

단차 편축식 선형 유도전동기를 구동원으로 한 반송시스템  
개발에 관한 연구

임 달 호 . 이 철 직 . 조 운 현

한 양 대 학 교

A STUDY ON THE TRANSPORTATION SYSTEM DEVELOPMENT DRIVEN BY  
SHORT PRIMARY SINGLE SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR

Dal -ho Im . Cheol - jick Ree . Yun -hyun Cho\*

Han Yang University

ABSTRACT

In this paper, the thrust force characteristic of SLIM according to the variation of several parameters was calculated from the fundamental equation based on Maxwell's electromagnetic equation to design the transportation system which is driven by short primary single sided linear induction motor.

The transportation system of moving secondary was constructed by the design values calculated on the base of simulated data and this values were compared to experimental values, and also the control method of transportation system was proposed.

1. 서 론

현재 산업분야의 생산공정에 주로 적용하고있는 반송 시스템은 회전형 전동기를 벨트, 기어, 풀리등 동력 변환 장치를 사용하여 회전 운동으로 바꾸어 사용하는 간접 구동방식으로 동력 전달 효율이 좋지 않을 뿐만 아니라 보수, 점검이 어렵다.

이러한 직선 운동이 요구되는 시스템에 직접 추력을 얻을수 있는 선형전동기를 반송장치의 구동으로 사용하면 다음과 같은 장점이 있으므로 여러 선진국에서는 연구 개발이 활발히 진행 중이다.(1)(2)

- 1). 벨트, 기어, 풀리등의 동력 전달이 불필요하므로 반송물을 직접 운송 가능하기 때문에 시스템의 구조가 간단하여 신뢰성을 높일 수 있으며 보수, 점검이 용이하다.
- 2). 비접촉구동이 가능하기 때문에 저소음, cleaning 운전이 가능하다.
- 3). 원심력에 의한 속도 제한이 없기 때문에, 고속반송이 가능하다.
- 4). 일반적인 선형 유도 전동기는 수하특성을 가짐으로 전압, 주파수제어의 제어성이 좋다.
- 5). 반송로측에 선형 전동기의 1차측을 설치하는 지상 1차 방식에서는 집전장치가 없는 codeless반송이 행해지며, 반송 carrier가 전동기 위에 왔을 때 전동기에 통전하는 간헐 통전 방식이 가능하기 때문에 에너지를 절약할 수 있다.

이상과 같은 장점을 보안할 수 있는 반송시스템을 구축하기 위해서 본 연구에서는 1차적으로 편축식 선형 유도전동기의 각종 기본특성을 검토하기 위해 Maxwell의 전자방정식으로부터 기본방정식을 유도하고 변수분리법으로 해석하여 선형전동기의 각종 변수에 따른 추력 특성을 고찰하였으며 이것을 토대로하여 반송시스템의 실험기를 지상 1차방식으로 설치하고 PLC (Prog-ammable Logic Controller)를 사용하여 전체시스템을 Sequence제어하였다.

2. 전자계 이론을 기초로 한 기본방정식

2.1 해석 모델 및 가정

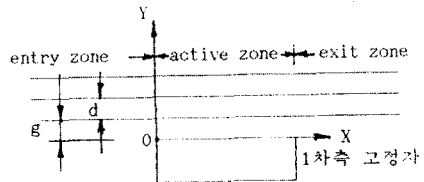
그림1과 같은 편축식 선형 유도전동기의 해석 모델에 대해 2차원적으로 해석하기 위한 가정은 다음과 같이 두었다.

- 1). 1차 고정자 철심의 슬롯효과는 무시하고, 1차 고정자 전류분포는 식(1)과 같이 current sheet로 하고 active zone(0<X<L)에서 z축 방향성분만 존재한다.(3)

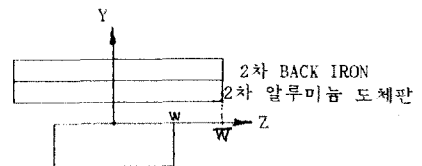
$$J_0 = J_{sz} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau}x)} \quad (1)$$

$$J_{sz} = \frac{3\sqrt{2}NIkw}{\tau p}$$

- 2). 1차측 고정자와 2차측 back iron의 두차율은 무한대이며 도전율은 영(zero)이다.
- 3). 자계진행 방향에 대하여 2차 도체판은 충분히 길고 2차도체의 표피효과는 무시한다.
- 4). 고정자표면전류는 정현파 진행자계분포를 하며 누설자속은 없다.



a) 정 면 도  
a) front view



b) 측 면 도  
b) side view

그림 1. 해석 모델  
Fig 1. analysis model

2.2 자속 밀도 및 추력

이상의 가정에서 편축식 선형 유도전동기의 각 영역에서의 자속밀도에 관한 편미분방정식을 유도하기 위해 Maxwell의 전자방정식을 기초로 하여 추력특성 방정식을 구하면 다음과 같다.<sup>6)</sup>

1) Active zone (0<X<L)

$$B_{yx}(\alpha, z) = B_0 e^{j\frac{\pi}{2}z} + A_1 e^{-\gamma_1 x} + A_2 e^{-\gamma_2(\alpha-x)} \cosh \frac{\pi z}{2\beta} \quad (2)$$

$$B_0 = \frac{j \frac{\pi}{2} \left( \frac{\pi}{2} \right) J_{s0}}{\left[ \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 + j \frac{\mu_0 d}{\rho_s g} (\omega - \frac{\pi}{2} v_x) \right]} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \alpha_1 + j \frac{\pi}{2}, \quad \gamma_2 = \alpha_2 + j \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

$$\alpha_1 = \frac{\rho_s g X - \mu_0 d \omega}{2 \rho_s g}, \quad \alpha_2 = \frac{\rho_s g X + \mu_0 d \omega}{2 \rho_s g} \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{\pi \rho_s g}{\mu_0 d} X \quad (6)$$

$$X = \left[ \left( \frac{\mu_0 d v_x}{\rho_s g} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{3\omega} \right)^2 + \left( \frac{\mu_0 d \omega}{\rho_s g} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{3\omega} \right)^2 + 4 \left( \frac{\mu_0 d \omega}{\rho_s g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

2) Entry zone(X<0), Exit zone (X>L)

$$B_{yx} = A_4 e^{\gamma_3 x} \cosh \frac{\pi z}{2\beta} \quad (\alpha < 0) \quad (8)$$

$$B_{yx} = A_3 e^{-\gamma_4(\alpha-x)} \cosh \frac{\pi z}{2\beta} \quad (\alpha > L) \quad (9)$$

$$\gamma_3 = \alpha_3 + j \frac{\pi}{2}, \quad \gamma_4 = \alpha_4 + j \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

$$\alpha_3 = \frac{\rho_s g X - \mu_0 d \omega}{2 \rho_s g}, \quad \alpha_4 = \frac{\mu_0 d \omega + \rho_s g X}{2 \rho_s g} \quad (11)$$

$$\tau_2 = \frac{\pi \rho_s g}{\mu_0 d \omega} X_1 \quad (12)$$

$$X_1 = \left[ \left( \frac{\mu_0 d v_x}{\rho_s g} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{3\omega} \right)^2 - \frac{4 \rho_s \mu_0 d \omega}{g} + \left( \frac{\mu_0 d \omega}{\rho_s g} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{3\omega} \right)^2 + \frac{4 \mu_0 d \omega v_x}{g} + \left( \frac{\mu_0 d \omega}{\rho_s g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

- 여기서  $B_y$ : 공극 자속밀도의 Y축 성분 (Wb/m)  
 $J_{s0}$ : 1차 전류의 면전류 밀도 (A/m)  
 $\omega$ : 전원의 각주파수 (rad/s)  
 $v_x$ : 동기 속도 (m/s)  
 $v_x$ : 2차속의 이동 속도 (m/s)  
 $\tau$ : 극 간격 (m)  
 $g$ : 공극의 길이 (m)  
 $\rho_s$ : 2차 도체판의 저항 (2.0m)  
 $d$ : 1차속과 2차속의 폭의 비  
 $d$ : 2차 알루미늄 도체판의 두께 (m)  
 $S$ : 슬립  
 $L$ : 1차 고정자 철심의 길이 (m)  
 $w$ : 1차 고정자 철심의 폭 (m)  
 $W$ : 2차속의 폭 (m)

식(2), (8), (9)의 각 미지수 A1, A2, A3, A4는 (Z=0, X=0), (Z=0, X=L)의 지점에서 자속 밀도 및 전류의 연속 조건에 의해서 결정되며 식(2)에서 B<sub>s</sub>항은 정상진행파, A1는 정방향 감쇠진행파, A2는 역방향의 감쇠 진행파를 나타낸다.

전동기의 2차도체판에 발생하는 추력은 고정자의 1차 면전류(current sheet)와 쇄교하는 공극자속밀도 B<sub>y</sub>의 사이에 작용하는 Lorentz의 힘의 공식으로부터 합성추력 F<sub>x</sub>(N)은 식(14)과 같이 주어지며 이때 작용하는 각성분의 힘은 정상자계 B<sub>s</sub>성분에 의해 발생하는 추력 F<sub>c</sub>와 단부효과에 의해 발생하는 정방향 진행파 자계에 의해 발생하는 추력 F<sub>a</sub>로 표현할 수 있다.

$$F = \frac{1}{L} \int_{-w}^w \int_0^L \text{Re}(B_y J_s^*) dx dz \quad (14)$$

$$= F_c + F_a + F_b \quad (15)$$

$$F_c = L W \text{Re}(B_s J_s^*) \quad (16)$$

$$F_a = \text{Re} \left\{ \frac{2\omega W}{\pi} A_1 J_s^* \sinh \frac{\pi W}{2\beta} \left( \frac{e^{j\frac{\pi}{2}z} - 1}{j\frac{\pi}{2}} \right) \right\} \quad (17)$$

$$F_b = \text{Re} \left\{ \frac{2\omega W}{\pi} A_2 J_s^* \sinh \frac{\pi W}{2\beta} \left( \frac{e^{j\frac{\pi}{2}z} - e^{j\frac{\pi}{2}L}}{j\frac{\pi}{2}} \right) \right\} \quad (18)$$

3. 편축식 선형 유도전동기의 특성

본 해석과정에서 얻은 특성 방정식에 부록과 같이 편축식 선형 유도전동기의 주요 제원을 대입하여 구한 계산치와 본 연구의 반송시스템의 실험기에서 구한 실험치를 아래에서 비교, 검토하였다.

3.1 속도 - 추력 특성

그림 (2)는 슬립 S이 0 - 1까지의 변화에 따른 편축식 선형 유도전동기의 추력 특성 곡선으로 입력전류 I<sub>s</sub>=25(A), 공극의 길이 G=3(mm)로 일정하게 유지하였을 때 식 (2)로부터 정상파 진행자계에 의해 발생하는 추력과 입구 및 출구의 단부효과에 의해 발생하는 추력의 각 성분을 표시하였다.

여기서 동기속도 V<sub>s</sub>=21.6(m/s)의 저속도 전동기로 추력은 시동시에 최대이며 속도가 증가할수록 감소하는 수하특성을 볼 수 있는데 이러한 특성은 회전형 유도전동기와 달리 속도, 위치제어가 용이함을 알 수 있다. 또, 동기속도에서도 기존의 회전형 유도전동기와 달리 정의 추력을 발생하는데 이것은 입구단의 단부효과에 의해 발생하는 추력의 결과로 본 실험기와 같은 동기속도가 낮은 전동기의 경우에 일어나는 현상이다.

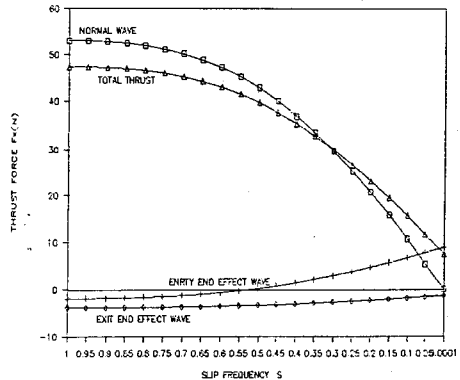


그림 2. 속도 - 추력 곡선  
Fig.2 speed-thrust curve

3.2 공극 길이변화에 따른 추력 특성곡선

선형 유도전동기는 기존의 회전형 전동기와 달리 공극이 주행로의 상태에 따라 다르므로 공극의 길이에 따라 발생 추력도 변한다. 따라서 그림(3)과 같이 공극길이가 증가할수록 추력이 감소하며 정지시에 최대추력이 발생하므로 적당하게 공극을 유지하면 최대 추력의 범위내에 필요한 추력을 얻을 수 있으므로 반송시스템의 기본 설계시 공극의 조절이 가능하도록 시스템을 구성할 필요가 있다.

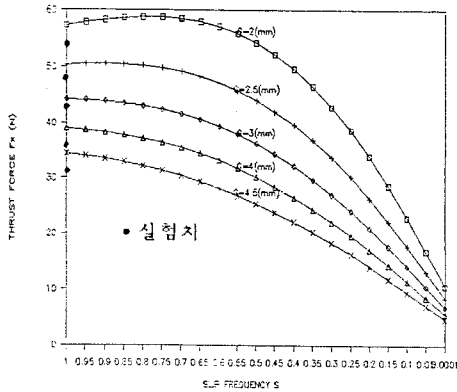


그림 3. 공극 길이 - 추력 곡선  
Fig.3 airgap length-thrust force curve

3.3 2차 알루미늄의 두께와 1차속과 2차속 폭의 비에 따른 추력특성

그림 (4)는 2차 도체판의 두께에 따른 추력특성을 나타낸 것으로서 기계적 공극의 길이G를 일정하게 유지하고 2차속 back iron에 부착된 알루미늄 도체판의 두께 d를 1.5(mm)에서 9(mm)까지 변화시켜 슬립 S의 변화에 대한 추력 곡선을 나타낸 것이다. 여기서 도체판의 두께를 증가시키면 2차속 저항이 증가하므로 비례추이 관계를 성립하는 최대추력을 발생하나 그때 슬립은 두께d를 증가함에 따라 더불어 감소한다. 따라서 반응시스템의 선형 유도전동기의 설계에 있어서 S=1근방에서 최대추력이 필요하므로 최적치 두께의 선정이 필요하다.

또 그림 (5)는 1차속과 2차속의 폭의 비에 따른 추력 특성 곡선으로 폭의 비를 1에서 2배까지의 변화했을 때 슬립변화에 따른 특성으로 저속 영역에서는 그다지 영향이 없으나 동기속도 근방에서는 폭이 넓을 수록 추력이 조금 증가함을 알 수 있다.

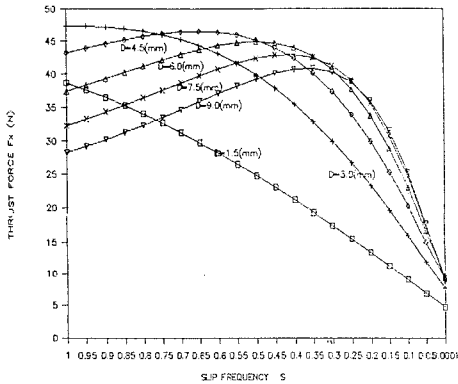


그림 4. 2차속 알루미늄 도체판 두께에 따른 속도-추력 곡선  
Fig.4 seed-thrust force curve according to the secondary AL.thickness variation

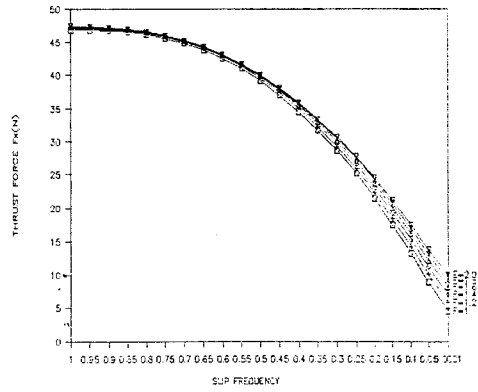


그림 5.1,2차속의 폭의비율에 따른 추력 곡선  
Fig.5 thrust force curve according to the ratio of the primary and the secondary

3.4 2차속과 1차속고정자의 중첩율에 따른 추력특성

반송장치의 지상1차 방식에 적용되는 선형 유도전동기의 2차속은 유한길이이며 시동과 더불어 중첩율은 변화한다. 추력은 중첩율에 따라 증가하다가 완전히 중첩되었을 때 최대의 추력을 발생하며 2차속이 고정자에 중첩이 되지 않을 때는 추력이 영(zero)이 된다. 따라서 실제 반송장치의 설계에 있어서 이러한 중첩율을 고려하여 가속, 타성, 감속등 제어 알고리즘을 구성할 필요가 있다.

그림 (6), (7), (8)는 1차 입력전류의 변화, 주파수의 변화, 두께의 변화에 따른 특성곡선으로 입력전류를 증가할 수록 추력은 증가하나 주파수와 도체판의 두께는 증가할 수록 추력은 감소한다.

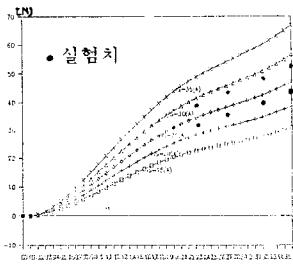


그림 6. 입력전류의 변화에 따른 추력 곡선  
Fig.6 thrust force according to input current variation

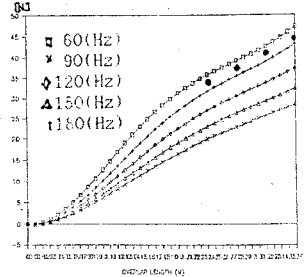


그림 7. 주파수 변화에 따른 추력 곡선  
Fig.7 thrust force according to frequency variation

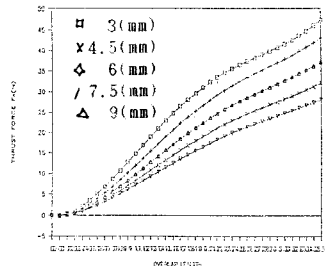


그림 8. 2차알루미늄의 두께변화에 따른 추력 곡선  
Fig.8 thrust force according to the secondary AL. thickness variation

4. 반송장치의 응용 예

이상에서 검토한 자료를 토대로 하여 생산 공정 라인에서 편속식 선형 유도전동기를 구동원으로 하는 자동반송시스템의 응용이 가능한 반송시스템의 실험기는 그림(9) 과 같다.



그림 9. 반송 시스템의 실험기  
Fig.9 experimental device of conveyor

4.1 제어 시스템의 구성

제어장치는 그림(10)같이 PLC(Programmable Logic Controller)를 사용하여 전체 시스템을 정해진 운전pattern에 따라 sequency제어하고, 구동전원은 인버터는 VVVF방식으로 전압/주파수의 비에 의한 입력을 설정하여 속도변경이 용이하게 하였다. 또, 양쪽 Lifter는 3상 유도전동기로 구동되며, 정위치 제어는 전자석에 의해 제어 되게 하였다.

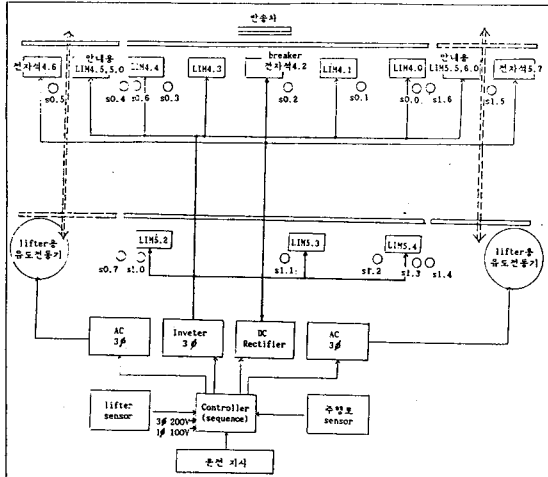


그림10.편속식 선형 유도전동기 제어시스템  
Fig.10 control system of SLIM

4.2 운전 pattern

이 장치는 주행로에 편속식 선형유도전동기를 그림(10)와 같이 설치해 놓고 주행로에 설치된 자기센서에 의한 반송carrier의 위치를 검출하여 그 위치에 대응하는 전동기에 순차 여자하는 방식이므로 반송carrier는 가속, 타주, 감속, 정지하며 주행한다. 그림(10)에서 LIM 4.0에서 전자석 breaker까지의 운전pattern을 그림(11)에 표시하였다. 이러한 운전pattern에 따른 동작흐름 선도는 그림(12)과 같

며 이에 대한 PLC의 Ladder Diagram은 그림(13)과 같다. 그림에서 LIM 및 전자석, 센서의 번호는 PLC의 입력접점과 출력접점의 ADDRESS번지와 일치하도록 하였다.

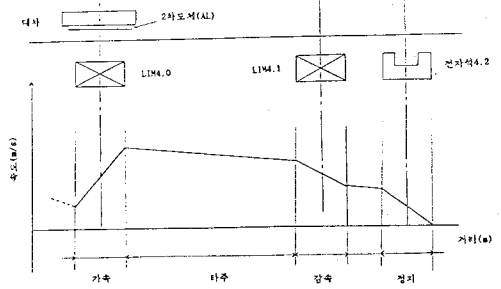


그림 11. 운전 PATTERN  
Fig.11 driving pattern

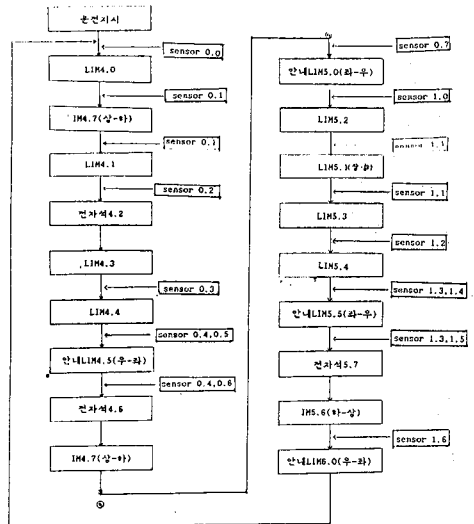


그림 12. 동작 흐름 선도  
Fig.12 operating flow chart

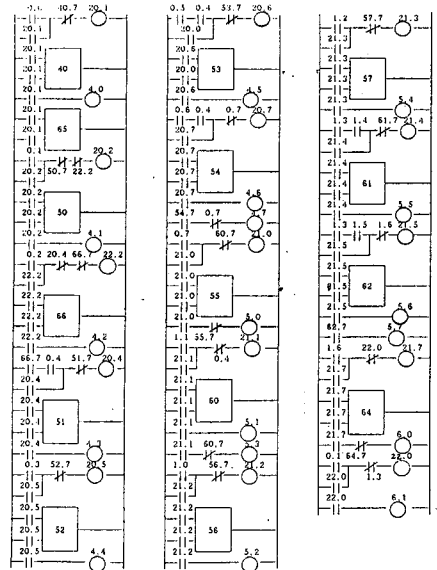


그림 13. Ladder Diagram  
Fig.13 ladder diagram

5. 결 론

본 연구에서는 단1차 편속식 선형 유도전동기를 Maxwell의 전자방정식을 기초로 한 특성식으로 부터 각종 변수를 변화하여 전동기특성을 고찰하고 이로부터 반송시스템의 실험기 제작시와 운전pattern 결정시에 필요한 설계자료를 제시하였다.

또 선형 유도전동기를 응용한 지상 1차방식인 반송시스템의 제어장치 시스템 구성방법을 제시하므로 앞으로 선형 유도전동기를 응용한 반도체공장 clean room 내의 부상식 반송시스템이나, OA, FA분야의 응용시에 참고 자료가 될것으로 사료된다.

참고 문헌

[1] S.A.Nasar : "Electromagnetic fields and force in a linearinduction motor taking into account edge effects" Proc.IEE,Vol 116, No.4, pp 605-609  
 [2] Johnk. Dukowicz : "Analysis of linear induction machines with discrete windings and finite iron length" IEEE Trans.Vol.PAS-96, No1, January, Feb,1977  
 [3] H.Bolton: "Tranverse edge effects in sheet rotor induction motors", ibid,1969,116, pp725-731  
 [4] T.W.Preston and A.B.J.Reece: " Transverse edge effect in linear induction motors"Proc.IEE, Vol.116, pp 973-979, June,1969  
 [5] I.Boldea, S.A.Nasar: "Linear motion electromatic systems", 1985  
 [6] S.a.Nasar, I.boldea; "Linear Motion electric machines", 1976, John Wiley & son  
 [7] 임달호, 조운현, 김동진 ; "양속식 선형 유도전동기의 2차원 자속분포 해석에 관한 연구", 대한전기학회 추계종합대회 논문집, 1988. 11, P. 329

부 록

\*\* 반송시스템의 사양 \*\*

주행 방식	차륜 주행 방식
전동기 방식	단1차 편속식
레일 전장 길이	7 m
반송 carrier크기	900×500 mm 길이 폭
인버터 사양	70kw 3 $\phi$ 0~200V 202A VVVF방식
PLC 사양	입력 접점수:16개 출력 접점수:18개

\*\* 편속식 선형 유도전동기의 사양 \*\*

1 차 속	2 차 속
극간격 : 180 mm	동기속도 : 21.6 m/s
극수 : 2	air gap 투자율: 4 x10 H/m
철심치수: 360x160x80 (mm) 길이 폭 두께	AL치수 : 880x240x4 (mm) 길이 폭 두께
전원주파수: 60 Hz	back iron 치수: 880x240x6 (mm) 길이 폭 두께
상당도체수 : 75 turn	AL도전율 : 5.5x10 $\Omega$ /m
상수: 3	
매극매상slot수: 3	
전원주파수: 60Hz	
상당도체수: 75 turn	