

## 返送用 SLIM의 推力制御에 의한 運轉特性

(A Operating by the Direct Thrust Control of SLIM in Conveyor System)

우정인\* · 노태균\*\* · 신동률\*\*\* · 노인배\*\*\*\*

(Jung-In Woo · Tae-Kyun Roh · Dong-Ryul Shin · Inh-Bae Roh)

### 요 약

직선 반송용 전동기기는 하중이 큰 부하를 빈번히 가감속 시키고, 저진동으로 운전시켜야 한다. 본 논문에서는 반송용 편측식 선형 유도전동기의 속응성을 얻기위해서 우선적으로 d-q축 분리에 의한 등가회로부터 직접적인 추력제어기법을 제안하고, 1차측과 2차측사이의 공극길이의 변화에 따라 생기는 추력리플을 억제하기 위해서 공간벡터 제어기법을 이용하였다. 또한 자속성분과 추력성분으로 축분리된 모델에 의한 해석은 공간벡터 제어에 의한 전압 이용율과 전류제어의 능동성을 향상시켜서 강인한 과도 추력특성을 얻을 수 있었고, 시물레이션 및 실측을 통하여 속응성과 원할한 제어특성이 나타나는 반송용 편측식 선형 유도전동기의 운전특성을 고찰하였다.

### Abstract

In this paper, the thrust control of PWM Inverter-Fed SLIM(Single-sided Linear Induction Motor) is achieved with Space Vector control and PI control. The trembling of air gap length which is occurred between the primary winding core and the secondary structure of the SLIM must be minimized in order to get quick response characteristics. First, the equivalent circuits and voltage equations of SLIM are shown on the suitable d-q axis which analyze characteristics of the thrust and the normal force. Also, modeling and analysis of the equivalent circuits transfered d-q axis are able to make robust transient torque from the current regulation in the equivalent circuit.

These results exemplified the direct drive of SLIM with the reference speed and torque were verified by experiments.

\*정회원 : 동아대 전기공학과 교수

\*\*정회원 : 일본의과 치과대학 박사과정

\*\*\*정회원 : 동아대 전기공학과 박사과정

\*\*\*\*정회원 : 동아대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 1998. 2. 28.

### 1. 서론

선형 유도전동기는 교류의 이동자계를 이용하여 직선 추력을 변환하는 장치로서 1973년 B.T.Ooi에 의해 선형화운동에 관한 기본적인 원리가 발표된 이후로 현재 지속적인 개발을 하고 있고, 회전형 유도전동기를 축방향으로 펼친 형태로서 선형 유도전동기에 비해 양 끝단의 End Effect와 횡방향의 Edge Effect 등 선형 전동기에서만 발생하는 특수한 현상들을 구조적 또는 자기적인 방법으로 개선하기 위해서 공극을 크게 설정하는 방법이 제시된 바 있다.[1] 그러나 이 공극의 영향으로 도체에 흐르는 자화전류와 누설자속이 커지게 되어 역률과 효율이 나빠지는 특성이 있다.[1,2]

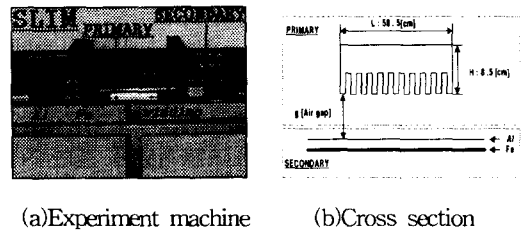
선형 유도전동기는 기어나 크랭크 및 벨트 등의 기계적 변환장치를 필요로 하지 않으므로 변환손실과 소음 및 진동 등이 발생하지 않고, 또한 추력구동하므로 고속운전이 가능한 장점들로 인하여 직선형 운동시스템에서는 절대적으로 유리하다. 따라서 초고속 운송을 필요로 하는 자기 부상열차, 경전철, 엘리베이터 및 자동 반송시스템 등의 구동장치로서 널리 이용되고 있으며, 그 개발과 응용이 확대되고 있다.[2,3] 특히 자동 반송시스템용 선형 유도전동기는 컨베어, 롤러 및 벨트 등을 이용하는 시스템에서 문제가 되고 있는 가감속에 대한 제한이 없으며, 기계적인 가동부와 접촉부가 존재하지 않아서 무소음 반송이 가능하다.[4-7]

자동 반송시스템으로써 선형 유도전동기를 응용하는 경우, 제품의 하중을 탑재한 부하와 함께 이동자를 빈번히 가감속하여야 하므로 기동특성과 추력리플에 대한 해석과 제어가 선결과제로 해결되어야 한다. 또한 중량체의 운반에 있어서 필수적인 요소로서 안정성 및 정확한 위치제어의 능력과 함께 soft start, soft stop 그리고 no shock driving이 요구되어 오고 있으며, 선형 유도기는 회전기에 비해 공극의 길이에 따라 증대되는 추력리플의 영향을 억제하는 것이 필수적인 과제로 되고 있다. 따라서 본 논문에서는 직접적인 추력제어를 위하여 d-q 변환에 의해 추력성분을 얻어내고, 고정도의 VVVF제어 인버터는 공간벡터방식에 의해서 반송용 선형 유도전동기의 운전특성을 고찰하고, 결과적으로 시뮬레이션과 실측에 의해서 서로 비교하고자 한다.

### 2. 편측식 선형유도전동기의 해석

#### 2.1 등가회로

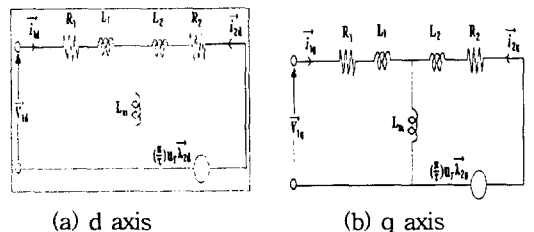
본 논문에서는 공극 유치가 용이하며, 운반-하중체 및 레일을 2차측으로 이용할 수 있고, 저속 구동에서 End Effect를 무시할[8-10] 수 있는 반송용 편측식 선형 유도전동기를 그림 1과 같은 시험기로 설계 및 제작하였다. 그림 1의 (a)와 (b)는 본 시스템에서 사용된 편측식 선형 유도전동기의 시험기와 단면도를 나타내고, 2차측은 알루미늄으로 구성되어 있으며, 추력의 감소를 억제하기 위해서 2차측 도체에 철로 구성된 back iron을 붙여서 알루미늄 도체에 의한 자기저항의 증가를 억제하고 있다. 그림 1의 시험기로 제안된 편측식 선형 유도전동기의 속도기전력을 가지는 등가회로를 d축 및 q축으로 나누어 그림 2에서 나타내고 있다.



(a)Experiment machine (b)Cross section

그림 1. 편측식 선형 유도전동기

Fig. 1. SLIM(Single-sided Linear I. M.)



(a) d axis (b) q axis

그림 2. 편측식 선형 유도전동기의 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of SLIM

그림 2(a) 및 (b)의 등가회로로 부터 1차측과 2차측의 전압방정식은 식(1)로 표현된다.

$$\vec{V}_{1d} = R_1 \vec{i}_{1d} + p\lambda_{1d} \tag{1}$$

$$\vec{V}_{1q} = R_1 \vec{i}_{1q} + p\lambda_{1q}$$

$$0 = R_2 \vec{i}_{2d} + p\vec{\lambda}_{2d} - j\left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_r \vec{\lambda}_{2d}$$

$$0 = R_2 \vec{i}_{2q} + p\vec{\lambda}_{2q} - j\left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_r \vec{\lambda}_{2q}$$

여기서, 1, 2차측의 쇄교자속은

$$\vec{\lambda}_{1d} = L_1 \vec{i}_{1d} + L_m \vec{i}_{2d} \tag{2}$$

$$\vec{\lambda}_{1q} = L_1 \vec{i}_{1q} + L_m \vec{i}_{2q}$$

$$\vec{\lambda}_{2d} = L_2 \vec{i}_{2d} + L_m \vec{i}_{1d},$$

$$\vec{\lambda}_{2q} = L_2 \vec{i}_{2q} + L_m \vec{i}_{1q}$$

이고,  $p$ 는 미분 연산자,  $R_1, L_1, R_2, L_2$  및  $L_m$ 은 1,2차측 권선 저항과 인덕턴스 및 상호인덕턴스이

고,  $j u_r \left(\frac{\pi}{\tau}\right) \vec{\lambda}_2$ 는 속도기전력이고,  $\vec{V}_{1d}, \vec{V}_{1q}$

및  $\vec{i}_{1d}, \vec{i}_{1q}, \vec{\lambda}_{1d}, \vec{\lambda}_{1q}$ 는 각각 1차측 d-q축의 전

압 및 전류와 쇄교자속 벡터이고,  $\vec{i}_{2d}, \vec{i}_{2q}, \vec{\lambda}_{2d},$

$\vec{\lambda}_{2q}$ 는 각각 2차측 d-q축 전류 및 쇄교자속이다.

식(1)과 식(2)에 의해서 d-q축으로 변환시킨 정지 좌표축의 전압방정식은 식(3)과 같이 표현되고

$$V_{dq} = R_{dq} i_{dq} + L_{dq} \dot{i}_{dq} + G_{dq} i_{dq} \tag{3}$$

식(3)에 의해서 편축식 선형 유도전동기의 입력 전력은 식(4)와 같이 표현 된다.

$$P_{in} = i_{dq}^T R_{dq} i_{dq} + i_{dq}^T p L_{dq} \dot{i}_{dq} + i_{dq}^T G_{dq} i_{dq} \\ = P_R + P_L + P_C \tag{4}$$

여기서,  $i_{dq}$ 는 식(1)과 식(2)에 의해서 d-q축 1차 및 2차의 전류행렬이고,  $R_{dq}, L_{dq}, G_{dq}$ 는 각각 d-q축으로 분리된 등가저항 성분과 등가인덕턴스 성분 및 등가속도 성분이며,  $i_{dq}^T$ 는  $i_{dq}$ 의 전치행렬이다. 또한 편축식 선형 유도전동기의 강하손실분 전력, 자기축적분 전력, 속도유기분 전력은 각각

$$P_R = R_1 (i_{1q}^2 + i_{1d}^2) + R_2 (i_{2q}^2 + i_{2d}^2)$$

$$P_L = \frac{p}{2} (i_{dq}^T L_{dq} \dot{i}_{dq})$$

$$P_C = \frac{\pi}{\tau} u_r L_m (i_{2d} i_{1q} - i_{2q} i_{1d})$$

이 되며, 자기축적분 전력  $P_L$ 로부터 전동기의 수직

발생력을 얻고, 속도유기분 전력  $P_C$ 로부터 추력을 얻는다.

## 2.2 수직력

자기축적분 전력  $P_L$  항은 자기축적 응력  $P_M$  과 수직 응력  $F_N$  의 합으로 구성되며, 식(5)로 표현된다.

$$P_L = P_M + F_N \tag{5}$$

자기축적 응력  $P_M$  은

$$P_M = \frac{p}{2} [L_1 (i_{1q}^2 + i_{1d}^2) + L_2 (i_{2q}^2 + i_{2d}^2) \\ + 2L_m (i_{1q} i_{2q} + i_{1d} i_{2d})] \tag{6}$$

수직 응력  $F_N$  은 흡인력  $F_{na}$  와 반발력  $F_{nr}$  로 분리되어 식(7)과 같이 되고,

$$F_N = F_{na} + F_{nr} \tag{7}$$

인덕턴스의 합으로 표현하면 식(8), (9)로 된다.

$$F_{na} = \frac{3}{2g} [ (L_{peri} - L_m) (i_{1q}^2 + i_{1d}^2) \\ - L_m (i_{1q} i_{2q} + i_{1d} i_{2d}) ] \tag{8}$$

$$F_{nr} = \frac{3}{2g} [ -L_m (i_{2q}^2 + i_{2d}^2) \\ - L_m (i_{1q} i_{2q} + i_{1d} i_{2d}) ] \tag{9}$$

여기서,  $L_{peri}$ 는 공극 누설인덕턴스이다.

## 2.3 추력

1차측 캐리어의 이동속도를  $u_r$ , 순시 추력을  $F_e$  라 할때  $F_e = P_C / u_r$  이므로 식(4)로 부터 속도 유기분 전력의 항  $P_C$  를 구하면 식(10)으로 된다.

$$P_C = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} u_r L_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) \tag{10}$$

따라서,  $u_r$  로 이동하는 순시 추력  $F_e$  는 식(11)로 된다.

$$F_e = \frac{P_C}{u_r} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} L_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) \tag{11}$$

여기서, 추력성분을 벡터제어하기 위해서 추력을 q축 전류성분에 의해서만 제어되도록 2차측 쇄교자

속을 d축과 일치시키면 2차축 쇄교자속은 식(12)로 되어야 한다.

$$\lambda_{2q} = 0, \quad \lambda_{2d} = \text{const.} \quad (12)$$

식(12)의 조건에 따르는 추력은 식(2)와 식(11)에 의해서 식(13)으로 된다.

$$\lambda_{2d} = L_m i_{1d} \quad (13)$$

따라서, 벡터제어된 순시 추력은 식(14)로 되고,

$$F_e = - \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{2d} i_{2q} \quad (14)$$

여기서, 직접적인 추력제어를 하기 위한 추력성분 전류  $i_{1q}$  는 식(15)로 되므로,

$$i_{1q} = \frac{2 \tau L_2}{3 \pi \lambda_{2d} L_m} F_e \quad (15)$$

$i_{1q}$  는 공간벡터 지령치인  $V_{1q}^*$  에 의해서 직접 제어되어 추력제어를 위한 제어 패턴을 얻는다.

### 3. 제어시스템

#### 3.1 제어기 설계

반송용 편축식 선형 유도전동기의 추력전류  $i_{1q}$  를 직접 제어하기 위해서 Ziegler-Nichols 제 1방법으로 Time scale과 Time delay에 의해서 비례상수  $K_p$  와 적분시간  $T_i$  를 구하고, 그림 3과 같은 제어가 제안되며, 제어기는 식(16)과 같이 표현된다.

$$F_e(t) = K_p [ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt ] \quad (16)$$

$$i_{1q}^*(t) = G_s \cdot F_e(t) \quad (17)$$

여기서  $G_s = \frac{2 \tau L_2}{3 \pi \lambda_{2d} L_m}$  이다.

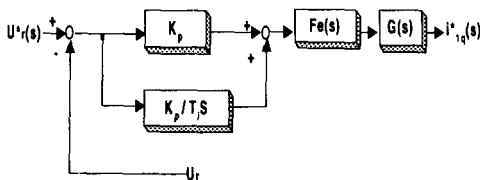


그림 3. 추력제어  
Fig. 3. Thrust Control with the PI

표 1. Ziegler-Nichols법에 의한 PI 파라메타  
Table 1. Recommended PI Parameter According to Ziegler-Nichols Step Response Method

Controller	$K_p$	$T_i$
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$

여기서, T는 Time scale이고, L은 Time delay이다.

#### 3.2 공간벡터 출력패턴

공간벡터는 기준 전압벡터를 벡터공간상에 기준을 두고 전류위상과 비교하여 스위칭 시간을 결정한다. 인버터의 스위칭 유효전압벡터  $V(1) \sim V(6)$ 와 2개의 영전압벡터  $V(0), V(7)$ 의 벡터공간상의 배치는 그림 4(a)와 같이 된다.[11-12]

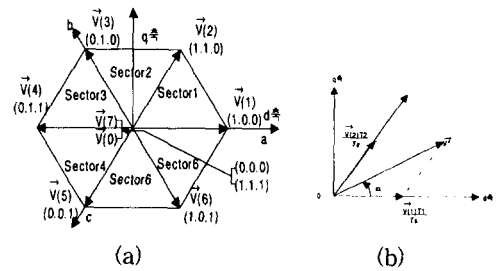


그림 4. 공간 벡터의 도표  
Fig. 4. Diagram of Space Vector

공간전압벡터 지령치  $\vec{V}^*$  를 한 샘플링 기간  $T_s$  동안 출력전압의 평균치와 같게 하기 위해서 그림 4(b)에서  $\vec{V}^*$  가 위치한 삼각형의 두변의 인버터 출력벡터를 인가하는 유효시간  $T_1$ 과  $T_2$  를 조절하면 식(18)과 같고,

$$\vec{V}^* = \frac{\vec{V}(1) \cdot T_1}{T_s} + \frac{\vec{V}(2) \cdot T_2}{T_s} \quad (18)$$

또한 유효시간 벡터  $T_1, T_2$  와 영벡터 출력시간  $T_0$  는 각각 식(19)와 같다.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left\{ V_{1d}^* \cos \frac{n}{3} \pi + V_{1q}^* \sin \frac{n}{3} \pi \right\} \quad (19)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left[ - V_{1d}^* \cos \frac{(n-1)}{3} \pi \right]$$



본 시스템에 사용된 반송용 편축식 선형 유도전동기의 응답특성을 고찰하기 위한 시험기로서 1차측 가동자의 가로 길이가 58[cm], 세로의 길이가 57[cm], 높이가 8[cm], 무게가 110[Kg·g]인 반송용 편축식 선형 유도전동기를 그림 1과 같이 구성하였으며, 직접적인 추력제어에 의한 운전특성을 고찰하고 해석하기 위해서 정격 220V 30[A]인 시험기를 2[m/sec]의 저속으로 3.5[sec]동안 기동 및 제동을 시켜 그 특성을 고찰하였다. 인버터의 스위칭 소자는 TI사의 2MBI60F-120소자를 사용하였고, 전류피드백 센서는 LP 50-P LEM을 사용하였다. 스위칭 주파수는 2.5[KHz]이며, 전류센싱 주파수는 400[usec]이다.

그림 1에서 제작된 반송용 편축식 선형 유도전동기의 제원은 표 2에서 나타내고 있으며, 표 3은 그림 2에서 제안된 등가회로의 각 정수를 나타낸다.

표 2. 편축식 선형 유도전동기의 제원  
Table 2. Specification of the SLIM

Primary	
Winding	Core/Slot
Number of phases : 3	Core : height : 72 [mm] length : 380 [mm]
Number of poles : 4	Number of slots : 24
Winding connection : Y	Slot : depth : 35 [mm] width : 12 [mm]
Pole pitch : 55.9 [mm]	pitch : 14 [mm]
Turns : 544	Slot/Pole/Phase : 2
Secondary	
Al	Fe
Thickness : 8.0 [mm]	Thickness : 15.5 [mm]
Width : 170.0 [mm]	Width : 440.0 [mm]

표 3. 편축식 선형 유도전동기의 등가회로 정수  
Table 3. Element values of a equivalent circuit of the SLIM

$R_1$ (Primary Resistance)	3.7 ( $\Omega$ )
$L_1$ (Primary Self-Inductance)	0.058(H)
$L_m$ (Mutual-Inductance)	0.052(H)
$J_m$ (Moment of Inertia)	0.01( $Kgm^2$ )
$R_2$ (Secondary Resistance)	33.1 ( $\Omega$ )
$L_2$ (Secondary Self-Inductance)	0.058(H)
$g$ (Air gap)	0.9(mm)
$B_m$ (Viscous Friction Coefficient)	0.558( $Nms/rad$ )

## 4.1 시뮬레이션

### 4.1.1 추력 및 수직력

본 시스템에서 공간벡터제어를 했을 경우 그림 7(a)와 (b)는 기동후 3.5[sec]에 제동시킨 추력특성과 수직력특성을 각각 나타낸다. 그림 7(a)의 추력특성은 기동시에 약 5[sec]동안 370[N]의 힘을 받고 있으며, 속도가 지령치에 도달할 때인 약 6[sec]이후에는 0[N]에 수렴하여 안정화 됨을 알 수 있고, 그림 7(b)의 수직력특성은 기동시에 약 75[N]의 편차를 보이고 있으나, 약 4.5[sec]에서 정상상태에 도달한 이후부터는 안정화되는 것을 그림 7로 부터 고찰하였다.

### 4.1.2 저속분 전류 $i_d$ 와 추력분 전류 $i_q$

그림 8(a)는 추력성분을 포함하고 있는 q축과 저속성분을 포함하고 있는 d축의 파형특성을 보여주고 있으며, 추력 지령치인  $i_q^*$ 에 따라  $i_q$ 의 파형특성은 약 3[sec]에서 지령치에 추종하고 있으며,  $i_d$  또한 그때에 10[A]로 안정화되는 것을 알 수 있다. 그림 8(b)는  $i_d$ 와  $i_q$ 가 지령치에 도달할 때 한 점으로 수렴하고 있음을 고찰하였다.

### 4.1.3 상전류와 PWM파형

그림 9(a)와 (b)는 상전류에 대한 공간벡터에 의해 만들어진 PWM파형을 나타내고 있다. 기동시에는 약 7[sec]동안 PWM파형의 변조를 보여주고 있으며, 정상상태인 이 이후부터는 파형이 안정화됨을 고찰하였고, 또한 그림 9(b)는 3.5[sec]에서 제동시킨 경우 PWM파형과 상전류의 파형특성을 보여주고 있다.

### 4.1.4 공극

1차측 권선 코어와 2차측 구조사이의 공극길이의 변화는 편축식 선형 유도전동기에서 발생하는 추력에 중요한 영향을 미치고 있고, 또한 추력리플의 원인이 된다. 이 추력리플의 원인이 되는 공극길이의 변화를 일정하게 제어하기위해서 전압의 이용율과 고효율로 동작할 수 있게 하기위해서 고조파 성분을 억제하여 전류제어의 능동성을 향상시키는 공간벡터 제어법을 이용한 결과 공극의 변화가 3.5[sec]이후부터 안정화되고 있음을 그림 10의 파형특성에서 볼 수 있었다.

## 4.2 실측

### 4.2.1 속도 및 상전류

그림 11의 (a) 및 (b)는 open-loop 제어 방식으로 기동시킨 경우의 상전류와 속도에 대한 시뮬레이션 및 실측에 대한 파형특성을 각각 나타내고 있으며, 그림 12의 (c) 및 (d)는 공간벡터에 의한 직접적인 추력제어를 했을 때의 시뮬레이션 및 실측을 각각 나타내고 있다. 그림 11의 (a)와 (b)의 경우 open-loop 제어 방식은 시뮬레이션 및 실측이 다같이 정상상태 도달시간이 4[sec] 이상 길어지고 있으며, 속도특성(1)은 공극의 변동에 의한 추력리플이 안정화되지 않고 있는 것을 알 수 있었다. 그림 6과 같이 직접적인 추력제어를 위하여 PI제어기를 이용한 공간벡터제어를 한 그림 11의 (c) 및 (d)의 경우는 저속도인 2[m/sec]로 구동되는 반송용 편축식 선형 유도전동기의 1차측 기동자는 기동후 .35[sec] 이내의 빠른 시간내에 정상상태에 도달하는 것을 볼 수 있으며, 이 이후부터는 리플없이 안정하게 구동되고 있는 것을 볼 수 있었다. 그림 11 (d)의 속도특성(1)은 이론적 시뮬레이션 결과인 그림 11 (c)의 속도특성(1)과 같이 속도추정에 대한 속응성과 안정된 구동특성을 얻고 있다.

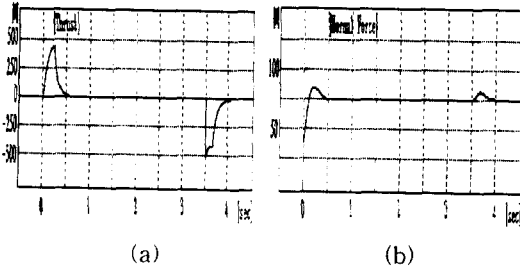


그림 7. (a) 추력특성 (b) 수직력특성  
Fig. 7. (a) thrust (b) normal force

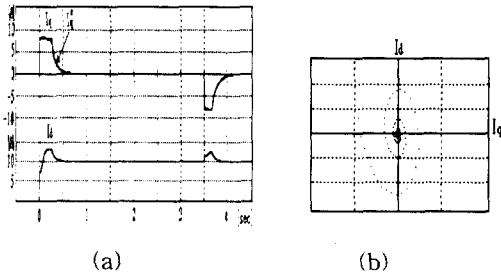


그림 8. d축과 q축의 전류  
Fig. 8. Current of d-axis and q-axis

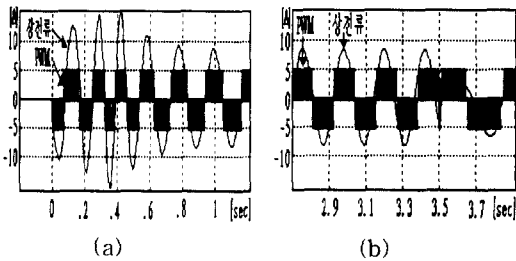


그림 9. PWM파형과 상전류  
Fig. 9. PWM waveform and phase current

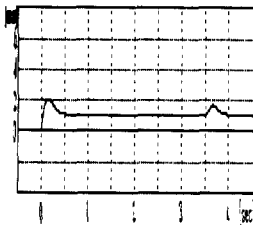


그림 10. 공극 진동  
Fig. 10. Vibration of air gap

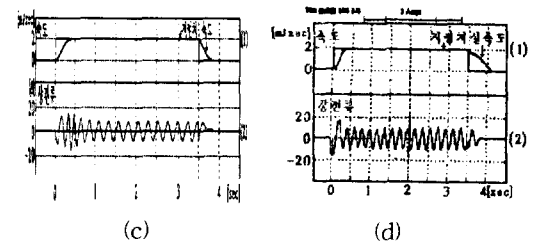
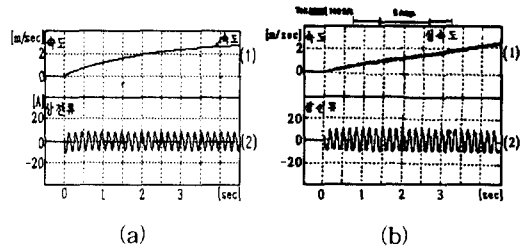


그림 11. 속도와 상전류  
Fig. 11. Speed and phase current

## 5. 결론

본 논문에서는 2[m/sec]의 저속으로 인버터 구동용 편축식 선형 유도전동기를 그림 1(b)와 같이 설계 및 제작하였고, 3.5[sec]동안 운전하여 그 특성을 시뮬레이션 및 실측을 통하여 고찰하였다. 강인한 기동 특성을 얻기 위해서 본 시스템에서는 그림 2의 등가 회로에 따라 자속성분 d축과 추력성분 q축을 분리하였고, 이 분리된 추력성분을 직접 제어하고 속응성을 얻기위해서 Ziegler-Nichols 제 1방법으로 Time scale과 Time delay 구하여 비례상수  $K_p$  와 적분시간  $T_i$  를 계산하여 PI제어기를 구성하였다. 또한, 1차축과 2차축 구조사이의 공극길이에 따라 발생하는 추력리플의 영향을 개선하기 위해서 직류 링크전압을 최대로 이용할 수 있고, 고역률로 동작할 수 있게 하기위해서 전류의 고조파 성분을 억제하는 공간벡터법을 이용하였고, 이에따라 약 .35[sec]부터 추력리플이 없고 진동이 없이 안정한 속도특성을 얻을 수 있었다. 즉 중량 부하에서 강인한 기동특성을 갖는 PI 제어기에 공간벡터 제어법을 부가한 결과는 속도 지령치 추종이 뛰어나며, 진동없이 안정하게 구동되고 있음을 시뮬레이션 및 실측을 통하여 고찰할 수 있었다. 또한, 본 논문에서 유도된 속도에 대한 추력과 수직력 및 공극에 분산되는 에너지들로부터 해석적으로 얻어지는 파라메타 값들은 산업용 편축식 선형 유도전동기의 홀딩-런 운전의 제어 기초를 얻을 수 있다.

### 참고 문헌

- [1] S.A Nasar, I.Boldea, "Linear Motion Electric Machine", Wiley-Interscience Publication, 1976.
- [2] Jacek F. Gieras, "Linear Induction Drives", OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, 1994.
- [3] T.H.Loye, "The Transient Performance of Linear Induction Motors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.12, December, 1981.
- [4] T.A.Nondahl & D.W. Novotny, "Pole-by-Pole Model of a Linear Induction Machine Using Conformal Mapping Coefficients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.4, July/Aug, 1979.
- [5] T.A.Nondahl & D.W. Novotny, "Three-phase pole-by-pole model of a linear induction machine", IEE Proceedings vol.127, No.2, MARCH, 1980.

- [6] Yasumasa Ogino & Yosisige Murakami, "High Performance Control in Ultra-Low Speed Range of Inverter-Fed Linear Induction Motor Using Vector Control Scheme", IEEE Conf. IAS Annual Meeting, pp.551~557, 1993.
- [7] S. Nonaka. et al 2, "Experimental Study on Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit" 電學論D, 108券5號, pp477~484, 1988.
- [8] B.K.Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, 1986.
- [9] C.Lu, T.R.Eastham, G.E.Dawson, "Transient and Dynamic Performance of a Linear Induction Motor", IEEE Conf. IAS Annual Meeting, pp.266~273, 1993.
- [10] BOLDEA & S.A.NASAR, " LINEAR MOTION ELECTROMAGNETIC SYSTEM", Wiley-Interscience Publication, 1985.
- [11] J.S.Kim, S.K.Sul, "A Novel Voltage Modulation Technique of the Space Vector PWM," IPEC'95 Yokohama Conf, pp.742~747, 1995.2
- [12] Heinz willi van der broeck, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vector" IEEE. Vol.24 No1. 1988.

### ◇ 著者紹介 ◇



**우 정 인 (禹靖仁)**

1941년 2월 12일생. 1963년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 2월 영남대 전자공학과 졸업(석사). 1970년 3월~1979년 2월 부산공업대 전기공학과 조교수. 1984년 2월 중앙대 전기공학과 졸업(박사). 1985년~1997년 일본 동경공업대 객원 연구원. 1979년 3월~현재 동아대 전기공학과 교수.



**노 태 군 (盧泰均)**

1963년 1월 23일생. 1984년 2월 동아대 전기공학과 졸업. 1986년 8월 중앙대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월~현재 일본동경 의과치과대학 박사과정.



**신 동 슌 (申東律)**

1970년 12월 25일생. 1995년 2월 동아대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 동아대 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월~현재 동아대 전기공학과 박사과정.



**노 인 배 (盧仁培)**

1951년 6월 12일생. 1996년 2월 부산공업대 전기공학과 졸업. 1979년~현재 롯데건설. 1996년 3월~현재 동아대 전기공학과 석사과정.