

## 수직배열형 양측식 영구자석 선형 동기전동기의 설계 및 해석

(Design and Analysis of Permanent Magnet Double-Sided Linear Synchronous Motor with Perpendicular Arrangement)

김창업\* · 이성호

(Chang-Eob Kim · Seong-Ho Lee)

### Abstract

In this paper, a new linear synchronous motor - permanent magnet double-sided synchronous motor with perpendicular arrangement (PMDLSM), was proposed. It was designed to account for the drawbacks of conventional linear motors, such as the normal force and end effects. The detent force and the thrust were analyzed for different combinations of primary core modules and magnet poles of the machine, and the optimum combination was made. The characteristics of the perpendicular PMDLSM were analyzed by finite element method, and the experiments agreed well with the analysis.

Key Words : Permanent Magnet Double-Sided Linear Synchronous Motor, Perpendicular Arrangement, Thrust, Detent Force

### 1. 서 론

현재 선형 전동기는 많은 연구가 진행되어 자동차 시스템분야 등에서 핵심 구동장치로 응용개발이 날로 확대되고 있다. 선형 전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮고 역률이 떨어지는 등의 단점이 있지만, 직접 직선추력을 발생시켜 동력변환 시스템에서 발생하는 문제점을 근본적으로 해결하여 시스템의 전체적인 효율 향상 및 성능 향상을 기대

할 수 있다[1-3]. 영구자석 회전형 전동기는 전자기철심의 고정자와 영구자석이 장착된 회전기가 회전축을 중심으로 동심원 구조를 이루고 있음으로서 자기 흡인력의 문제점 없이 원활한 구동이 가능하지만, 이와 같은 회전을 전개해서 선형 전동기를 만들게 되면 전기자 철심과 영구자석 간에 작용하는 자기흡인력의 문제점으로 인하여 선형 전동기의 기술 개발과 응용분야가 제한된다. 철심과 영구자석이 마주보는 영구자석 선형동기전동기의 구조적 형상에서 발생하는 자기 흡인력의 문제점을 해결하기 위해서 전기자 철심을 뺀 무철심형이 있으나 철심이 없는 관계로 추진력이 없고 발열이 크게 발생하는 단점을 가지고 있다[4]. 그리고 양측식 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Double-sided Linear Synchronous Motor : PMDLSM)으로 응용제품이 사양에 맞추어서 설계되

\* 주(교신)저자 : 호서대학교 전기공학과 교수

\* Main(Corresponding) author : Department of Electrical Eng., Hoseo University, Professor

Tel : 041-540-5657, Fax : 041-540-5658

E-mail : cekim1@naver.com

접수일자 : 2013년 5월 19일

1차심사 : 2013년 5월 21일, 2차심사 : 2013년 7월 16일

심사완료 : 2013년 7월 23일

어 사용 되어오고 있지만 구조가 복잡하여 제작에 어려움이 생긴다. 이에 대한 대책으로 자기흡인력을 상쇄시키며, 고추력 및 초정밀 제어가 가능하고, 2차측(계자)을 길게 설계하여 장거리 이송에 적합한 구조를 갖는 수직배열형 양측식 영구자석 선형 동기전동기(Permanent Magnet Double-sided Linear Synchronous Motor with Perpendicular Arrangement : Perpendicular PMDLSM)를 구현하였다. 본 논문에서는 자기흡인력을 상쇄시키며, 고추력 및 초정밀 제어가 뛰어난 Perpendicular PMDLSM을 기존의 선형 전동기와 비교하고, 3차원 유한요소 해석 프로그램인 Flux에 의한 특성해석과 실험을 비교, 검토하여 그 유효성을 입증하였다.

## 2. 선형 전동기의 원리 및 터널액추에이터

### 2.1 기존 선형 전동기의 기본원리 및 문제점

선형 전동기는 그림 1과 같이 일반 회전형 전동기를 그림의 화살표 방향으로 잘라서 펼쳐놓은 형태이다.

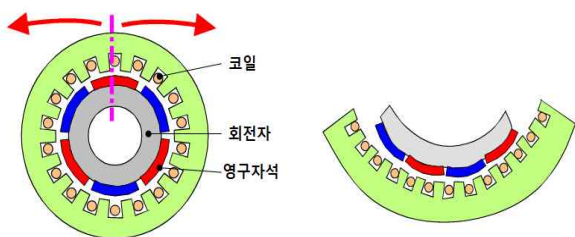


그림 1. 선형전동기의 개념도  
Fig. 1. Concept of the linear motor

그림 1의 개념도처럼 선형전동기는 가동자 및 고정자 중 어느 한 쪽에 고정 자석을 놓고 나머지 한 쪽에 교번하는 다상 전력을 보내 양자 사이에 전자력이 작용하여 일정 방향으로 추력이 발생하도록 한다. 기존의 일반 전동기가 회전형의 토크를 발생시키는 것에 비해 직선방향으로 미는 힘인 추력을 발생시키는 점

이 다르나, 그 전자기적인 구동원리는 근본적으로 같다. 그러나 회전형 전동기는 회전방향으로 무한 연속 운동을 하지만 선형전동기는 구조적으로 길이가 유한하여 입구단과 출구단에 단부가 존재하므로 누설자속이 생기고, 진행자계와 자속분포가 불균일하여 손실을 유발하기 때문에 특성이 악화된다. 따라서 전기자의 치와 영구자석 사이에 강력한 자기 흡인력이 발생하여 시스템의 정밀도가 떨어지고, 일정한 공극을 유지하는 지지기구의 마모가 심하게 발생하게 되고, 공극이 크기 때문에 회전형 전동기에 비해 효율 및 역률이 낮다. 그러나 직선 구동력이 필요한 시스템에서 선형 전동기는 회전형 전동기에 비해 직선 구동력을 직접 발생시키므로 구조가 복잡하지 않고, 에너지 손실이 적고, 소음이 작으며, 운전속도에 대해서도 비교적 제한이 없는 장점이 있다. 따라서 선형 전동기는 회전형 전동기에 비하여 직선 운동을 하는 시스템에서 효율적인 운전과 기능이 유리하다[5-6].

### 2.2 자기흡인력의 발생 원인

디텐트력은 영구자석 선형전동기의 성능에 진동, 소음 등으로 악영향을 미치게 하며, 추력 리플의 원인이 된다. 주된 원인으로서는, 자기흡인력과 단부효과가 있다. 자기흡인력은 회전형 전동기에서의 코깅 토크에 해당하는 것으로, 전기자가 여자 되고 있지 않을 때 영구자석으로부터 발생하는 자속이 자로의 자기저항의 변화에 의해 증감하고, 자장의 에너지가 변화함으로써 전기자와 계자의 사이에 발생하는 힘이다. 이것은 영구자석과 전기자 철심의 상대적인 위치에 의해 주기적으로 발생한다. 그림 2는 영구자석 선형전동기에서 자기흡인력이 발생하는 원리를 나타낸다[7].

그림 2의 (a)와 같이 영구자석이 전기자 철심의 바로 아래에 위치할 경우, 철심은 자기적으로 안정한 위치에 있기 때문에 자기흡인력은 발생하지 않는다. 그러나 그림 2의 (b)와 같이 영구자석이 떨어졌을 때는 자석이 원래가 안정한 위치에 되돌아오게 하기 위해서 자기흡인력이 발생한다. 그림 2의 (a)와 같이 중앙에 영구자석을 배치하여 자기흡인력을 상쇄할 수 있는 연구가 필요하다. 영구자석 선형 전동기는 1차측

(전기자)과 2차측(계자)과의 상대관계에 따라서 그림 3의 편측식과 양측식으로 분류할 수 있다.

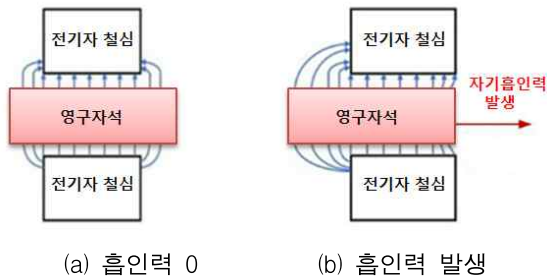


그림 2. 영구자석 선형전동기의 자기흡인력 발생하는 원리  
Fig. 2. Principle of the magnetic attraction force of PMLSM



그림 3. 영구자석 선형 전동기의 구조  
Fig. 3. Structure of PMLSM

그림 3 (a)와 같이 회전형 전동기를 잘라서 펼쳐놓은 것처럼 1차측이 한쪽만 있는 경우를 편측식이라 하며, 그림 3 (b)와 같이 양쪽에 대칭으로 있는 경우를 양측식이라고 한다. 양측식 선형 전동기는 가운데 영구자석이 공극 중앙에 있으면 자기흡인력이 상쇄되지만 공극이 서로 불균일하면 자기흡인력이 크게 발생하여 이를 지지하기 위한 2차측의 설치 및 가공에 어려움이 따라 그 응용범위가 제한된다.

위와 같은 자기흡인력을 줄이고 기기의 소형 경량화를 위한 방법으로 그림 4의 터널 액추에이터(Tunnel Actuator: TA)가 제안된 바 있다[8-10]. TA의 기본원리는 그림 4와 같이 영구자석으로부터 구성되는 평판상의 가동자가 상하로부터의 자극에 둘러 싸여지고, 자속의 “터널” 안을 간단한지지 기구로 왕복하는 구조이다. G형 철심의 형상이 그림 4 (a)에 1번, 2번과 같이 교대로 배치되어 자속의 방향이 교차되기 때문에 철심에 감는 코일을 간단한 형태로 구성할 수가 있다.

이 철심에 의해 PMDLSTM과 같이 상하의 사이에 영구자석이 끼워져 있는 형상이 되고, 반대되는 극이 교차로 있기 때문에 한 쪽으로 끌어당길 수 있는 성질이 서로 상쇄되어 없어진다. 이것에 의해, 가동자와 지지기구의 구조가 간소화되어 기기의 소형 경량화가 가능하고, 상하의 자극 치 사이에 자속이 흐름으로써 자속 누설이 적고, 효율적으로 구동함으로써 큰 추력과 가속도를 실현할 수 있다[11].

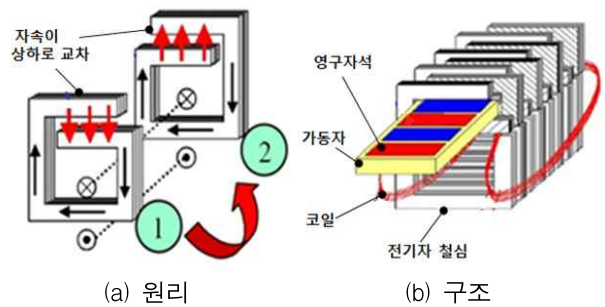


그림 4. TA의 원리 및 구조  
Fig. 4. Principle and structure of TA

### 3. Perpendicular PMDLSTM의 특성해석

#### 3.1 새로운 방식의 Perpendicular PMDLSTM

새롭게 개발된 Perpendicular PMDLSTM은 편측식 영구자석 선형동기전동기(PMSLSM)의 자기흡인력의 문제점을 해결하고 기존의 PMDLSTM보다 구조가 단순하여 기기의 소형 경량화를 실현할 수 있다. 이를 위해 영구자석이 선형 전동기의 진행방향에 대해 수직으로 배치되고 1차측은 양측식으로 여러 개의 철심 모듈의 조합으로 이루어지며 전기자로 작용한다[12]. 수직배열한 영구자석과 전기자간의 자속흐름이 균일하게 생성되어 PMSLSM에서 발생하는 자기흡인력에 의해 가이드가 마모되는 문제를 해결할 수 있고, 대용량의 추력과 빠른 이송속도를 얻을 수 있다. 그림 5는 Perpendicular PMDLSTM의 균일한 공극과 불균일한 공극일 때 자기흡인력 상쇄의 원리를 나타낸다.었을

경우 상단과 하단에는 자속밀도의 변화가 거의 없는 것을 확인하였다.

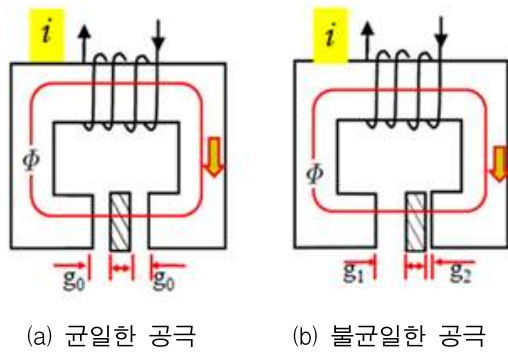


그림 5. Perpendicular PMDLSM의 자기흡인력 상쇄의 원리  
 Fig. 5. Principle of attractive force offsetting of Perpendicular PMDLSM

Perpendicular PMDLSM은 중앙에 영구자석을 배치함으로써 그림 5 (a)의 균일한 공극과 그림 5 (b)의 불균일한 공극일 때 식 (1)과 같이 동일하여 이 두 가지 조건에서 권선수와 전류가 일정하면 영구자석을 통과하여 가동자전체에 흐르는 자속  $\phi$ 는 식 (2)와 같이 거의 변화가 없다.

$$2 \times g_0 = g_1 + g_2 \quad (1)$$

$$\phi \approx \frac{Ni}{2 \times g_0} = \frac{Ni}{g_1 + g_2} \quad (2)$$

여기서  $g_0$ 는 균일한 공극,  $g_1, g_2$ 는 불균일한 공극  $\phi$ 는 가동자에 흐르는 자속,  $N$ 은 코일의 턴수,  $i$ 는 전류이다.

TA와 Perpendicular PMDLSM의 특성을 비교하면 TA는 장거리 수송이 어려운 단점이 있으나, Perpendicular PMDLSM은 거리의 제약이 없다. TA는 코일 하나로 N, S의 다극화가 가능하나 Perpendicular PMDLSM은 원하는 극 수 만큼 코일을 감아야 한다. 또한 TA는 영구자석 가동자가 간단하고 가벼워서 영구자석 구동형에 고가속도 응용장비에 적합하고 Perpendicular PMDLSM은 거리의 제약이 없

으므로 코일 가동형 장리 이송장치에 적합하다. 그림 6은 Perpendicular PMDLSM의 각 부의 명칭을 나타내고 그림 7은 실제 사진이다.

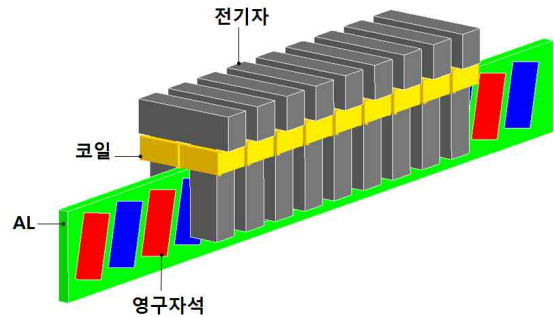


그림 6. Perpendicular PMDLSM의 각부의 명칭  
 Fig. 6. Part names of Perpendicular PMDLSM

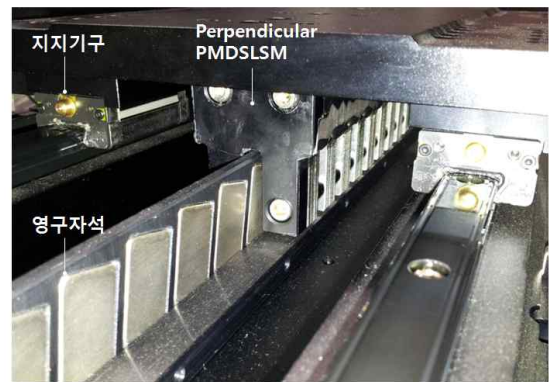


그림 7. Perpendicular PMDLSM의 사진  
 Fig. 7. Photo of Perpendicular PMDLSM

### 3.2 전기자와 영구자석 극수 조합 및 분석

전동기를 설계함에 있어 극 수, 슬롯 수의 조합은 전동기의 사용목적 및 구동방식 등에 따라 초기 설계 단계에서 결정되어야 하는 중요한 요소다. 영구자석 회전형전동기의 개발은 토크나 효율 특성의 향상에 주안점이 맞추어져 있었지만 최근에는 코깁 토크나 철심에 의한 전력손실이 토크에 미치는 영향 등, 토크 리플에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 하나의 예로서 극수와 슬롯 수의 조합에 의해서, 코깁 토크를 저감하는 방법이 제안된 바 있다[13]. 회전형 전동

기의 극 수, 슬롯 수 조합과 마찬가지로 회전형 전동기와 근본적으로 구동원리가 같은 선형 전동기 또한 전기자 수와 영구자석 수의 조합은 선형 전동기의 사용 목적 및 구동방식 등에 따라 초기 설계단계에서 결정되어야 한다[14]. 이에 본 논문에서는 유한요소 해석을 통해 Perpendicular PMDLSM의 전기자 수와 영구자석 수의 조합에 의한 추력 및 디텐트력 해석을 통해 적절한 설계방식을 제안한다.

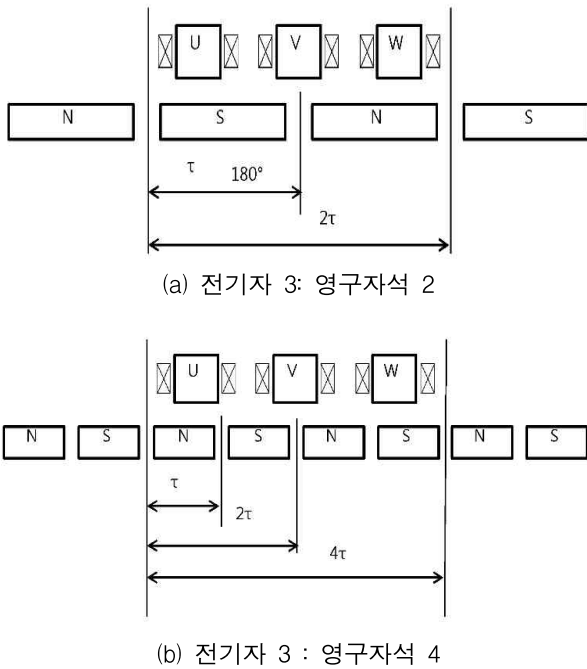


그림 8. 전기자와 영구자석 배치도  
Fig. 8. Displacement of armature cores and magnets

일반적으로 선형 전동기의 전기자 수는 3상 코일을 감기 위해서 3의 배수로 설정하고, 영구자석 극수는 균형을 맞추기 위해서 2의 배수로 설정한다. 그림 8은 전기자 수가 3에서 영구자석 수가 각각 2개와 4개일 때 선형전동기 기본조합의 예를 나타낸다. 여기서 선형 전동기의 상수는 3상 전원으로 전기자를 구동할 경우 3이며, 5상 전원으로 구동할 경우 5가 되어 3 이상의 홀수로 하는 것이 일반적이고 선형전동기 상수에 의해 각 전기자 모듈의 코일에 인가되는 전류의 위상 차이가 결정된다. 이때 전기자 간격을  $c$ , 영구자석 극

간격을  $\tau$ 라 하면 전기자와 영구자석이 공극을 통해 접하는 면적에서 전기자 모듈수와 영구자석수의 최소 공배수가 커질수록 추력특성이 우수하다.

본 논문에서는 전기자 모듈 수 9개와 영구자석 수 8개로 최소공배수가 72개를 갖는 Perpendicular PMDLSM의 조합을 통하여 효율이나 추력리플 관점에서 유리하도록 설계하였다. 수직배열을 통하여 1차 축의 전기자를 서로 독립적으로 구성시켜 전원이 각 전기자에 공급되면 동일한 크기의 자속이 진행방향에 수직으로 발생하게 되어 누설 자속감소로 인하여 효율이 향상된다. 이를 입증하기 위하여 3D 유한요소해석을 이용하여 전기자와 영구자석의 조합을 연구하였다. 이 연구 방법은 전기자의 개수와 길이를 동일하게 주어진 조건에서 그림 9와 같이 극수에 따른 추력과 디텐트력을 해석하는 방법이다.

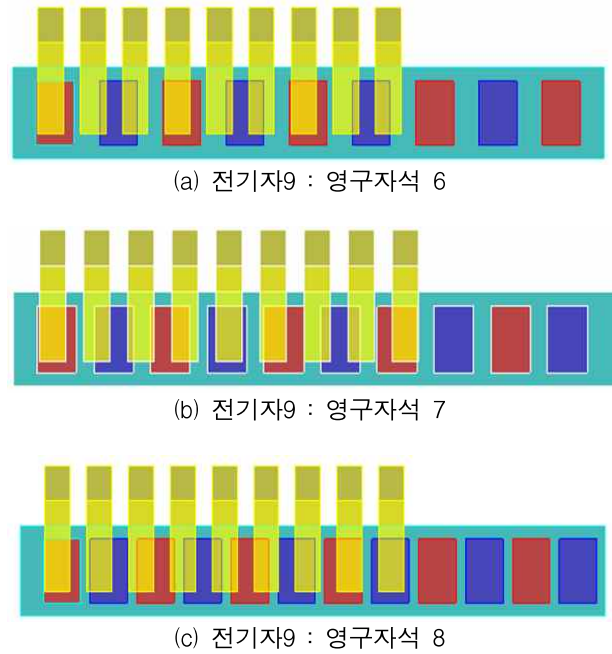


그림 9. 전기자 수와 영구자석 극수 조합  
Fig. 9. Combination of armature cores and magnets

그림 10은 그림 9에서 조합별로 설계된 Perpendicular PMDLSM의 해석된 결과를 정리한 그래프이다. 9 대 8 모델의 디텐트력이 18N, 최대추력이 80N

으로 추력 및 디텐트력의 종합특성이 가장 우수하다. 이 검토결과에 알 수 있듯이 전기자와 영구자석 조합에서 이 둘의 최소공배수가 커질수록 추력리플이 감소한다. 이로 인하여 Perpendicular PMDLSM은 전기자와 영구자석의 조합을 9 대 8로 하여 효율이나 추력리플 관점에서 유리하도록 설계하였다.

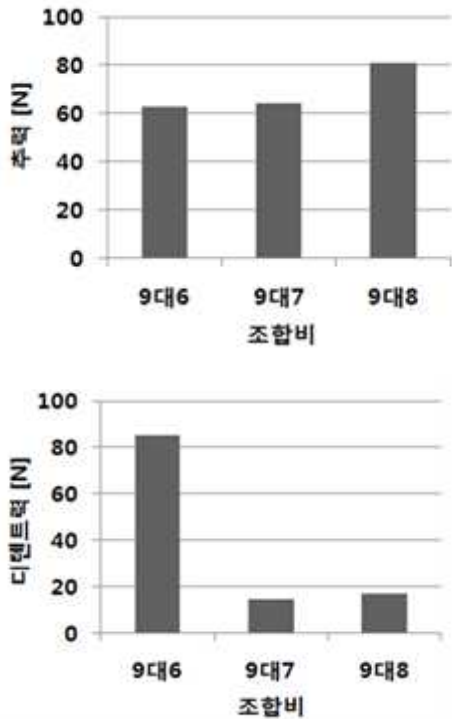


그림 10. 전기자와 영구자석 조합에 따른 추력 및 디텐트력  
Fig. 10. Thrust and detent force for different combinations of armature cores and magnets

### 3.3 유한요소법을 이용한 특성해석

Perpendicular PMDLSM는 수직 배열형으로 세워진 형태 때문에 공극의 불균형을 해소할 수 있다. 이를 입증하기 위해서 3D 유한요소 해석을 이용하여 기존의 PMSLSM과 Perpendicular PMDLSM의 특성을 해석하였다. PMSLSM과 Perpendicular PMDLSM의 해석모델은 각각 그림 11과 그림 12에 나타내었고 설계 사양은 표 1과 같이 동일하게 설계하였다.

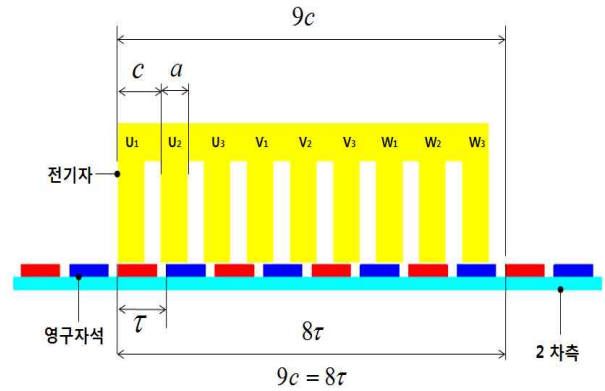


그림 11. PMSLSM의 해석 모델  
Fig. 11. Analysis model of PMSLSM

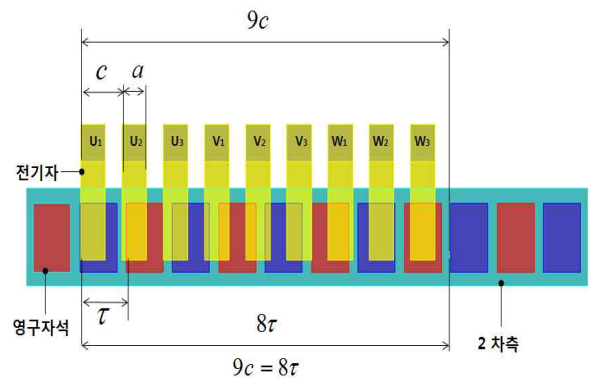


그림 12. Perpendicular PMDLSM의 해석 모델  
Fig. 12. Analysis model of Perpendicular PMSLSM

표 1. 설계 사양

Table 1. Design specifications of analysis model

	항목	수치
1차측	전기자 수	9
	전기자 간격c	20mm
	철심 폭a	12mm
	턴수	200
2차측	정격전류	3.6A
	영구자석 종류	NdFeB
	영구자석 잔류자속밀도	1.2T
	영구자석 수	8
	영구자석 크기	28×18×15mm
	극 간격 τ	22.5mm

이와 같이 2가지 모델을 같은 설계사양으로 모델링한 이유는 PMSLSM과 Perpendicular PMDLSM을 동일한 조건에서 해석한 결과를 비교하여 그 유효성을 검토하기 위함이다.

그림 13은 그림 11에서 PMSLSM의 공극을 0.5mm, 1mm, 1.5mm으로 3가지 모델을 만들고 공극에서의 자속밀도를 해석하여 나타낸 그래프이다. 해석결과 공극이 0.5mm일 때 1.13T, 1mm일 때 1T, 1.5mm일 때 0.9T로 공극 간격에 따른 자속밀도의 차이가 크게 나타났다. PMSLSM은 전자석과 영구자석이 마주보는 구조로 인하여 공극의 변화에 따른 자속의 변화가 크기 때문이다.

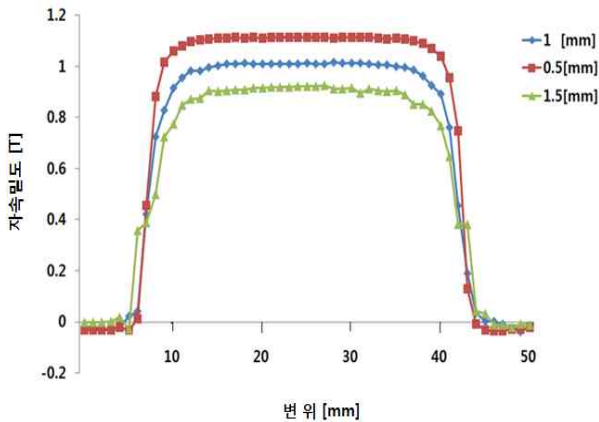


그림 13. PMSLSM의 변위에 따른 공극 자속밀도  
Fig. 13. Air gap magnetic flux density of PMSLSM vs. displacement

그림 14는 PMSLSM에 U상은 3.6A, V상과 W상은 각각 1.8A의 전류를 인가하여 공극 간격이 각각 0.5mm, 1mm, 1.5mm로 3가지 모델의 추력특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과 PMSLSM은 공극 간격에 따른 추력의 변화가 10N이상 큰 차이가 났다. PMSLSM은 공극 간격에 따른 자속의 변화가 크기 때문에 이와 같은 문제가 발생한다. 그림 15는 Perpendicular PMDLSM의 정면도를 나타낸다. 2차축 계자는 영구자석이 선형 전동기의 진행방향에 대해 수직으로 배치되고 1차축은 양축식으로 이루어지며 전기자로 작용한다.

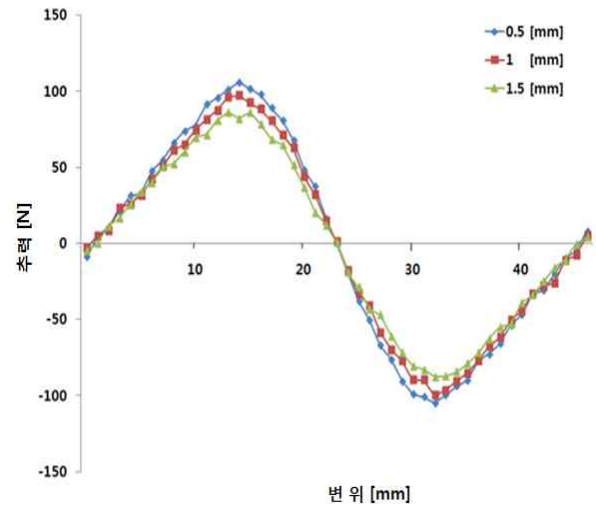


그림 14. 공극에 따른 PMSLSM의 추력  
Fig. 14. Thrust of PMSLSM vs. displacement for different air gap

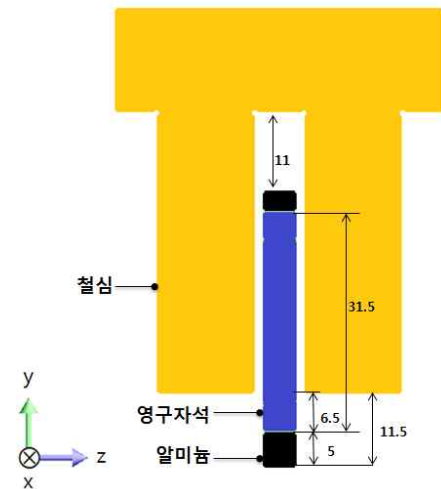


그림 15. Perpendicular PMDLSM의 정면도  
Fig. 15. Front view of Perpendicular PMDLSM

좌, 우 공극이 1mm로 균일한 그림 15에 Perpendicular PMDLSM의 정면도를 기준으로 가동자의 위치가 다른 4가지 모델을 그림 16에 나타내었다. 그림 15를 기준으로 그림 16의 (a)는 왼쪽으로 0.5mm, (b)는 오른쪽으로 0.5mm, (c)는 위로 0.5mm, (d)는 아래로 0.5mm로 가동자의 위치를 변화하였다. 이는 공극위치에 따른 Perpendicular PMDLSM의 특성을 검토하기 위함이다.

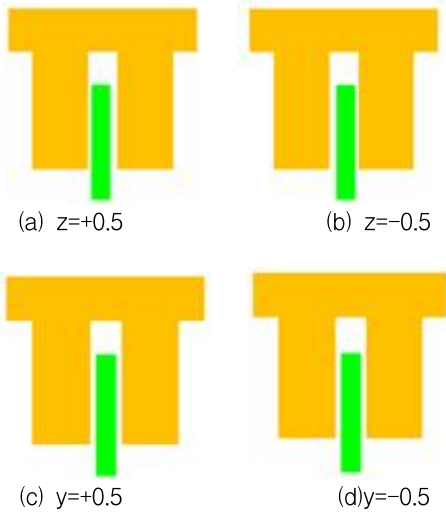


그림 16. 가동자 위치에 따른 Perpendicular PDLSM 배치형상  
 Fig. 16. Different mover position of the Perpendicular PMDSLMSM

그림 17은 Perpendicular PMDSLMSM의 공극에서 해석된 자속밀도를 나타낸 그래프이다. 여기서 U상은 3.6A, V상과 W상은 각각 1.8A의 전류를 인가하였다. 자속밀도의 변화가 PMSLSM에 비하여 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다.

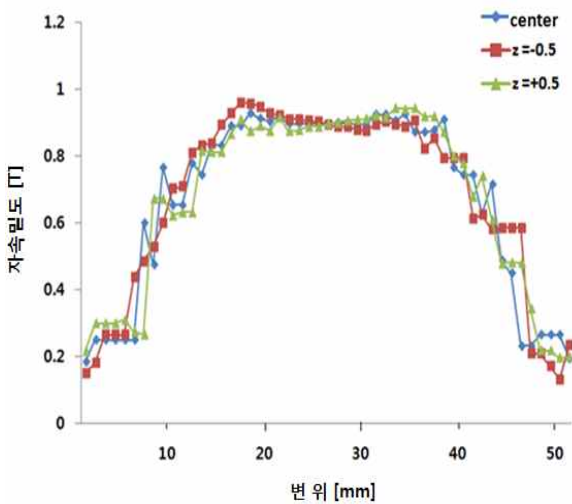


그림 17. PMSLSM의 변위에 따른 공극 자속밀도  
 Fig. 17. Air gap flux density of Perpendicular PMDSLMSM vs. displacement for different mover position

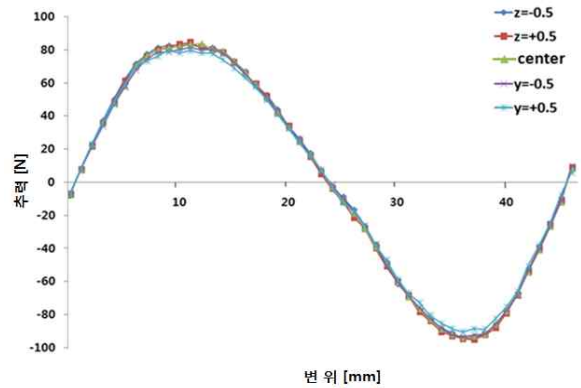


그림 18. 가동자 위치에 따른 Perpendicular PMDSLMSM의 공극자속밀도  
 Fig. 18. Thrust of PMSLSM vs. displacement for different air gap

그림 18은 그림 16의 Perpendicular PMDSLMSM의 4가지 모델에 추력특성을 비교한 그래프이다. 그 결과 Perpendicular PMDSLMSM는 PMSLSM에 비하여 가동자가 상하, 좌우로 0.5mm로 치우쳐 있을 때 이동 중의 추력특성의 변화가 거의 없었다. Perpendicular PMDSLMSM은 중앙에 영구자석을 배치함으로써 PMSLSM에 비하여 공극 변화에 따른 자속과 추력특성의 변화가 상대적으로 적었다. 이로 인하여 좌, 우 공극의 불균형에 대한 자기흡인력이 상쇄되어 지지기구의 부담감소로 전체 시스템의 소형 경량화를 이룰 수 있다.

그림 15의 Perpendicular PMDSLMSM의 정면도를 보면 가동자와 영구자석의 간격이 6.5mm이다. 이로 인하여 유한요소 프로그램으로 해석한 결과 수직력이 -70N이 발생한다. 이에 대한 해결 방안으로 영구자석과 가동자의 높이를 비슷하게 하기 위해 2차축을 y방향으로 올리면서 해석을 하여 수직력을 검토하였다. 그림 19는 가동자 높이를 y축 기준으로 0에서 7mm까지 0.5mm간격으로 올리면서 해석한 수직력을 나타낸다. 가동자의 높이가 내려가면서 앞에서 설명한 그림 5의 자기흡인력 상쇄와 같은 원리로 인하여 수직력이 0에 가까워졌다.

이상적인 Perpendicular PMDSLMSM의 경우 이와 같이 가동자와 영구자석의 높이를 같게 하여 설계하면 가동자가 받는 수직력을 크게 감소할 수 있지만 영구



자석과 알미늄을 조합하여 제작된 2차측의 기계적 강성과 제작비용을 고려하여 실제 형상은 그림 15의 정면도와 같다.

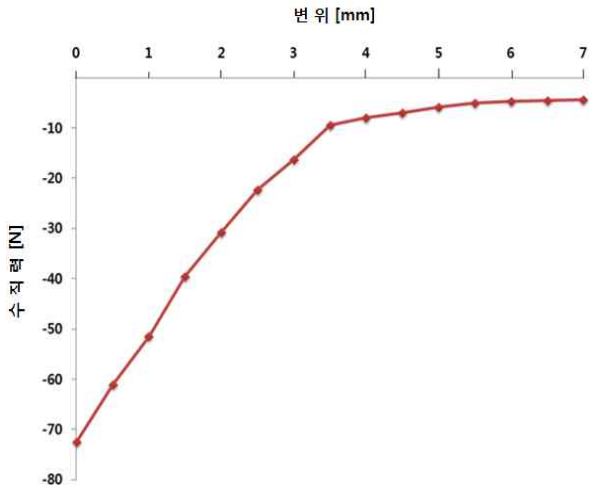


그림 19. 2차측 위치에 따른 Perpendicular PMDLSTM의 수직력

Fig. 19. Normal force of Perpendicular PMDLSTM vs. secondary position

그림 20은 수직배열형 선형전동기의 3차원 요소 분할도와 자속 분포도를 나타낸 것이다. 에너지 밀도가 높은 전기자와 철심사이의 공극을 세밀하게 요소분할한 결과, 요소 수는 90만개 내외로 나누어졌다.

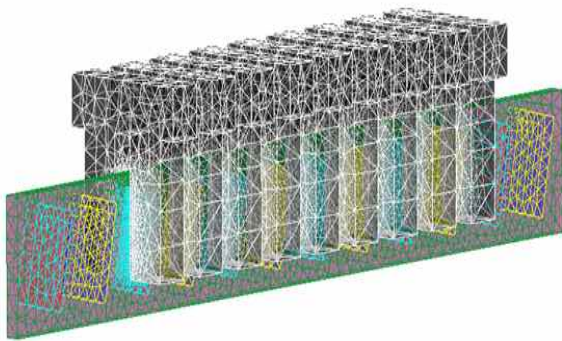


그림 20. 3차원 요소 분할도  
Fig. 20. 3D finite element mesh

그림 21은 Perpendicular PMDLSTM의 가동자의 이동거리에 따른 자속분포도를 나타낸다.

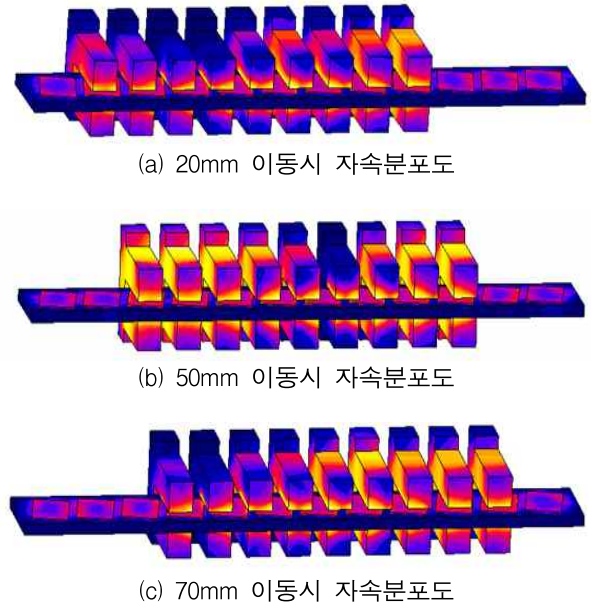


그림 21. 이동 변위에 따른 자속분포도

Fig. 21. Magnetic flux distribution for different displacement

그림 22는 3차원 시뮬레이션 결과인 선형전동기의 디텐트력을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 선형전동기의 최대 디텐트력(peak to peak)은 약 15N이며, 그 주기는 영구자석 간의 거리인 22.5mm로 나타내었다. 그림 23은 정격전류를 인가한 후의 추력특성 결과이다. 정격전류는 3.6A로 인가했을 때, 해석된 추력은 약 110N으로 예상할 수 있다.

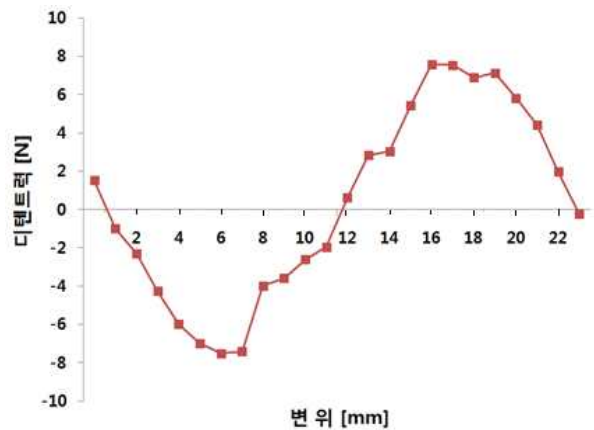


그림 22. 디텐트력  
Fig. 22. Detent force vs. displacement

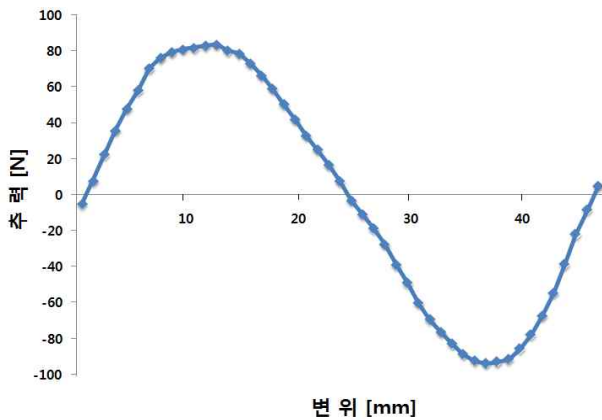


그림 23. 추력 특성  
Fig. 23. Thrust vs. displacement

#### 4. 실험 및 결과 검토

그림 24는 Perpendicular PMDLSM의 기초성능을 알아보기 위한 실험장치의 구성요소이다. 여기서 A : 로드셀, B : 터치스크린, C : 변위측정기, D : 오실로스코프이다. 로드셀이 Perpendicular PMDLSM과 연결되어 이동시키면 변위측정기가 변위에 따른 추력을 터치스크린에 출력하여 실험값이 저장이 된다. 실험 방법은 다음과 같다.

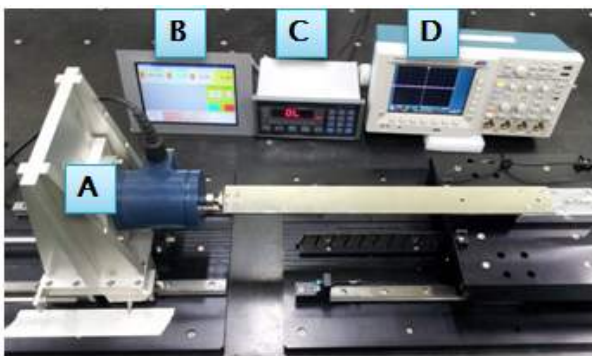


그림 24. Perpendicular PMDLSM 실험장치  
Fig. 24. Experimental apparatus of Perpendicular PMDLSM

##### 4.1 역기전력 측정

역기전력의 파형을 측정할 경우는 직류전원장치를 제거하고, 선형전동기와 로드 셀과의 연결부분을 해제

한 후 오실로스코프에 U,V,W 각 상에 접속하여 Perpendicular PMDLSM을 일정속도로 움직이면서 측정하였다.

##### 4.2 추력 측정

추력은 로드셀과 Perpendicular PMDLSM을 결합시키고 직류 전원장치로 전류를 인가한 상태에서 로드셀에 부착된 핸들을 이용하여 일정속도로 이동하면서 측정하였다.

##### 4.3 디텐트력 측정

디텐트력은 전원을 인가하지 않는 상태에서 추력 측정과 같은 방법으로 측정하였다.

그림 25는 Perpendicular PMDLSM을 무부하 상태에서 오실로스코프를 연결하고 인위적으로 직선운동을 발생시켜 측정된 역기전력의 파형이다. 그림에서 각 상의 위상은 120도의 위상차를 가진 이상적인 정현파로 균형 잡힌 결선이 되어있음을 알 수 있다.

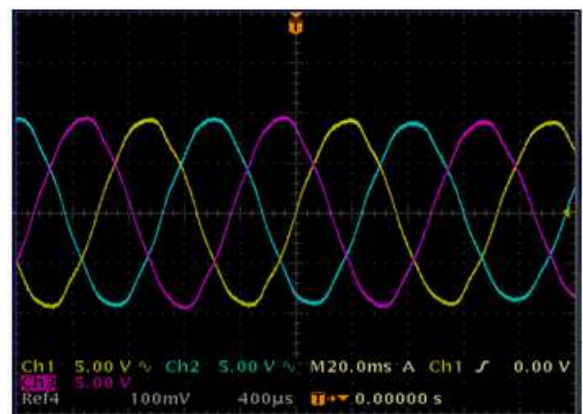


그림 25. Perpendicular PMDLSM의 역기전력의 파형  
Fig. 25. Back EMF of Perpendicular PMDLSM

그림 26은 실험 장치에 정격전류 3.6A를 인가하여 측정된 추력과 3차원 유한요소해석으로 추력을 비교한 그래프이다. 그림 26에서 보여주는 것과 같이 추력은 영구자석의 2 $\tau$ 주기로 반복 진행됨을 보여주며, 파형 또한 정현파에 가깝게 나타난 것을 알 수 있다. 추

력의 실험 및 결과 분석에서는 1상당 정격전류 3.6A일 때 실험값이 80N, 해석값이 83N으로 해석됨으로써 디텐트력과 추력의 결과는 실험과 시뮬레이션 수치가 매우 근접함을 알 수 있다.

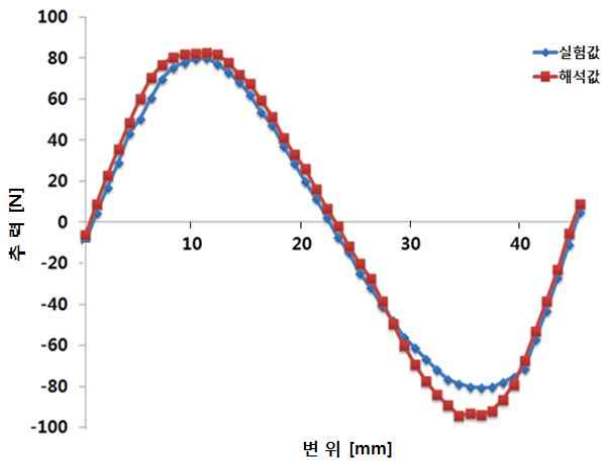


그림 26. 실험과 해석에 의한 추력 비교  
Fig. 26. Comparison of experiment and analysis for thrust vs. displacement

로 측정한다. 그림 28은 실험과 해석을 통한 디텐트력을 비교한 그래프이다. 선형 전동기는 구조상의 특성상 단부효과와 전기자와 영구자석 사이에 작용하는 흡인력에 의해 디텐트력이 발생한다. Perpendicular PMDLSM의 디텐트력은 영구자석의 피치에 대응하여 22.5mm를 한 주기로 하여 해석값이 15.2N, 실험값이 13.8N으로 해석되었다.

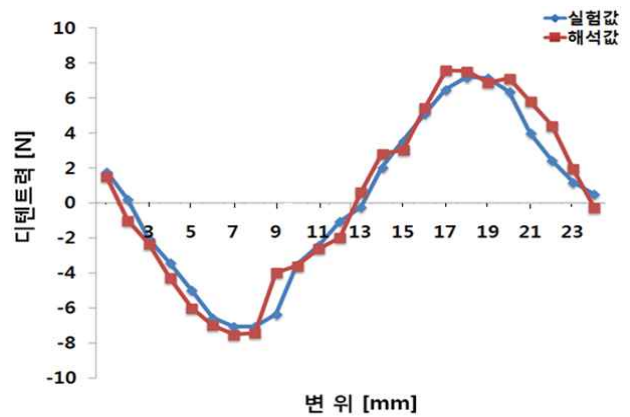


그림 28. 실험과 해석에 의한 디텐트력 비교  
Fig. 28. Comparison of analysis and experiment for detent force vs. displacement

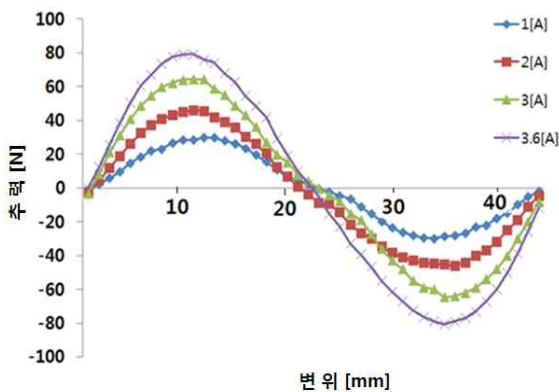


그림 27. 인가전류에 따른 추력  
Fig. 27. Thrust vs. displacement for applied currents

그림 27은 인가전류를 달리하여 측정된 추력값이다. 전류가 증가함에 따라 추력 또한 비례적으로 증가하였다. 디텐트력 측정은 실험 장치에 전원공급장치를 제거한 무부하 상태에서 추력 실험과 동일한 방법으로

## 5. 결론

본 논문에서는 기존의 PMSLSM와 다른 방식의 Perpendicular PMDLSM을 제안하고 원리 및 구조 그리고 특성에 대해서 연구하였다. 그리고 3D 유한요소 해석과 실험 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다. Perpendicular PMDLSM은 양극식 구조이므로 좌우 공극이 불균일해도 PMSLSM에 비하여 자속밀도와 추력의 변화가 현저히 줄어들었다. 또한 전기자와 영구자석 조합별 추력과 디텐트력을 해석한 결과 9 대 8 조합이 추력은 가장 크고, 디텐트력은 가장 작아서 우수함을 확인하였다. Perpendicular PMDLSM의 추력은 정격 전류를 인가할 경우 해석값이 82.1N, 실험값이 80N으로 측정되었다. 또한 디텐트력은 해석값이 15.2N, 실험값이 13.8N으로 조금 차이가 있으나 파형은 거의 유사하였다. 해석값과 측정값의 오차는 단부효과에 의한 시뮬레이션 오차와 실험 정확도 등에

서 나타나는 오차로 생각된다.

본 연구 결과는 앞으로 다양한 Perpendicular PMDLSTM의 설계 및 기술 개발에 기초 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글**

이 논문은 2012년 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2012-0209).

**References**

[1] I. Boldea, S.A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley Sons, Inc, pp. 107-112, 1985.  
 [2] Dal-Ho Im, Analysis and Applications of Electromagnetic Energy Conversion Devices, Hanyang University, pp. 3-4, 1997.  
 [3] Chang-Eob Kim, Mun-Ho Jeon, "Design and Analysis of Electromagnetic Pump using Linear Induction Motor", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 19, no. 5, pp.68-73, 2005.  
 [4] Houg-Joung, Kim, Chang-Eob Kim, Koseki Takafumi, "The essential method to suppress the normal force of permanent magnet linear synchronous motor and the impact on industrial applications", KIEE(B) Autumn Conference, pp. 8-9, 2012.  
 [5] S.A. Nasar, I. Boldea, Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Applications, Prentice-Hall Inc., 1987.  
 [6] Koon-Seok, Chung, A Study on the Design and Control of PMLSM for Thrust Ripple Reduction, Doctoral Dissertation, Dong-A University, pp. 1-2, 2007.  
 [7] Geuk-Sub An, Design and Analysis of Novel Cylindrical Linear Motor with Open Armature Struture, Doctoral Dissertation, Kyungsung University, pp. 5-21, 2010.  
 [8] Houg-Hwan Ko, Optimum Design of Tunnel Actuator using Finite Element Method and Response Surface Method, Master's Thesis, Hoseo University pp. 9-20, 2011.  
 [9] H.-J. Kim, H. Katayama, K. Maki, "The basic principle of the Tunnel Actuator", The 2001 Annual Meeting of the IEE Japan, 5-083, pp. 1-4, 2001.

[10] H.-J. Kim, J. Nakatsugawa, K. Sakai, and H.Sibata, "High-Accel-eration Linear Motor(Tunnel Actuator)", Journal of the Magnetics Society of Japan, vol. 29, no. 3, pp. 199-204, 2005.  
 [11] 金弘中, 中川潤之介, 酒井慶次郎, 柴田均 "高加速度直線驅動裝置(トンネルアクチュエータ)", 応用磁氣學會誌, vol. 29, no. 3, pp. 199-204, 2005.  
 [12] Dong-Hee Lee, Seong-Ho Lee, Chang-Eob Kim, Houg-Joong Kim, "Analysis of Double Sided Linear Permanent Magnet Synchronous Motor with Perpendicular Arrangement", KIEE Summer Conference, pp. 648-649, 2012.  
 [13] Ji-Hyung Bahn, Soon-O Kwon, Seung-Hyong Han Jung-Pyo Hong, "Investigation on Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor according to Pole-Slot Combination", KIEE Summer Conference, pp. 1-4, 2006.  
 [14] Sang-Young Jung, Characteristics Analysis and Design on Steel-Cored PMLSM with High Thrust Force, Doctoral Dissertation, Seoul National University, pp. 2-5, 2003.

◇ 저자소개 ◇



**김창업**(金昌業)

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성중공업기술연구소 책임연구원. 2000~2001년 Southampton University. 2009~2010년 Duke University Visiting Scholar. 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.



**이성호**(李姓虎)

1988년 9월 17일생. 2011년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2013년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 (주)디에스티 연구원.