

자동반송 장치용 L.I.M.의 기동특성에 관한 연구

A Study on the Starting Characteristic Analysis of L.I.M. in Auto-Conveyor System

任 達 鎬* · 金 完 植** · 金 奎 卓**
(Dal-Ho Im · Wan-Sik Kim · Gyu-Tak Kim)

요 약

본 연구에서는 자동 반송 장치용 선형 유도 전동기의 기동특성을 등가회로를 이용하여 해석하므로써 반송장치용 선형 유도 전동기의 설계지표를 제시하였다. 이때의 각 회로 정수는 등가회로에 의한 해와 Maxwell의 전자방정식에 의한 해를 대응시켜 유도하였으며, 그 기본 특성을 실험치와 비교, 검토하므로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

Abstract- The design criteria of Linear Induction Motors (LIM) for Auto-Conveyor System are proposed by analyzing of starting characteristics using an equivalent circuit. By contrasting the solution of the equivalent circuit with that of Maxwell's equation, we induced the parameters of the circuit. Also, the utility of the design criteria has been shown by comparing the basic characteristics with experimental values.

1. 서 론

선형 전동기는 1891년 미국의 Bradly씨가 교류의 이동 자계에 의해 직선 추력을 발생시키는 전동기를 개발하여 방적기에 이용한 이후 지속적인 연구가 이루어져 현재 여러 분야에 응용되고 있다.

선형 유도 전동기는 일반 회전형 유도 전동기를

축방향으로 잘라 펼친 형태로 회전형 기기에 비해 공극이 크며, 입구단과 축구단의 존재로 인해 발생하는 단부효과, 횡방향의 Edge Effect 등 선형 전동기에서만 발생하는 특수한 현상들로 인하여 추력을 비롯한 제반 특성이 회전기에 비해 떨어지는 단점이 있다. [1]~[4]

그러나 이와같은 단점에도 불구하고 직선운동을 필요로 하는 시스템에서는 회전운동을 직선운동으로 변환시키는데 필요한 기어나 랭크등의 기구가 필요치 않아 이들 변환 장치에 의한 손실이나 소음, 진동등이 발생하지 않으며, 회전형 기기에 비해 운전속도에 제한이 없는 등의 장점으로 인하

*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

**正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士過程

接 受 日 字 : 1989年 1月 6日

1 次 修 正 : 1989年 3月 22日

여 초고속 운송용 전철, 자동 반송 장치, FA, OA 기기를 비롯한 정밀기기 산업에 널리 이용되고 있으며 앞으로 그 응용 범위는 크게 확대될 것으로 기대된다. [5]~[7] 특히 선형 유도 전동기를 자동 반송 장치에 응용하는 경우 롤러, 벨트등을 이용한 시스템에서 문제시 되는 슬립에 의한 가, 감속의 제한이 없으며, 기계적인 가동부 및 접촉부가 존재하지 않아 무소음 반송이 가능하다. [5]~[8] 또한 반송체가 선형 유도 전동기 위에 있을때만 통전되므로 종래의 컨베이어 시스템에 비하여 전력 소비량을 크게 절감시킬 수 있으며, 보수가 용이한 등의 여러가지 장점으로 인하여 크게 각광을 받고 있다.

이와같이 선형 유도 전동기를 자동 반송 장치에 응용하는 경우, 이동자를 빈번히 가, 감속하여야 하므로 기동특성의 정도 높은 해석이 선결과제이다. 따라서 본 연구에서는 일반 회전기의 특성해석에 널리 이용되고 있는 등가회로를 이용하여 자동 반송 장치용 선형 유도 전동기의 기동 특성을 해석하였으며 이때의 각 회로 정수는 Maxwell의 전자방정식으로부터 도출하여 실험치와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

2. 편축식 선형 유도 전동기

2.1 자동 반송 장치용 선형 유도 전동기

선형 유도 전동기는 크게 편축식과 양축식으로 나눌 수 있다. 그 중 편축식은 공극 유지가 용이하며 이동시키고자 하는 물체 및 레일등을 2차축으로 이용할 수 있으나 양축식에 비해 추력이 작고 2차축을 알루미늄, 동과 같은 도체로 구성할 때는 자기저항이 증가하여 추력이 감소하게 된다. 이와같은 단점을 보완하기 위하여 2차도체에 철과 같은 자성체 (back iron이라 한다)를 붙여 자기저항을 줄이고 있다. 이 경우 1차축과 back iron 사이에 이동방향과 수직인 방향으로 흡인력이 작용하여 주행특성을 저하시키므로 back iron의 두께 선택에 신중을 기하여야 한다. 이에 반해 양축식은 추력이 크고 2차축이 알루미늄등의 도체로 구성되므로 관성이 적은 전동기를 만들수 있으나 공극유지가 어렵고 구조가 복잡하므로 보수, 유지가 어려운 단점이 있다.

한편 선형 유도 전동기를 가동부의 선택여하에 따라 분류하면 1차축을 지상에 고정시킨 지상 1차 방식과 가동부로 만든 지상 2차방식으로 크게 나눌 수 있다. 지상 1차방식은 외력에 의해 가동부가 가, 감속되므로 속도제어에 제한이 따르며 시

스템 오프시 제 복귀에 문제가 있으나 보수가 용이하고 이동자가 2차축으로 구성되므로 하중이 적어 주행특성이 좋은 장점이 있다. 이에 반해 지상 2차방식은 전원이 이동부에 공급되므로 연속적인 추력을 발생하며 광범위한 속도제어가 가능하여 외란에 신속히 대처할 수 있다. 그러나 전원 급전 장치의 구성 및 보수가 어려우며 브러시 마모등의 치리가 복잡한 단점이 있다. 이와같은 이유로 인하여 자동 반송 장치에는 편축식 지상 1차방식이 주로 이용되고 있다. [5] [7]~[10]

2.2 해석 모델 및 등가회로

선형 유도 전동기를 부품 및 서류등을 반송하는 자동 반송 장치에 응용하는 경우, 이동자를 빈번히 가, 감속하여야 하므로 기동시 최대 추력이 발생하여야 하며, 반송속도는 단부효과를 무시할 수 있는 5~6(m/s)인 저속으로 운전하는 경우가 대부분이다. [4], [5], [8], [9] 한편 1차축과 2차축 사이의 공극은 가급적 적은 것이 효율 및 역률 면에서 유리하나 주행거리가 긴 반송장치에서 회전기처럼 공극을 작게하는 것은 기술적으로 거의 불가능하므로 3~5(mm)를 유지시키고 있다. [6], [7], [11]~[13] 따라서 그림 1, a)와 같은 저속 운전용 편축식 선형 전동기의 특성을 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 두었다.

- 1) 1차 여자권선에 의한 전류분포는 판전류로 가정한다.
- 2) 2차도체판의 포포효과는 무시하며 2차축은 x 축 방향으로만 이동한다.
- 3) 자계는 준 정상자계이며 이동방향으로의 변화는 정현적이다.
- 4) 단부 효과는 무시한다.
- 5) 각 해석영역의 재질은 선형, 등방성이며 균일하다.

그림 1, a)에서와 같이 1차축의 여자전류는 슬롯내의 코일에만 흐르므로 기자력이 이산적으로 분포하여 이를 그대로 취급하기는 어렵다. 따라서 선형 유도 전동기의 특성을 해석하기 쉽게하기 위하여 슬롯에 흐르는 전류와 등가적으로 같은 크기의 자속을 발생시키는 가정 1)의 1차축 판전류는 다음식으로 주어진다. [1], [3], [4], [11]~[13]

$$J_s = J_m e^{j(\omega t - \tau x)}$$

$$\text{단, } J_m = \frac{m(2N\sqrt{2}I_1)K_w}{2P} = \frac{\sqrt{2}mI_1K_wN}{P} \quad (1)$$

이다. 여기서 m : 상수, N : 상당 권선수, τ : 극

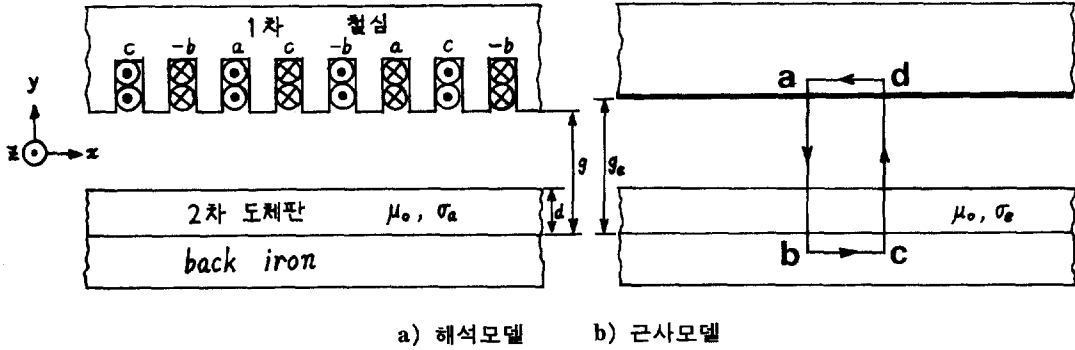


그림 1 편측식 선형 유도 전동기
Fig. 1 Single side L.I.M.

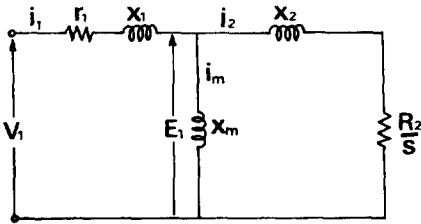


그림 2 등가회로
Fig. 2 Equivalent Circuit

간격, P :극쌍수, K_w :권선계수이다.
한편 자동 반송 장치용 선형 전동기는 위에서 언급한 바와 같이 단부 효과를 무시한다면 일반 회전기의 등가회로를 이용할 수 있으며 이를 그림 2에 나타내었다. 단 선형 전동기의 공극은 일반 회전형 기기에 비해 매우 커 공극자속밀도가 작으므로 철손은 무시한다.
그림 2의 등가회로로 부터

$$\dot{E}_1 = j X_m \dot{I}_m = (r_2/s + j X_2) \dot{I}_2 = \dot{Z}_2 \dot{I}_1 \quad (2)$$

$$I_1 = I_m + I_2 \quad (3)$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{\dot{E}_1}{I_1} = \frac{j X_m (r_2/s + j X_2)}{(r_2/s) + j(X_m + X_2)} \quad (4)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{(r_2/s)^2 + X_2(X_2 + X_m)}{(r_2/s) X_m} \quad (5)$$

$$P_2 = m I_2^2 r_2 / s \quad (6)$$

$$F_x = P_2 / U_s \quad (7)$$

$$\eta_2 = \frac{P_2}{m E_1 I_2 \cos \phi_2} \quad (8)$$

등의 기본 특성식을 얻을 수 있다. 여기서 P_2 : 2차 출력, F_x : 발생 추력, $\cos \phi_2$: 2차 역률, η_2 : 2차 효율, U_s : 동기속도이다.

3. 회로 정수 산정

그림 1, b) 처럼 근사화된 해석모델의 폐회로 abcd에 Maxwell의 전자 방정식을 적용하여 공극의 자속밀도를 계산하면 다음식으로 주어진다.

$$B_y = B_m e^{j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \phi_1)} \quad (9)$$

$$B_m = \frac{(j\pi/\tau \cdot \mu_0/g_e) \dot{I}_m}{(\pi/\tau)^2 + j\omega s \mu_0 \sigma_e d/g_e} = \frac{\mu_0 \dot{I}_m}{g_e (\pi/\tau) (sG - j)}$$

여기서 G 는 선형 유도 전동기의 성능 평가지수 가운데 하나인 Goodness factor로 $G = 2f\mu_0\sigma_e\tau^2d/\pi g_e$ 이며 $\phi_1 = \tan^{-1} 1/sG$ 이다. σ_e, g_e 는 슬롯의 영향, 횡방향 Edge Effect를 고려한 등가 도전율, 유효공극으로 다음과 같다. [2],[6],[11]

$$g_e = \frac{K_1 K_c}{K_{mt}} g \quad (10)$$

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{K_t K_s} \quad (11)$$

단 K_1 : 누설 보정계수, K_c : Carter계수, K_{mt} : 횡방향 Edge Effect에 의한 리액턴스 보정계수,

K_t : 횡방향 Edge Effect 보정계수, K_s : 표피효과 보정계수, g : 공극, σ : 도전율, d : 2차 도체판의 두께이다.

한편 공극의 이동자계에 의해 1차측에 유기된 기전력 \dot{E}_1' 는

$$\begin{aligned} \dot{E}_1' &= \sqrt{2}K_w N \cdot 2a \frac{\partial}{\partial t} \int_0^L B_g dx \\ &= -\sqrt{2} \cdot 2a K_w N \omega \frac{\tau}{\pi} B_m \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 단 $2a$ 는 1차 철심의 폭이다.

그러므로 1차 전류를 유지하기 위하여는 전원으로부터 E_1' 와 크기는 같고 방향이 반대인 기전력 E_1 를 인가하지 않으면 안되므로 $E_1 = -E_1'$ 에서

$$\dot{E}_1 = \sqrt{2} \cdot 2a \cdot K_w N \omega \frac{\tau}{\pi} B_m \quad (13)$$

이다. 따라서 식 (1)과 식 (13)으로부터 등가 2차 임피던스 Z_2 를 유도하면

$$\begin{aligned} \dot{Z}_2 &= \frac{\dot{E}_1}{I_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot 2a K_w N \omega \frac{\tau}{\pi} B_m}{P \tau j_m / (\sqrt{2} m K_w N)} \\ &= \frac{4ma(K_w N)^2 \mu_0 \omega \tau}{P g_e \pi^2 (sG - j)} \end{aligned} \quad (14)$$

이다. 그러므로 그림 2의 등가회로에서 $s=0$ 인 경우 2차측 임피던스는 무한대이므로 $\dot{Z}_2 = jx_m$ 으로 된다. 따라서 식 (14)으로부터

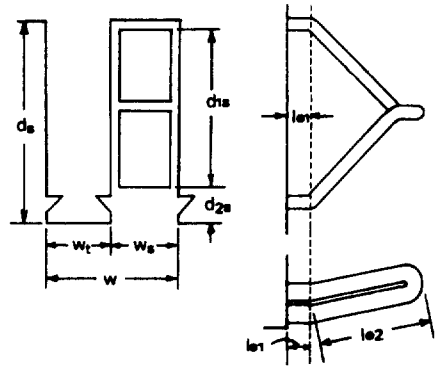
$$\begin{aligned} x_m &= \frac{4ma(K_w N)^2 \omega \mu_0 \tau}{P g_e \pi^2} \\ &= \frac{4ma(K_w N)^2 \mu_0 U_s}{P g_e \pi} \end{aligned} \quad (15)$$

이다. 한편 등가회로에 의한 임피던스 식 (4)와 Maxwell의 전자 방정식에 의해 유도된 임피던스 식 (14)는 같아야 하므로 2차 저항 및 리액턴스를 구하면

$$r_2 = \frac{4ma(K_w N)^2}{P \sigma_e d \cdot \tau} \quad (16)$$

$$x_2 = 0 \quad (17)$$

로 주어진다. 또한 그림 3과 같이 1차 관선을 시행한 경우의 r_1 및 x_1 은 종래의 설계 계산식 및



a) 슬롯 b) 코일단

그림 3 슬롯 및 코일단 치수

Fig. 3 Dimensions of Slot and Coil End

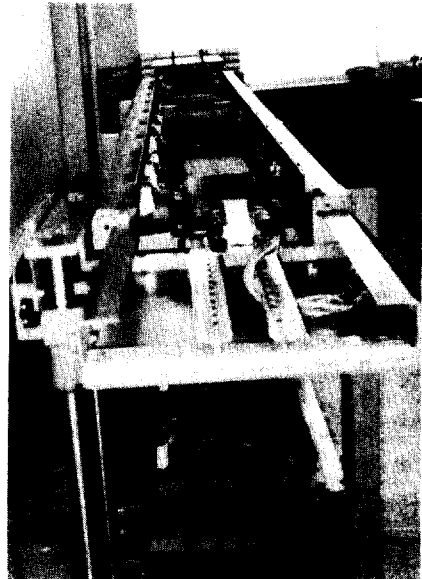


그림 4 시험기

Fig. 4 Experimental Machine

Kilgore의 식으로부터 유도하면 다음과 같다. [12], [14]

$$r_1 = (K_w N)^2 \cdot \frac{K_r 2\rho l_a}{K_w^2 2P q F_s W_s d_s} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} x_1 &= 8mf \cdot 2a \frac{(K_w N)^2}{2P} * 10^{-7} * \frac{K_{x1}}{K_w^2} \cdot \frac{20}{mq} \left(\frac{d_{2s}}{w_s} \right. \\ &\quad \left. + \frac{d_{1s}}{3w_s} \right) + \frac{4}{2a} (2l_{e2} + l_{e1}) \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 K_r : 교류 저항의 보정계수, F_s : 슬롯 점 접촉, K_{x1} : $1/4(3y_1/mq+1)$, y_1 : 슬롯 간격, l_a : 반 코일장의 길이(m)이다

4. 해석 결과 및 검토

본 연구에서 이용한 선형 유도 전동기의 정격 및 재원은 표1과 같으며 기동 추력은 이동자를 구속시킨 상태에서 CHATILL제 Spring balance(최대 눈금 15kg)로 측정하였다.

그림 5는 2차측의 두께가 3(mm)인 알루미늄판에 대하여 공극의 변화에 따른 각 파라메타 값의 변화를 나타내었다. 1차측과 2차측 사이의 간격을 최소 3(mm)로 한 경우 Goodness factor G는 7.6이며 공극을 증가시키기에 따라 감소하게 된다. 일반적으로 선형 유도 전동기는 단부등의 영향으로 슬립이 0인 경우에도 주행방향과 반대방향으로 제동력(Drag force)이 발생하게 된다. 따라서 슬립이 0일때 제동력을 없애도록 선형 유도 전동기를 설계하여야 하는데, 4극기의 선형 유도 전동기에서는 G값이 10인 경우 제동력이 발생하지 않아 이상적인 기기가 된다. [2],[6] 따라서 본 시험기의 G값을 10으로 높이기 위하여는 공극을 줄이거나 2차 도체판의 두께, 또는 극간격을 증가시켜야 한다. 그러나 2차 도체판의 두께를 증가시키면 자기적인 공극이 증가하게 되므로 G값 증가에 별 영향을 주지 못하며, 극간격을 증가시키면 동기속도가 증가하게 되어 본 반송 장치가 요구하는 주행속도를 초과하게 되므로 극간격 또한 임의로 증가시킬 수는 없다. 결국 G값을 10으로 하기위하여는 공극을 감소시켜야만 되는데 본 시험기의 경우 공극을 1.5(mm)로 하여야 한다. 그러나 이는 이동자 주행시 1, 2차측 사이에서 기계적인 접촉위험 및 주행거리가 긴 반송장치에서 공극을 작게하는 것은 매우 어려운 문제이므로 G값의 선택에 신중을 기하여야 한다.

한편 선형 유도 전동기에서 최대 추력은 $sG=1$ 인 경우 발생한다. [5] 따라서 기동시 최대 추력이 요구되는 반송장치에서는 $G=1$, 또는 그 부근의 값을 선택하여야 한다. 본 시험기에서는 공극이 42(mm)일때 G값이 1이되어 기동시 최대 추력이 발생하나 그 절대치가 너무 적어 효율 및 역률 특성이 극히 나쁘게 된다. 그러므로 G값을 증가시켜야 하나, 이 경우 슬립-추력 특성이 일반 회전기의 특성곡선과 같은 양상으로 나타나 기동시의 추력이 최대가 되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 이상적인 기기보다는 공극이 다소 증가되고, 동기속

도에서 다소간의 제동력이 존재하더라도 기동시 추력이 최대 발생 추력의 60%정도 되는 G를 택하

표 1 해석 모델의 정격 및 재원

Table 1 Rating and Dimension of Analysing Model

구 분	규 격
극간격 (τ)	0.091 (m)
극쌍수 (P)	2
slot수	21
slot당 도체수	50
철심폭 (2a)	0.158 (m)
철심두께	0.08 (m)
slot폭 (W_s)	0.009 (m)
slot깊이 (d_s)	0.03 (m)
Overhang길이 (l_e)	0.051 (m)
상 수 (m)	3
2차측 표면저항율 (ρ)	$2.6 * 10^{-8} (\Omega \cdot m)$
2차측 두께 (d)	3-5 (mm)
2차측 폭	0.26 (m)
back iron두께	0.004 (m)

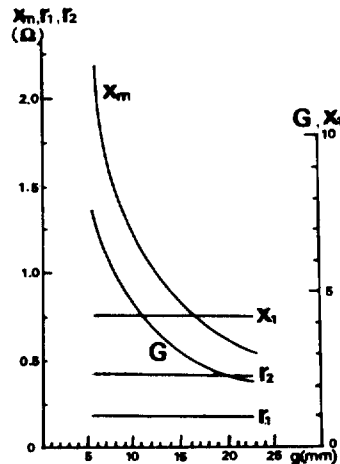


그림 5 시험기의 등가회로 정수

Fig. 5 The Parameter of Experimental Machine

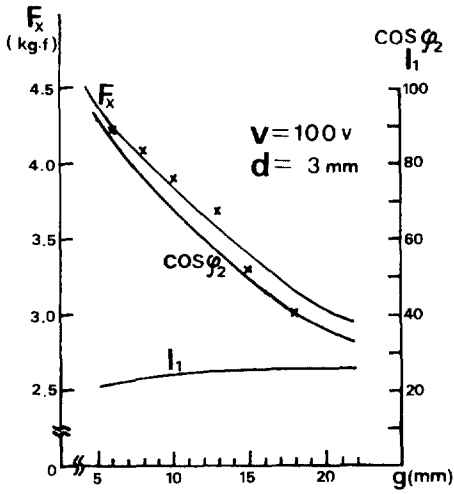


그림 6 기동시 특성
Fig. 6 Characteristics at Starting

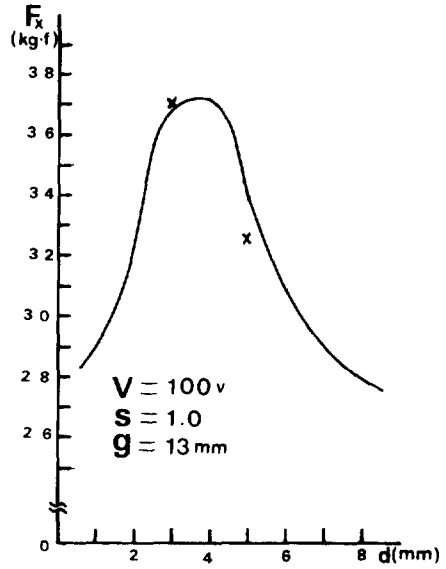


그림 8 2차 도체판 두께-기동 추력 특성
Fig. 8 Characteristics of Secondary Thickness -Starting Thrust

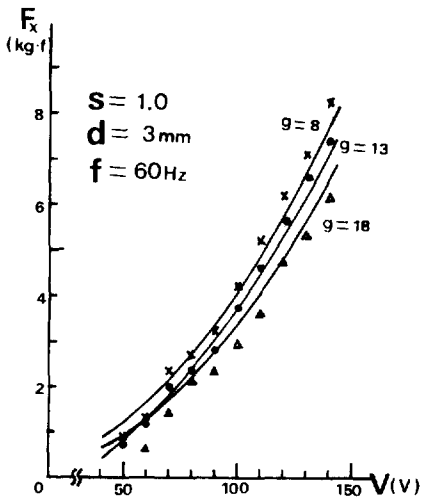


그림 7 상전압-기동추력 특성
Fig. 7 Characteristics of Voltage-Starting Thrust

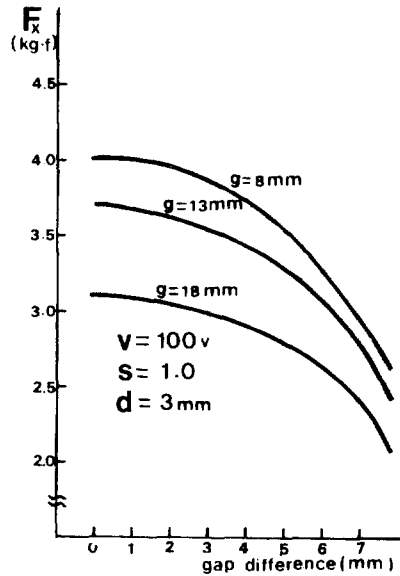


그림 9 좌, 우 공극차에 의한 기동추력
Fig. 9 Starting Thrust of Left-Light Unblances Airgap

였으며 이때의 G는 3.5이며 공극은 13(mm)이다. 그림(6)은 기동시의 추력, 일차전류, 2차 역률 등을 나타낸 것으로 공극이 작은 영역에서는 실험치와 이론치가 잘 일치하고 있으나 공극이 18(mm) 이상에서는 오차가 비교적 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 공극이 증가함에 따라 공극에서의 누설이 크게 증가하기 때문이다. 1, 2차측 사이의 간격이 3(mm)인 경우 기동 추력은 4.2(Kgf)이다. 공극을 13(mm)까지 증가시키면 경우 추력은 서서

히 감소하여 3(mm)인 경우의 88%인 3.8(Kgf)로 되나 그 이상 증가시키면 급격히 감소하여 18(mm)인 경우는 67%인 2.8(Kgf)로 효율과 역률이 크게

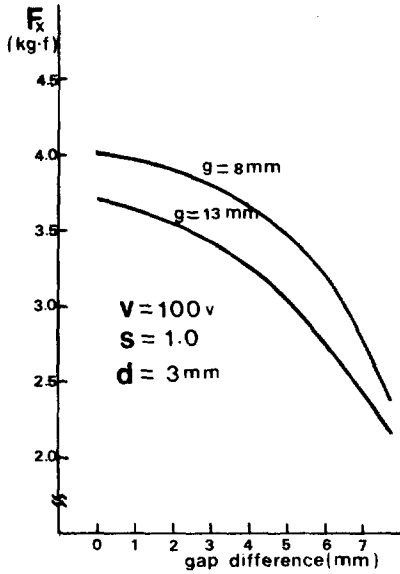


그림 10 전, 후 공극차에 의한 기동 추력
 Fig. 10 Starting Thrust of Entry-Exit Unblanced Airgap.

낮아진다. 따라서 공극은 13(mm)을 초과시키지 않는 것이 바람직하다.

그림 7 은 상전압 V의 변화에 따른 기동시의 추력 변화 곡선으로서 공극이 18(mm)인 경우 8, 13(mm)인 경우보다 오차가 크게 나타났다. 이는 그림 6 에서 언급한 바와 같이 공극누설에 기인하는 것으로 사료되며 전압이 90(V)이하인 경우 실험치가 이론치보다 적은 값으로 나타났으며 120(V)이상인 경우는 다소 크게 나타났다.

그림 8 에서는 상전압 100(V)시 2차측의 두께변화에 따른 기동 추력의 변화를 나타낸 것으로서 1차측 용량이 일정한 경우 2차 도체판의 두께를 증가시켜도 기동 추력은 비례하여 증가하지 않고 최대치가 존재함을 알 수 있다. 이는 1차측의 전압강하에 의해 공극의 자속밀도가 크게 감소하기 때문이라 사료된다.

그림 9 및 10 은 이동자(반송체)가 곡선커브나 경사지를 주행하는 경우 좌, 우 및 전, 후 공극에 차이가 발생하게 된다. 공극이 8(mm)로 일정한 경우의 기동추력은 4.0(Kgf)이며 공극차가 4(mm)까지는 기동추력이 서서히 감소하나, 그 이상에서는 급격히 감소하여 6(mm)인 경우 2.9(Kgf)로 나타났으며 공극이 증가할수록 공극차에 의한 추력 감소는 현저하다. 한편 전, 후의 공극차에 의한 추력변화는 공극이 8(mm)인 경우 공극차이가 5(mm)까지는 서서히 감소하나 그 이상에서는 급격

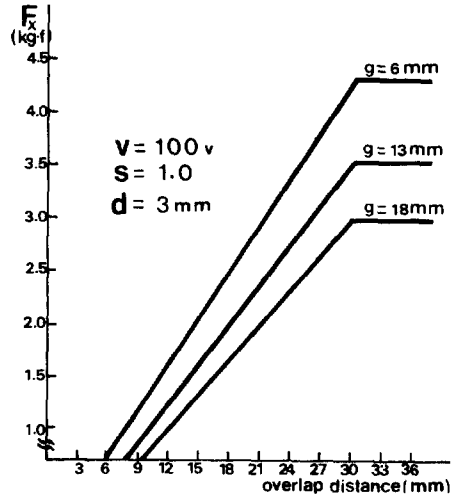


그림 11 1, 2차 중첩거리-추력 특성
 Fig. 11 1st, 2nd Overlap Distance-Starting Thrust.

히 감소하여 공극차가 6(mm)인 경우에는 3.16(Kgf)로 차이가 없는 경우의 79%에 불과하다. 따라서 좌, 우 및 전, 후의 공극 불균형은 5(mm) 이내가 되도록 반송장치를 설계하여야 한다.

그림 11 은 1차측과 2차측의 중첩거리에 따른 기동 추력의 변화를 나타낸 것으로 양 단부에서는 추력이 발생하지 않으며 중첩거리가 6(cm)이상이면 직선적으로 증가되나 30(cm)이상 중첩거리를 증가시켜도 추력은 더 이상 증가하지 않는다. 이는 양단부에서는 3상 권선을 시행하여도 이동자계가 발생하는 것이 아니라 교번자계가 발생하며 추력발생에 아무런 영향을 미치지 않기 때문이다. 따라서 2층권으로 선형 유도 전동기를 시행하는 경우 양 단부에서의 half-filled의 거리를 줄여야 하므로 전절권보다는 단절권으로 권선을 시행하는 것이 효과적이다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동 반송 장치용으로 최근 각광을 받고 있는 편축식 선형 유도 전동기의 특성을 등가회로를 이용하여 해석하므로써 반송장치용 선형 유도 전동기의 설계 지표를 제시하였으며, 기동시의 특성을 실험치와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

앞으로 고속운전시 문제가 되는 단부효과, 표피 효과등을 고려하여 해석하면 좀 더 정도 높은 해

석이 가능하리라 보며 이는 차후의 연구과제라 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] 임달호, 장석명, "단부효과를 고려한 LIM의 동작특성 해석," 전기학회 논문집, vol. 36, no. 4, pp. 240-251, 1987.
- [2] I. Boldea, S.A. Nasar, "Optimum goodness criterion for linear-induction-motor desing," Proc. IEE, vol. 123, no. 1, pp. 89-92, 1976.
- [3] 野中作太郎, 吉田欣二郎, "兩側式 리ニア 모터의 특성解析," JIEE 45-43, pp. 118-127, 1970.
- [4] 山添博史, "片側式 리니아인덕션 모터의 특성解析と 實驗," JIEE 55-B44, pp. 381-388, 1980.
- [5] 임달호, "리니어 모우터의 설계방식에 대한 개요와 응용 예," 제27차 전기기기 연구회 27-1-3, pp. 19-24, 1988.
- [6] S.A. Nasar, I. Boldea, "Linear Motion Electric Machines," John Wiley & Sons, 1976.
- [7] 白木學, 宮尾修美, "리니아모터 設計應用의 要點," 日本工業技術 センタ, 1985.
- [8] 荻田充二, "리니아모터의 特性評價と 設計의 포인트," JIEE 32, no. 3, pp. 31-41, 1988.
- [9] V.V. Vadher, M. Phil., "Theory and design of linear induction motors with steel reaction plates," Proc. IEE, vol. 129, no. 5, pp. 271-278, 1982.
- [10] R.M. Pai, Ion Boldea, S. A. Nasar, "A complete Equivalent Circuit of a Linear Motor with Sheet Secondary," IEEE Trans. vol. MAG-24, no. 1, pp. 639-654, 1988.
- [11] Michel Poloujamff, "The theory of linear induction machinery," Oxford Univ. press, 1980.
- [12] 野中作太郎, 吉田欣二郎, "兩側式 리니아 모터의 等價回路定數と 特性計算式," JIEE 45-44, pp. 128-137, 1970.
- [13] 平紗多賀男, 石川定夫, 山室孝彦, "誘導形 리니아모터의 端效果를 考慮した 等價回路," JIEE 55-B26, pp. 221-228, 1980.
- [14] Rudolf Richter, "電氣機械原論," ユロナ, 1967.