 특성을 제시하였다. 실제모델에 적용하여 End-Effect에 의한 공극자속 추력을 계산하여 선형유도 전동기의 고속운전시 약영향을 미친다는 것을 입증 하였다. 1차의 길이방향에 대해서 각 부분의 추력이 End-Effect의 영향 때문에 일치하지 않았다. 본 연구에서 제시한 자료는 주파수변환을 이용한 속도제어시 유용하게 사용할 수 있다. 또한 본 연구는 End-Effect의 감소에 대한 기본자료를 제공할 수 있다.

참고 문헌

- 1) 임달호, 이승현, "전기기기", 보성문화사, 1980
- 2) 박민호, "유도기기", 동명사, 1985
- 3) Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction Motors", John Wiley and Sons, 1979
- 4) S.A. NASAR, I.BOLDEA, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley and Sons, 1976
- 5) 장석명, "직선형 유도전동기의 운전 특성 해석 및 최적설계에 관한 연구", 한양대 대학원, 1985
- 6) E.R. Lathwaite, "Induction Machines For Special Purpose", London George Newnes Limited, 1966
- 7) S.Yamamura, H.Ito and Y.Ishikawa, "Theory of the Linear Induction Motor and Compensated Linear Induction Motor", IEEE Trans. PAS, July / August, 1972

참조

1. 부호 설명

- i_1 : 1차 표면전류(Current Sheet) 순서치
- W : 1차 1상당 권선수
- h : 1차 선간 전류
- K_w : 권선 계수
- ω : 각 주파수 (rad/sec)
- J_1 : 1차 표면전류밀도 (A/m)
- J_2 : 2차 표면전류밀도 (A/m)
- B : 공극의 자속밀도 (Wb/m)
- E_2 : 2차에 유기되는 Electromotive Force (V/m)
- v : 2차 도체의 속도 (m/s)
- ρ : 2차 저항률 ($\Omega \cdot m$)
- v_s : 정상자계의 진행속도 (m/s)
- α_1 : 입구단 end-effect wave의 침투깊이 (m)
- α_2 : 출구단 end-effect wave의 침투깊이 (m)
- $2.7e$: end-effect wave의 파장 (m)
- v_e : end-effect wave의 진행속도 (m/s)
- F_n : 정상 자계에 의한 추력 (N)
- F_e : End-Effect Wave에 의한 추력 (N)
- F : 정상자계와 end-effect wave에 의한 합성 추력 (N)
- D : 1차 철심의 폭 (m)

2. 3상 선형 전동기의 사양

	명칭	기호	수치	비고
1차측	극간격	τ (m)	0.12	
	극수	$2p$ (극)	4	
	도체수	(개)	4800	
	공극	g (m)	0.02	
	CATER 계수	K_c	1.16	
	유효 공극	g_e (m)	0.0232	
	전원 주파수	f (Hz)	60-240	
2차측	1차측 길이	L (m)	0.48	
	철심 크기	(m)	$\begin{matrix} 0.495 \\ 0.436 \end{matrix} \times 0.1904$	
	동기속도	U_s (m/s)	14.4-57.6	
	표면 저항률	ρ_s (Ω)	5.326×10^{-6}	Al
	부자속	μ_0 (H/m)	$4\pi \times 10^{-7}$	
	두께	d (m)	0.005	
2차측 크기	크기	(m)	$\begin{matrix} 1 \\ 0.75 \end{matrix} \times 0.005$	원판형
	동작반경	r (m)	0.875	