

다수의 수동형 캐리어를 연속 이송시킬 수 있는 새로운 영구자석 선형동기전동기의 설계

이기창¹, 김민태², 송의호[†]

New Design of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for Seamless Movement of Multiple Passive Carriers

Ki-Chang Lee¹, Min-Tae Kim², and Eui-Ho Song[†]

Abstract

Nowadays, small quantity batch production, which is so-called a flexible manufacturing system, is a major trend in the modern factory automation industry. The demands for new transportation system are increased gradually, with which multiple passive carriers carrying materials and semi-products are precisely and individually controlled along a single closed rail. Thus, a new type of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM), which consists of state coils on a single rail and PM movers as many as carriers, is proposed in this paper. The rail can be segmented as modules with pairs of coils and a current amplifier, which makes the transportation system simple; therefore, the rail can be easily extended and repaired. A design method of the new PMLSM with a single carrier is proposed, which can be thought as a new version of PMLSM, a coil-segmented coreless PMLSM (CS-CLPMLSM). Experimental setup for it is made, and propulsion results show that with the help of a new effective coil selection and switching algorithms, the conventional current-based vector control is sufficient to fulfill the position and velocity control of the new PMLSM. The proposed PMLSM is expected to fulfill seamless servo-control of multiple carriers also in process line, such as a new generation of flat panel display manufacturing line.

Key words: CLPMLSM(Coreless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor), Coil-segmented CLPMLSM (CS-CLPMLSM), EMLC(Electromagnetic Levitation Conveyor), Segmented phase coil, 4-pole 3-coil CLPMLSM

1. 서 론

현대의 공장자동화 라인이나 반도체 및 평판디스플레이(FPD) 생산 라인에서는 원료 및 반제품을 실은 다수의 캐리어가 페-루프로 구성된 레일을 따라 정밀 서보 제어 되면서, 완성된 제품을 포장 및 출하 라인으로 이동시킬 것을 요구받는다. 특히 반도체, 평판디스플레이

제품 등의 대형화, 고집적화 및 대량생산을 위한 정밀 자동화 생산라인에서는 열팽창에 의한 품질의 저하를 없애기 위해서, 에너지를 공급하는 고정자 권선을 레일을 따라 배치하고, 고정자 권선과 상호작용하는 영구자석을 이동자에 배치하여, 캐리어에는 어떠한 전원도 인가되지 않는 수동형 캐리어가 바람직하다^[1]. 특히 이러한 분야에서는 자기부상컨베이어(EMLC)처럼 자기부상 서스펜션과 정밀 선형동기 추진이 결합된 시스템의 사용이 점차 확대되고 있다^[1-4]. 고정자 권선이 레일에 고정되고, 영구 자석이 움직이는 구조가 일반적인 영구자석 선형동기전동기(PMLSM)는 기어장치 없이 직접 추진력을 발생시키므로 효율이 높으며, 위치, 속도 및 가속도에 대하여 우수한 제어 특성을 가지는 장점을 가진다^[5-9]. 그러나 영구자석 선형동기전동기는 돌극 구조에 의해 고정자 돌극 근처에서 당기고 밀리는 디텐트(detent) 힘이 발생하며, 이로 인해 추진력에 리플이 나

Paper number: TKPE-2015-20-5-9

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: ehsong@changwon.ac.kr, Dept. of Control & Instrumentation Eng. Changwon Nat'l Univ. Tel: +82-55-213-3666 Fax: +82-55-262-5064

¹ Electric Propulsion Research Division, Korea Electro-technology Research Institute (KERI)

² Dept. of Control & Instrumentation Eng. Changwon Nat'l Univ.

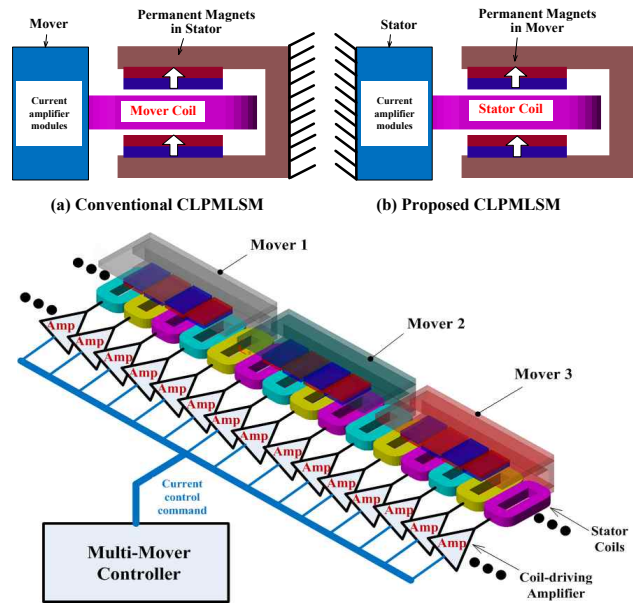
Manuscript received Jul. 18, 2015; revised Jul. 28, 2015; accepted Sep. 8, 2015

타나는 단점이 있다. 최근까지 디텐트 힘을 줄이기 위한 다양한 방법들이 연구되고 있지만 근본적으로 없앨 수는 없었다^[6,10,11]. 돌극을 가지지 않는 코어리스 영구자석 선형동기전동기는 구조적으로 디텐트 힘이 나타나지 않는 장점이 있지만, 영구자석이 레일에 설치되고, 코일이 이동자에 설치되어 움직이는 단점을 가진다^[12]. 코어리스 영구자석 선형동기전동기(CLPMLSM)는 다수개의 가동 케이블을 사용하여 이동자에 전원을 공급하면 공통 영구자석 레일에 대해서 다수 캐리어를 배치할 수는 있지만, 페루프 레일 운전을 할 수 없는 등 캐리어의 서보제어에 제약이 많다. 특히, 캐리어의 발열로 인한 팽창에 의해서 캐리어의 이송정밀도를 떨어뜨리는 단점이 있다.

한편, 긴 이송거리를 가지는 영구자석 선형동기전동기에서는 한 대의 3상 인버터로 레일 상의 전체 고정자 코일을 구동하기보다는, 전체 고정자 권선들을 소규모 블록 단위로 나누어 전용 인버터를 블록마다 설치한 형태의 분할고정자 시스템이 더 선호된다. 분할 고정자 시스템은 고정자 권선 블록과 인버터를 쌍으로 규격화시킬 수 있으므로 선형동기전의 대량생산과 유지관리가 용이하며 또한 이송거리 확장이 쉬울 뿐만 아니라, 섹션이 겹치지 않는 범위 내에서는 다수의 이동자들을 동일 레일에서 동작시킬 수도 있다^[13].

본 논문에서는 다수의 수동형 캐리어를 동일한 레일에서 연속적으로 이송시킬 수 있는 새로운 형태의 영구자석 선형동기전동기를 제안한다. 코어리스 영구자석 선형동기전동기와 달리, 제안 구조는 양측식 영구자석 이동자를 가지고, 분할된 공심형 고정자 코일이 레일에 배치되는 구조로서 전용 전류증폭기를 가지도록 설계된 개별 분할 고정자 코일을 독립적으로 제어함으로써, 동시에 다수의 이동자를 독립적으로 정밀하게 서보 제어할 수 있도록 하였다.

제 2장에서는 새로운 형태의 영구자석 선형전동기의 필요성 및 단일 이동자에 대해서 설계된 영구자석 선형동기전동기의 원리를 상세히 설명하고 수식 모델을 유도한다. 제 3장에서는 영 전류 코일 전환을 사용하는 유효코일 선택 알고리즘의 유도과정에 대해서 소개하고, 이러한 유효코일 선택 알고리즘을 사용함으로써, 기존 방식의 전류기반 백터제어 알고리즘과 선형추진 알고리즘을 사용하더라도 레일의 전 영역에 걸쳐서 충분히 서보 제어가 될 수 있음을 보인다. 4장에서는 제안된 영구자석 선형전동기를 추진시키기 위한 실험 셋업 및 제어기의 하드웨어 구성에 대해서 설명한다. 5장에서는 추진 실험 결과를 통해 제안 추진시스템이 장거리 이송 및 확장이 쉬운 서보제어 시스템임을 보인다. 또한 캐리어가 움직함에 따라 영구자석과 상호작용하는 3개의 유효 코일도 옮겨감을 실험과형으로 보임으로서, 개별 캐리어의 간격을 수 mm 이내의 간격으로 유지하면서 연속적으로 다수개의 캐리어를 정밀 서보 제어할 수 있음을 보인다.



(c) Structure and control of the CS-CLPMLSM
Fig. 1. Proposal of new linear propulsion system.

2. 새로운 영구자석 선형동기전동기의 설계

2.1 필요성 및 제안구조

기존의 코어리스 영구자석 선형동기전동기는 레일을 따라 배열된 영구자석이 공극자속을 정현파 형태로 분포시키기 때문에 이동자 코일에도 정현파 역기전력이 유기된다. 따라서 일반적인 영구자석 선형동기전동기의 디텐트 힘에 의한 추진력 리플이 발생하지 않으므로 정밀 서보제어를 필요로 하는 자동화 시스템에 적합하다^[10,11]. 이러한 코어리스 영구자석 선형동기전동기에서, 이동자와 고정자의 역할을 바꾸어 공심형 코일을 레일에 설치하고 영구자석을 캐리어에 고정시켜도 추진력 리플이 발생하지 않아서 정밀서보제어의 장점을 잃지 않는다. 이 구조에서는 이동자를 따라 움직이는 전원공급용 가동 케이블이 필요 없으며, 전류가 흐르는 코일이 레일에 고정되므로 방열 문제도 쉬워진다. 또한 전원이 인가되지 않는 캐리어는 발열 요소가 없어서 온도를 일정하게 유지할 수 있으므로 반도체나 평판디스플레이(FPD) 제조와 같이 온도에 민감한 공정에 유리하다.

그림 1의 (a)와 (b)에 코어리스 영구자석 선형전동기의 기존 구조와 제안 구조를 나타낸다. 그림에서 이동자는 고정자에 비해 길이가 충분히 작아서 고정자의 길이 내에서만 동작한다. 제안된 (b)의 구조에서는 영구자석과 백아이언(Back-Iron)으로 구성되는 이동자가 무거워져서, 기존 (a)처럼 빠른 가감속 특성을 기대할 수 없고, 고정자의 길이가 늘어나므로 코일에서의 누설이 커져서 효율이 나빠진다. 만약 고정자 코일을 분할하여, 이동자 영구자석의 길이만큼 코일을 구동시킨다면, 코일의 구동 전압이 줄어들고 구동효율도 높아질 수 있다. 특히 고정

자 코일의 분할 폭을 영구자석 배치보다 더 작게 분할하면, 다수의 캐리어를 배치할 수 있을 뿐만 아니라, 캐리어들 간의 간격을 수 mm 이내로 유지시킬 수 있어서, 공통 레일에 대해서 독립적으로 제어되는 캐리어들을 연속적으로 움직일 수 있다. 그림 1 (c)에 이러한 새로운 형태의 선형추진전동기의 구조를 나타낸다. 제안된 추진시스템은 현대의 유연 생산 자동화 라인에서 요구되는 캐리어의 연속적인 흐름을 가능하게 하는 최적 해법이 될 수 있다. 제안된 구조는 분할 고정자 시스템 선형전동기로 분류할 수 있으며, 이동자 아래의 코일만 구동되므로, 작은 용량의 전류증폭기를 높은 효율로 운전할 수 있다. 더구나 분할 코일과 전류증폭기의 모듈화가 가능하므로, 레일의 확장과 유지관리가 편리해지는 장점도 가진다. 다축 이동자 제어기는 레일에 설치된 리니어 스케일러와 이동자에 설치된 비접촉 엔코더 헤드로부터 위치 및 속도를 궤환 받아서, 이동자들을 개별적으로 동작시킬 수 있다. 다수개의 이동자 중에서 한 개의 이동자만 분리해서 보면, 기존의 코어리스 영구자석 선형동기전동기와 유사한 특성을 가지므로, 그 설계 및 제어가 쉬워지는 장점도 가진다.

2.2 상세 설계

다수의 이동자 중 한 개의 이동자만 레일에 존재하는 경우를 고려하자. 이 경우 제안된 추진시스템은 코어리스 영구자석 선형동기전동기와 유사한 구조가 되므로, 본 논문에서는 코일분할 코어리스 영구자석 선형동기전동기(CS-CLPMLSM)라고 명명한다.

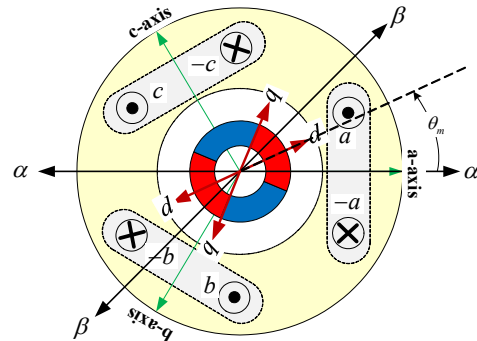
제안된 코어리스 영구자석 선형동기전동기의 고정자 코일분할 방법은 회전기의 기계적인 1회전에 해당되는 인접한 고정자 코일 3개를 1개의 3상 모듈로 분할하는 것이다. 이는 N개의 극수를 가지는 전동기 (N-pole machine)에 대해, 영구자석의 배치 간격을 τ 라 했을 때, $N\tau$ 마다 3개의 코일을 배치하는 구조이다. 즉 2극 전동기를 기준으로 하면 2τ 거리마다, 4극 전동기를 기준으로 하면 4τ 거리마다 3개의 코일을 설치하도록 설계하는 방법이다. 본 논문에서는 널리 사용되는 4극 3코일 코어리스 영구자석 선형동기전동기를 기준으로 추력 100N급 전동기를 설계하였으며, 상세 파라미터는 표 1과 같다.

그림 2 (a)에 4극 3코일 코어리스 영구자석 선형동기전동기를 회전기 모델로 변환하여 생각했을 때의 등가 모델을 나타낸다. 코어리스 영구자석 선형전동기는 코일이 집중권선 형태로 제작되므로, 상전류의 권선이 배치된 위상이 일반적인 회전기와 다르다. 그렇지만, 전동기의 모델링 및 전압방정식, 추력방정식은 기존전동기와 유사하다. 보다 자세한 설명은 참고문헌 [1]의 부록 3에 나타나 있다.

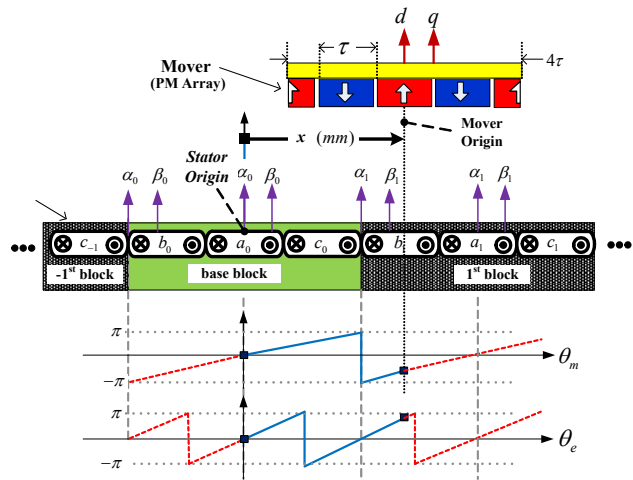
그림 2 (b)는 코일분할 코어리스 영구자석 선형동기전동기의 단면도를 나타낸다. 설명의 편의를 위해서 이동

TABLE I
PARAMETER OF CS-CLPMLSM

Description	Symbol	Value	Unit
Length of segmented stator coil block	4τ	144	mm
Pitch of permanent magnet	τ	36	mm
Pitch of coil	τ_c	48	mm
Resistance of coil	R	4.857	ohm
Inductance of coil	L	20	mH



(a) Equivalent rotating model of the CS-CLPMLSM



(b) Cutaway view of the CS-CLPMLSM

Fig. 2. Structure of the CS-CLPMLSM.

자의 상·하부 영구자석 중 상부 영구자석만 표기하였다. 코일의 기저 분할 블록을 b_0, a_0, c_0 로 두고, a_0 블록의 중심을 전체 레일 좌표계의 원점으로 정의한다. b_k, a_k, c_k (단 k 는 정수)로 정의되는 코일블록이 무한대로 펼쳐져 있다고 가정한다. 그림 2 (b)는 이동자가 거리 x 만큼 이동한 상태이다. 이동자 영구자석의 원점위치 x 가 변할 때, 전기각 및 기계각의 변화도 함께 나타내었다. 이동자의 자극 원점이 4τ 거리만큼 움직이면, 전기각으로 2회전 ($2 \times 2\pi$)하여 코일 3개를 지나고, 기계각으로는 1회전 (2π) 한다.

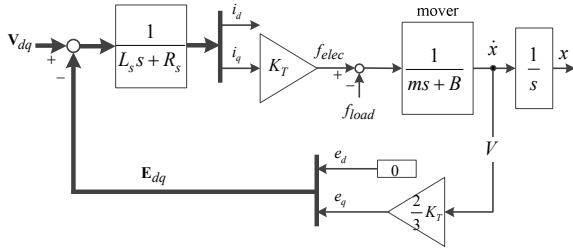


Fig. 3. Modeling of CS-CLPMLSM.

영구자석 위치에 대해 회전전동기의 고정자 코일과 선형 배열된 고정자 코일의 기계 및 전기각이 일치하므로, 이동자 자극의 원점을 검출하여, 대응되는 인접한 코일 3개를 구동시키기만 하면, 기존 회전형전동기와 동일한 방법으로 제어할 수 있다. 구체적으로 인접한 3개의 고정자 코일을 하나의 블록단위로 분할하여 순서대로 3상 전력을 *b*상, *a*상, *c*상에 인가하고, 이동자의 진행방향으로 고정자 코일을 순차적으로 바꾸어 항상 3개의 고정자 코일이 연결되도록 구동하면, 제안된 코일분할 코어리스 영구자석 선형동기전동기의 수학적 모델은 그림 3과 같이 표면부착 영구자석동기전동기 (SPMSM)와 동일하게 된다.

영구자석을 기준으로 한 전기각 θ_e 와 고정자 코일을 기준으로 한 기계각 θ_m 및 이를 이동자의 이동거리 x 로 변환하는 수식, 그리고 전기각속도 ω_e 와 이동자의 이동속도 \dot{x} 의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_e = 2\theta_m = \frac{\pi}{\tau} x \quad (1)$$

$$\omega_e = \frac{\pi}{\tau} \dot{x} \quad (2)$$

3. 추진제어 알고리즘

제안 코일분할 코어리스 영구자석 선형동기전동기는 기존의 코어리스 영구자석 선형동기전동기를 기본으로 설계했으므로, 그 추진제어 방법도 기존 방법과 동일하다. 유일한 차이점은 개별 코일의 구동을 전류증폭기가 담당하는 구조이므로 기존의 전압 벡터 제어알고리즘이 아닌, 전류 벡터 제어알고리즘을 사용해야 한다는 점이다. 또한 이동자의 자극 위치를 검출하여, 이동자의 위치에 대응되는 3개의 유효코일만 선택하여 구동하여야 하므로, 특별한 유효코일 선택알고리즘이 필요하다.

3.1 추진제어 알고리즘

선형전동기 추진 시, 위치제어 명령에 따른 오버슈트 현상은 중대한 사고로 이어질 수 있기 때문에, 속도명령을 생성하는 위치제어기는 누적효과가 없는 비례제어기만 사용된다. 추진전류제어명령 I_q^* 를 생성하는 속도제어

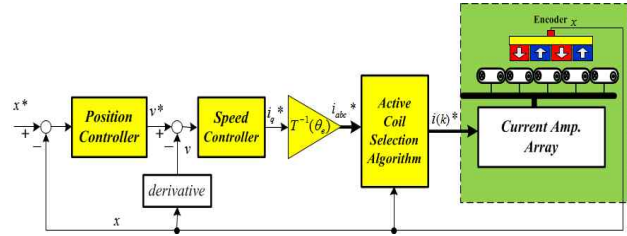


Fig. 4. Propulsive controller for CS-CLPMLSM.

기는 비례·적분 제어기로 구현된다. 코어리스 전동기는 톨력턴스 토크가 없으므로 자속전류제어 명령 I_d^* 은 사용하지 않는다.

기존의 전압 벡터제어방식에서는 속도제어기 출력인 전류제어명령 I_{dq}^* 와 피드백 전류 i_{dq} 로 전류제어기를 구성하여 전압명령 V_{dq}^* 를 생성하고, 이 전압명령을 *dq/abc* 변환을 거친 3상 전압명령 V_{abc}^* 로 인버터를 구동한다. 본 논문에서는 그림 1(c)에서처럼 고정자 코일에 연결된 전류증폭기에서 하드웨어적으로 전류제어기능을 수행하므로, 추진제어기는 전류제어명령 I_{dq}^* 를 *dq/abc* 변환만 실행하여 3상전류제어명령 I_{abc}^* 를 발생시킨다. 레일에 배열된 고정자 코일들을 구동하는 개별 전류증폭기 중에서, 이동자를 추진시키는데 기여하는 유효 고정자 코일을 구동하는 전류증폭기에 3상 전류제어명령 I_{abc}^* 를 분배시키기 위해서는 특별한 유효코일 선택 알고리즘이 필요하다. 그림 4에 이러한 추진제어 알고리즘을 상세히 도시한다.

3.2 유효코일 선택 알고리즘 및 코일 전류 분배

3개의 고정자 코일로 구성되는 3상 전동기의 특징을 이용하면, 이동자의 기계적인 1회전에 대응하는 인접한 3개의 고정자 코일을 분할코일블록으로 정의할 수 있다. 따라서 그림 2 (b)에서는 0번째 분할코일블록의 *a*상 코일의 중심을 고정자의 원점으로 정의하면, *x*축 진행 방향을 따라 *b-a-c*상 코일들을 1개의 분할코일블록으로 정의한다. 그림 2 (b)의 영구자석의 N극 중심으로 정의된 이동자의 원점에서는 공극 자속이 최대가 된다. 코일에 유기되는 역기전력은 자속의 변화량에 비례하므로, 이 이동자의 원점이 지나는 개별 코일에 유기되는 역기전력이 0이 된다. 즉 이동자의 원점이 자속(*d*-axis) 축으로 정의되므로, 추진전류 i_q 제어를 하더라도 이동자의 원점을 지나는 코일의 전류는 항상 0이다. 그림 2 (b)에서는 이동자 영구자석이 N-S-N-S의 4극 구조를 가지므로, 영구자석에 의한 자속이 최대가 되는 점 즉 코일의 전류가 항상 0인 점은 총 4군데가 존재한다.

자속 축 제어전류 i_d 를 0으로 두고, 추진전류 i_q 를 일정한 크기 I_q 로 제어한다면, *dq/abc* 변환에 의해 다음과 같은 평형 3상전류가 만들어 진다.

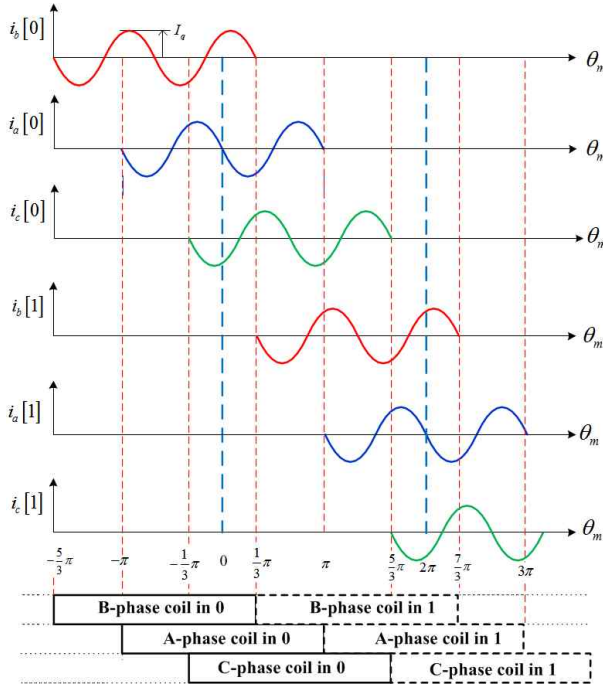


Fig. 5. Active coil current distribution with constant thrust force.

$$\begin{aligned} i_b &= -I_q \sin\left(2\left(\theta_m + \frac{2}{3}\pi\right)\right) \\ i_a &= -I_q \sin(2\theta_m) \\ i_c &= -I_q \sin\left(2\left(\theta_m - \frac{2}{3}\pi\right)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 각 상의 전류가 0이 되는 조건을 기계각 θ_m 에 대해서 풀고, k 번째 분할코일블록이 기계각으로 $-k\pi \sim k\pi$ 범위 내에 있다는 조건을 이용하면, k 번째 유효코일블록에서 $k+1$ 번째 유효코일블록으로 전환하는 각 상 코일의 위치인 유효코일선택 알고리즘은 수식 (4)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \theta_{b_m} &= 2k\pi + \pi - \frac{2}{3}\pi, \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \\ \theta_{a_m} &= 2k\pi + \pi, \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \\ \theta_{c_m} &= 2k\pi + \pi + \frac{2}{3}\pi, \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 k 는 현재 선택된 분할코일블록의 번호를 의미한다. 4극 3코일 형태의 전동기이므로, 이동자의 원점이 분할코일블록을 통과하는 동안, 분할코일블록 내에 위치하는 개별 상 코일의 전류 명령은 전기각 θ_e 를 따르므로 2주기의 정현파 곡선을 따르게 되고, 블록의 경계지점에서 항상 0이 된다. 추력전류 I_q 로 일정하게 가속되는 이동자가 첫 번째 및 두 번째 코일 블록을 통과할 때, 개별 상 코일에 분배되는 전류의 파형을 그림 5에 표시하였다.

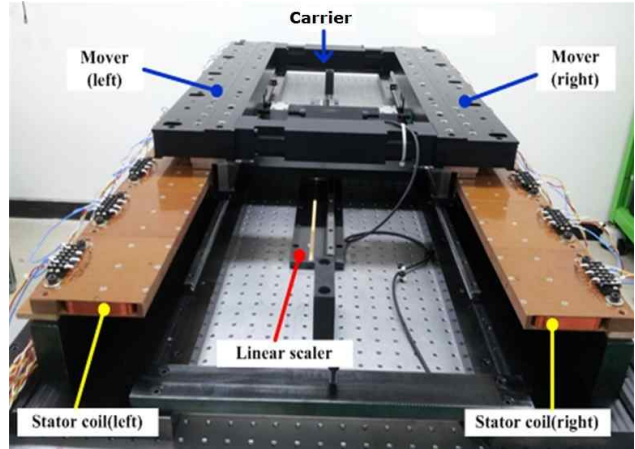


Fig. 6. Test setup for CS-CLPMLSM.

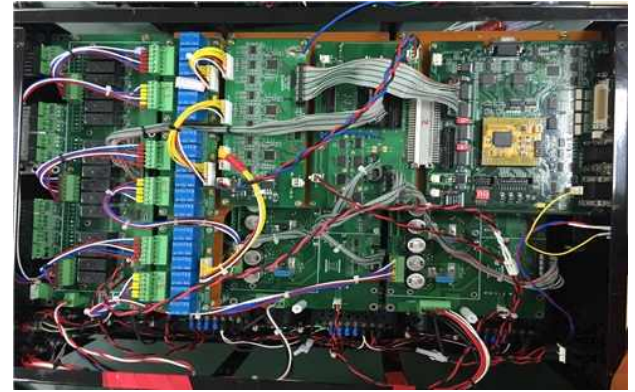


Fig. 7. Controller and current amplifiers for CS-CLPMLSM.

4. 추진장치 제작

평판디스플레이(FPD)의 유리 기판을 정밀 이송하기 위한 수동형 캐리어의 축소 모형이 그림 6과 같이 제작되었다. 폭 600 mm, 길이 800 mm를 가지는 수동형 캐리어는 총 무게 40 kg 급으로 제작되었다. 수동형 캐리어의 양 측면 레일을 따라서 코일분할 코어리스 영구자석선형전동기의 고정자용 분할 코일 33개가 설치되었으며, 이동자인 캐리어의 양 측면에 이와 상호작용하는 영구자석을 장착하여, 캐리어의 좌,우 양 측면에서 독립적으로 추진할 수 있는 구조이다. LM 가이드로 구성된 선형베어링이 수동형 캐리어를 지지하고, 비접촉 리니어 엔코더를 통해 수동형 캐리어의 영구자석 원점의 위치를 측정하게 하였다.

코일분할 코어리스 영구자석 선형전동기전동기를 구동시키기 위해서는 개별 전류증폭기가 개별 고정자 코일을 구동할 수 있어야 하지만, 본 논문에서는 단일 추진 시스템에 대한 검증을 위하여, 3개의 전류증폭기가 유효코일을 구동시키고, 나머지 여분의 전류증폭기가 캐리어의 순방향 및 역방향 이동시 새로운 코일로 전환될 수 있도록 대기하게 하였다. 즉 총 4개의 전류증폭기가 1개 모듈로 동작하게 하였다. 캐리어의 이동시 구동되어야

할 코일의 섹션을 릴레이 회로로 먼저 선택한 후, 전류 증폭기 모듈을 이 릴레이 회로에 연결함으로써, 필요한 전류증폭기의 수를 최소화 하였다.

그림 7에 실험에 사용된 전류증폭기, 릴레이 회로 및 추진제어기 모듈을 보인다. 전류증폭기는 OPA549 전력용 연산증폭기를 사용하여 아날로그 비례제어기를 구성하였다. 구동전압은 $\pm 15V$ 를 사용하였다. 이때 개별 코일의 저항은 4.857Ω , 인덕턴스는 $20mH$ 였다. 유효코일이 아닌 코일의 구동은 잘못된 추력 전류를 야기 시켜서 추력에 외란을 발생시키므로, OPA549 전력용 연산증폭기의 셋다운 기능을 사용하여 코일을 구동하지 않을 때에는 회로를 개로시켰다. 캐리어 추진 제어기는 TMS-320F28346 DSP 보드를 사용하였다. 1개 모듈을 동작시키기 위해서는 총 4개의 전류증폭기를 동작시켜서, 나머지 1개는 전환을 대기 할 수 있도록 구현하였다. 총 33개의 고정자 공심 코일은 릴레이회로를 통해 이러한 전류증폭기 모듈과 1:1로 연결되었으며, 릴레이 회로는 캐리어의 이동에 따라 전류증폭기 모듈과 연결되는 코일의 수를 항상 4개로 유지하게 하였다.

5. 실험결과 및 고찰

그림 6의 수동형 캐리어를 구성하는 두 개의 코일분할 코어리스 영구자석 선형전동기 중에서 왼쪽 모듈을 동작시켜 위치 서보제어 및 유효코일선택 알고리즘의 성능을 시험하였다. 위치 제어 명령은 S-커브 프로파일을 가지도록 하였으며, 속도 제어기에 안티 와인드업 기능을 추가하여, $30mm/sec$ 의 정속도 제어 명령 구간을 가지도록 하였다. 고정자의 원점을 0번째 분할코일블록의 a상 코일을 기준으로 하였으며, 이동자의 위치를 $-300mm$ 에서 $300mm$ 까지, $600mm$ 이동 거리에 대하여 추진실험을 실시하였다. 고정자코일 3개로 구성되는 분할코일블록의 길이는 $144mm$ 이므로, 이 때 실제 이동자와 상호 작용하여 힘을 발생시키는 분할코일블록의 순서는 -2번째부터 2번째 분할코일블록까지 변화한다.

그림 8~12에 이러한 위치서보제어 명령을 수행한 결과를 나타내었다. 그림 8은 S-커브 프로파일을 가지는 위치제어 명령에 대한 캐리어의 속도응답과 속도오차를 나타낸다. 그림 9는 위치제어 수행결과와 이에 따른 분할코일블록의 번호를 나타낸다.

제어 상황을 좀 더 명확하게 하기 위해서, 그림 10의 상단에 캐리어의 이동에 따른 분할코일블록의 번호를 나타낸다. 또한 하단에는 기계각 θ_m 과 함께, 이동자의 기준 위치가 지나가는 코일의 상 변화도 함께 나타낸다. 캐리어가 움직이는 동안 분할코일블록은 -2에서 +2로 순차적으로 변한다. 이 때 개별 분할코일블록 내에서는 $b-a-c$ 상 순서대로 구동됨을 알 수 있으며, 이는 그림 2 (c)와 완전히 일치한다.

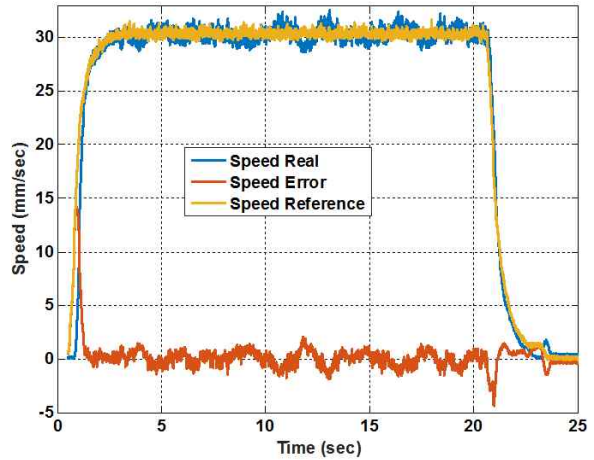


Fig. 8. Speed tracking performance.

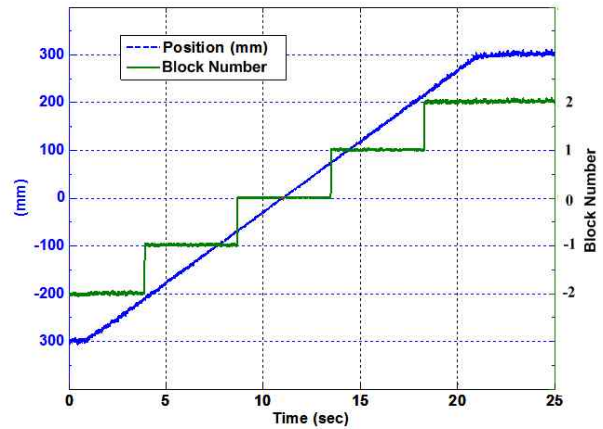


Fig. 9. Relationship position profile and coil block numbers.

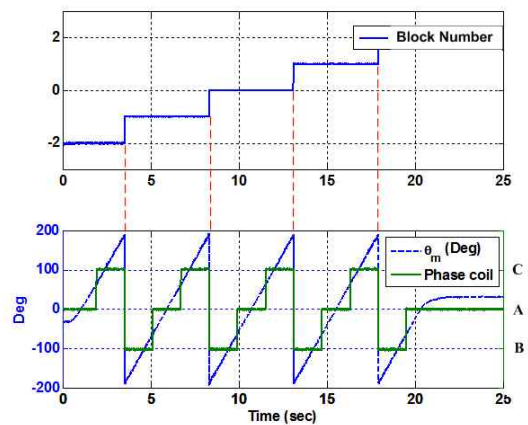


Fig. 10. Coil block number, mechanical angle θ_m , and coils passing through the mover origin.

그림 11의 아래 3개의 파형은 캐리어가 이동함에 따라 -1번 분할코일블록의 b, a, c 상 코일이 부담하는 전류의 파형을 나타낸다. 위상각 비교를 위하여 전기각 θ_e 를 첫 번째 상단에 제시한다. 그림 12는 캐리어가 이동함에 따라, 서로 다른 -1, 0, 1, 2 번째 분할코일블록에서의 a

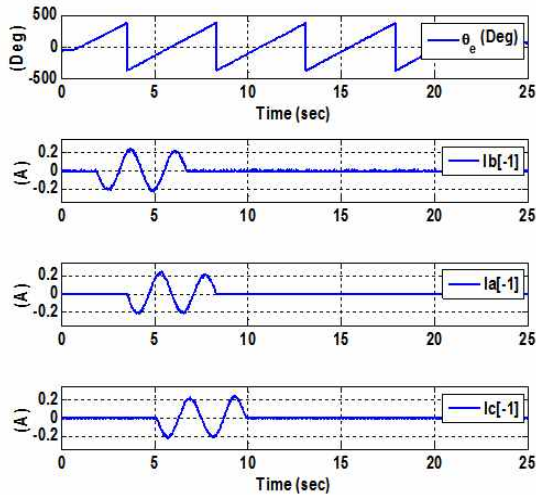


Fig. 11. Electrical angle θ_e and b,a,c-phase currents on the coil block -1.

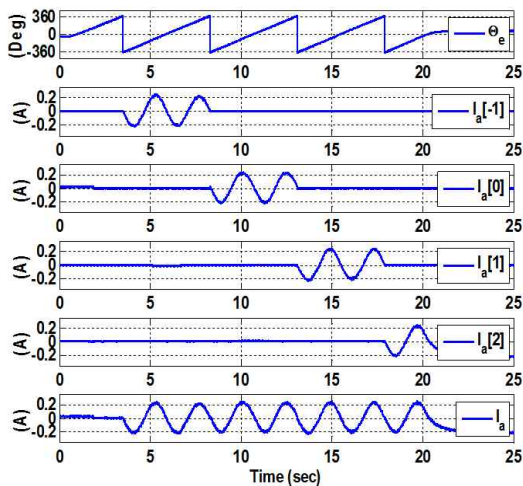


Fig. 12. Electrical angle θ_e , a-phase currents on the different coil blocks, and a-phase total current.

상 코일이 부담하는 전류의 파형을 나타낸다. 또한 맨 하단에는 모든 분할코일블록의 a상 코일이 부담하는 전류를 모두 합한 결과를 보인다. 이상의 파형으로부터 레일의 모든 a상 코일에서 발생하는 전류를 합하면 연속적인 정현파전류가 됨을 알 수 있다. 실제적으로 이 전류는 코어리스 영구자석 선형동기전동기의 구동전류와 그 패턴이 동일하다. 그림 12의 첫 번째 상단에는 위상 각 비교를 위하여 전기각 θ_e 를 제시한다.

그림 11과 12로부터 제안한 영구자석 선형동기전동기의 개별 코일에는 정현파 전류가 2주기 동안 흐르며, 코일 전류는 독립적으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

그림 8의 위치제어기의 속도추종 시험 결과는 만족스럽지 못한 성능을 나타내고 있다. 이러한 원인은 수동형 캐리어를 지탱하는 LM 가이드가 저속에서 심한 비선형 마찰 특성을 가지기 때문으로 짐작할 수 있다. 이 문제

는 비선형 특성을 보상하는 제어기법을 사용하여 해결할 수도 있지만, 근본적으로는 자기부상 등의 비접촉 선형베어링을 사용하여 마찰이 없는 구동시스템을 구현하면 좋은 제어 특성을 기대할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 유효코일 선택알고리즘이 잘 동작한다는 점을 강조하는 바이다.

6. 결 론

반도체, 평판디스플레이, 그리고 여러 산업분야의 자동화 설비는 다품종 소량 생산이라는 거대한 흐름을 따라가고 있다. 따라서 향후 자동화 설비의 레일 상에 놓인 다수의 수동형 캐리어들은 서로 독립적으로 빠르게 이동하면서 동시에 정밀한 위치제어 성능을 가질 필요가 있다. 공통의 고정자 레일을 따라서, 다수의 수동형 캐리어를 독립적으로 제어할 수 있는 새로운 형태의 영구자석 선형동기전동기를 제안한다. 제안된 선형추진전동기는 단일 캐리어에 대해서 공심형 코일이 분할된 형태의 영구자석이 움직이는 코어리스 영구자석 선형전동기로 고려될 수 있다. 따라서 기본 설계는 코어리스 영구자석의 설계 형태를 따른다. 제안된 추진전동기의 제어를 위하여, 새로운 개념의 유효코일 선택알고리즘을 제안하여, 코일의 영 전류 전환을 달성함으로써, 기존의 선형추진전동기 제어 알고리즘을 그대로 적용하여도 전체 레일구간에서 안정적으로 동작함을 실험적으로 보였다. 실험결과로부터, 영구자석 이동자를 추진시키기 위한 유효코일은 인접한 코일 3개로 정의되므로, 레일을 따라 이동자의 길이를 코일 4개 이상으로만 설계하면, 전체 레일 범위에서 원하는 수만큼 이동자를 추가하여 독립적으로 제어할 수 있으므로, 제안하는 추진시스템은 다수 캐리어들을 연속적으로 이송시키는 디스플레이 제조 공정라인 등의 새로운 자동화 시스템에 최적화된 물류이송 추진시스템이다. 그림 1에 제안된 다축 캐리어 제어기는 캐리어의 수와 동일한 추진제어 블록을 가져야 한다. 향후 EtherCAT 등의 고속 동기 통신을 지원하는 전류증폭기를 사용하고, 다축 캐리어 제어기를 이송 구간별로 나누어 설치한다면, 전체 공장자동화 라인에서 제품의 생산속도 조절이 가능한 유연생산 시스템을 쉽게 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2013~2015년도 한국전기연구원 주요 사업인 “FPD 진공공정용 자기부상컨베이어(EMC) 적용연구” 및 “로봇/자동화용 스마트 액추에이터 개발” 과제의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

본 연구는 2013~2014년도 창원대학교 연구비 지원을 받아 수행한 과제입니다.

References

- [1] K. C. Lee, "Section control of the electromagnetic levitation conveyor (EMLC) for a FPD glass carrying robot," *PhD thesis on Pusan National University*, Feb. 2014.
- [2] K. C. Lee, S. H. Moon, H. U. Ha, B. G. Park, J. W. Kim, J. Y. Baek, and M. C. Lee, "A novel high precision electromagnetic suspension for long-stroke movement and its performance evaluation," *J. Electr Eng Technol.*, Vol. 9, No. 2, pp. 514-522, Sep. 2014.
- [3] K. C. Lee, J. W. Moon, D. H. Koo, and M. C. Lee, "Magnetic levitated electric monorail system for flat panel display glass delivery applications," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 17, No. 6, pp. 566-572, Jun. 2011.
- [4] J. Y. Jeon, G. H. Hwang, J. W. Kim, and G. S. Kim, "A study on control of high power PM excited TFLM for long distance," *Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 11, No. 5, pp. 471-479, Oct. 2006.
- [5] R. Hellinger and P. Mnich, "Linear motor-powered transportation: History, present status, and future outlook," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 11, pp. 1892 - 1900, Nov. 2009.
- [6] A. Baratam, A. M. Karlapudy, and S. Munagala, "Implementation of thrust ripple reduction for a permanent magnet linear synchronous motor using an adaptive feed forward control," *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 4, pp. 687-694, Jul. 2014.
- [7] L. Shi and J. Xie, "Propulsion control for controlled-PM LSM levitation system with gap-length fluctuation," *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1694 - 1697, Oct. 2007.
- [8] Y. S. Kung, "Design and implementation of a high-performance PMLSM drives using DSP chip," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 3, pp. 1341-1351, Mar. 2008.
- [9] K. Suzuki, Y. J. Kim, and H. Dohmeki, "Driving method of permanent-magnet linear synchronous motor with the stationary discontinuous armature for long-distance transportation system," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 5, pp. 2227-2234, May 2012.
- [10] E. J. Park and Y. J. Kim, "A study on reduction of end cogging force by armature offset distance of double-sided PMLSM," *International Conference on Power Electronics (ICPE)*, pp. 2056-2061, Jun. 2015.
- [11] K. J. Yoon, D. Y. Lee, and G. T. Kim, "Permanent magnet shape optimization of moving magnet type PMLSM for thrust ripple minimization," *Transaction of Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 54B, No. 2, pp. 53-59, Feb. 2005.
- [12] H. K. An, J. H. Kim, K. B. Jang, and G. T. Kim,

"Optimal current density with coil thickness of double sided permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM)," *International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1563 - 1566, Dec. 2010.

- [13] B. M. Perreault, "Optimizing operation of segmented stator linear synchronous motors," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, Issue 11, pp. 1777 - 1785, Oct. 2009.

**이기창(李基彰)**

1973년 3월 22일생. 1998년 부산대 공과대학 전기공학과 졸업. 2000년 포항공대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2014년 부산대 대학원 기계공학부 졸업(공학박). 2000년~현재 한국전기연구원 근무. 동 연구원 전기추진연구본부 책임연구원/로봇 액추에이터 제어팀장.

**김민태(金旻太)**

1987년 5월 5일생. 2013년 창원대 제어계측공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.

**송의호(宋義鎬)**

1962년 11월 23일생. 1988년 부산대 전자공학과 졸업. 1990년 포항공대 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박). 1993년~1996년 삼성전기(주) 선임연구원. 2008년~2009년 미시간주립대 방문교수. 1996년~현재 창원대 메카트로닉스대학 전기전자제어공학부 교수.