

PMLSM의 Skew 와 Overhang 효과에 대한 3D 유한 요소 해석

論 文

55B-10-3

3D Finite Element Analysis of Skew and Overhang Effects of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

李東燁* · 黃寅喆** · 姜圭洪*** · 金奎卓†

(Dong-Yeup Lee · In-Cheol Hwang · Gyu-Hong Kang · Gyu-Tak Kim)

Abstract -This paper deals with skew and overhang effects of permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM). The detent force and thrust characteristics considering skew and overhang effects of permanent magnet are analyzed by 3D finite element method and the results are compared to experimental values. As skew and overhang are applied to permanent magnet, the thrust is almost the same value but the detent force is reduced remarkably. By harmonic analysis, the distortion ratio of thrust is remarkably reduced from 4.29[%] to 2.3[%]. and, the ripple ratio of thrust is decreased from 8.2[%] to 3.56[%] at the same time. But, the lateral force which operate as the perpendicular direction of skew direction is generated. The lateral force and normal force acts by braking force between mover and LM-guide. Therefore, normal force and lateral force's reduction is required for more efficient driving of PMLSM.

Key Words : PMLSM, Skew and Overhang of Permanent Magnet, Detent Force, Thrust, Lateral Force, Normal Force

1. 서 론

회전형 전동기는 기어 등을 이용하여 저속으로 변환하거나, 토크를 증대시켜 다양한 요구에 대응할 수 있으므로 산업용 기기의 동력원으로써 가장 널리 이용되어 왔다. 또한, 전력전자 기술의 발달에 의하여 회전형 전동기의 신뢰성이 크게 향상되어 그 응용분야는 날로 증가하고 있다[1]. 그러나, 직선운동을 필요로 하는 분야에서는 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 기어, 볼 스크류, 벨트방식 등 기계적 동력 전달 메커니즘이 반드시 필요하다. 이러한 회전-직선 변환 메커니즘에 의한 구동 시스템은 고속화, 제어시의 위치결정의 정밀도, 진동, 소음, 소형, 경량화, 비접촉 구동 등의 여러 가지 문제점으로 인하여 선형전동기(linear motor)에 관심이 고조되고 있다. 즉, 고속, 급가속 및 고정밀도를 요구하는 시스템에 선형전동기를 채용한다면, 다이렉트 드라이브(direct drive) 구동은 물론 백래쉬 현상의 제거, 에너지 변환 메커니즘에 의한 손실 제거 등의 장점을 살릴 수 있으므로 고속, 고정밀 직선 운동 시스템의 실현이 용이하다[2]. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮고 역율이 떨어지는 등의 단점이 있음에도 불구하고, 직선추력을 직접 발생시키므로 직선운동이 요구되는 시스템에 적용할 경우 위와 같은 여러 장점을 지니므로 메카트로닉스 분야를

비롯하여 교통차량용 기기, 산업용 기기, 사무자동화 기기 등에 널리 응용되고 있다. 선형동기전동기는 기본적으로 회전형 영구자석형 동기전동기와 구조 및 구동원리가 동일하나 상대적으로 큰 공극을 가지며, 길이가 유한하다는 점이 다른 점이다. 즉, 가동자의 이동 범위가 제한될 뿐만 아니라 회전기에서는 존재치 않는 수직력 및 단부효과, 이동자의 지지구조 등을 설계 시 추가적으로 고려하여야 한다[3]. 특히, 영구자석형 회전기에서의 코깅토크(cogging torque)와 같이 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치 변화에 따른 디텐트력(detent force)이 존재하며, 이는 전동기 구동 시 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어성능을 저하시킨다. 그러므로 정밀 제어를 필요로 하는 장비에 장착되는 PMLSM의 경우, 구조에 따른 제어 특성 및 성능의 고찰이 필요하며 전동기의 설계 시 제어에 악영향을 미치는 여러 요인들을 분석하여 그 영향을 최소화하는 설계 기술이 요구된다[4,5]. 디텐트력을 저감 시키는 방안은 많이 발표되었다. 이러한 방법 중 영구자석 또는 철심에 스큐를 시행하여 디텐트력을 저감시키는 방법이 가장 일반적이다. 하지만, 스큐를 시행하면 발생 추력이 감소하는 단점이 있다. 따라서 이를 보상하기 위하여 영구자석의 오버행을 증가시켜 발생 추력을 증가시키게 된다. 그러나 영구자석의 오버행 증가 및 스큐 효과를 동시에 고려한 연구는 아직까지 보고되지 않았다. 또한 영구자석 스큐 시 영구자석의 스큐방향과 직각방향으로 작용하는 Lateral force가 발생하여 LM 가이드에 브레이킹력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성이 저하된다. 또한 오버행 길이가 증가할수록 normal force가 증가하여 가동자와 고정자 사이에 마찰력 또한 증가하게 된다. 그러나 이와 같은 현상들은 2차원 FEA로는 해석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 FEM 프로그램을 이용하여 스큐 적용과 오버행에 의한 효과가 PMLSM에 미치는 영향을 해석하였으며, 적정 스큐 및 오버행 길이를 선정하였다.

† 교신저자, 正會員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr

* 正會員 : 昌原大學校 電氣工學科 博士課程

** 學生會員 : 昌原大學校 電氣工學科 碩士課程

*** 正會員 : (주)모터넷 研究所長 · 工博

接受日字 : 2006年 6月 23日

最終完了 : 2006年 9月 13日

2. 해석 모델 및 실험 방법

2.1 해석 모델

그림 1에 시작기를 나타내었으며, 그 사양은 표 1과 같다. 본 논문에서는 3차원 유한 요소 해석 프로그램을 사용하여 특성을 해석하였다. 일반적으로 2차원 유한요소 해석으로는 스큐 또는 오버행에 의한 효과를 고려할 수 없으며, 영구자석의 스큐로 인하여 영구자석과 직각방향으로 발생하는 Lateral force 및 오버행 길이에 따른 수직력을 고려할 수가 없다. 따라서 이와 같은 효과를 고려하기 위하여 3차원 유한요소해석을 행하였다. 그림 2는 3차원 유한요소 해석을 위한 초기 요소분할도이다. 그림 3은 3D 유한요소 해석 결과 중 전기자 코일에 정격 전류가 흐르는 경우의 자속분포도이며 자속 분포와 자속 밀도의 벡터를 동시에 나타내었다. 그림 4는 설계 변수 및 skew length, overhang length, lateral force의 방향을 도식적으로 나타내었다.

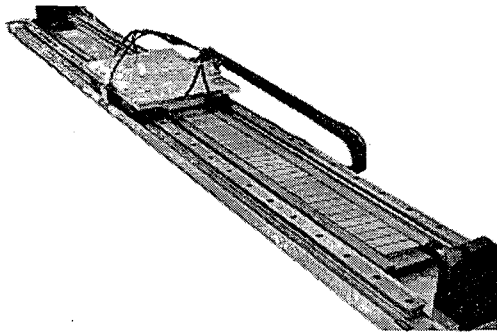


그림 1 시작기
Fig. 1 Prototype machine

표 1 시작기의 사양

Table 1 The specifications of prototypical PMLSM

	Item	Symbol	Value (unit)
Stator (PM)	Number of poles		12
	Residual induction	B_r	1.3 (T)
	Height of PM	h_{PM}	12.0 (mm)
	Length of PM	l_{PM}	79.5 (mm)
	Width of PM	w_{PM}	26.0 (mm)
	Pole pitch	τ	28.5(mm)
Mover (Primary)	Turns / Phase	N	680
	Height of coil	h_c	20.5 (mm)
	Width of coil	w_c	11.0 (mm)
	Height of teeth	h_t	20.5 (mm)
	Width of teeth	w_t	23.0 (mm)
	Slot pitch	w_s	38.0 (mm)
	Length of teeth	l_t	73.5(mm)
	Rated current	I	2.66 (A)
Length of air-gap		l_g	1.2 (mm)
Rated thrust			1400[N]

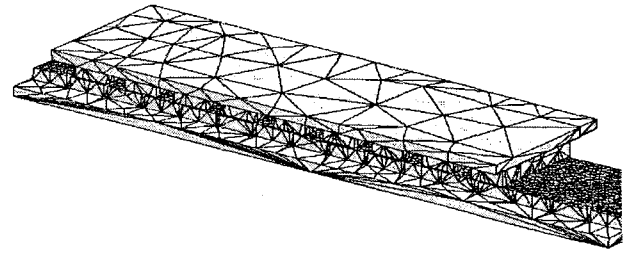


그림 2 초기 요소 분할도
Fig. 2 Initial mesh

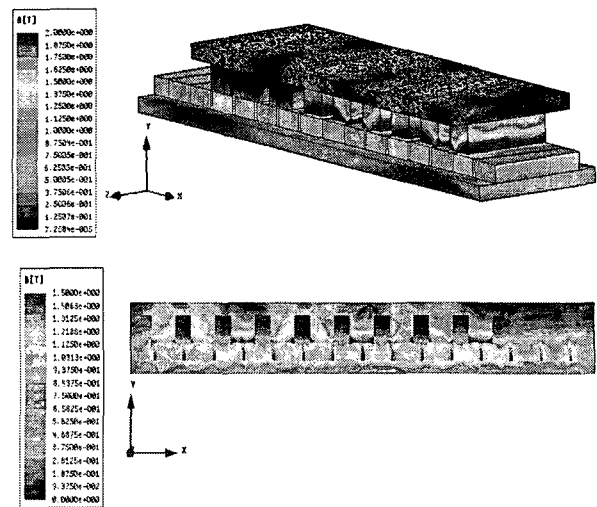


그림 3 3D 자속분포도와 x-y 평면 자속 분포도
Fig. 3 Flux density distribution

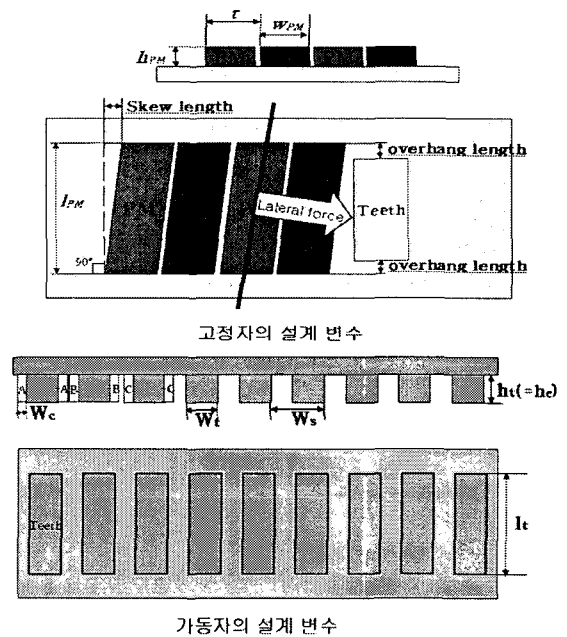
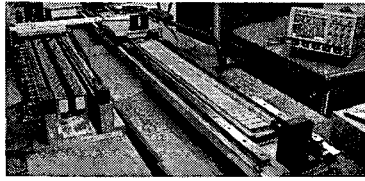
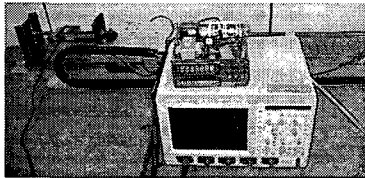


그림 4 설계 변수
Fig. 4 Design parameters

2.2 실험 방법



(a) 역기전력 측정



(b) 정추력 및 디텐트 측정

그림 5 실험 장비

Fig. 5 Experiment equipment

역기전력의 측정은 그림 5(a)와 같이 양축식 선형 동기기를 일정 속도(1m/s)로 구동하여 시작기의 한 상의 전압을 오실로 스코프를 사용하여 측정하였다.

정추력은 로드셀(model: SBR-200L, CAS)를 사용하여 측정하였다. 정추력은 로드셀(model: SBR-200L, CAS)를 사용하여 측정하였다. 측정 방법은 가동자에 3상 전원을 인가하였을 때 로드셀에서 출력되는 진압파형을 힘으로 환산하였다. 디텐트력은 로드셀(model: SB-20L, CAS)를 사용하여 측정하였으며, 가동자의 변위를 일정간격으로 이동시키면서 힘의 변화를 측정하였다.

3. 해석 및 실험 결과

3.1 자석 폭 변화에 따른 특성 변화

그림 6와 7은 자석 폭의 변화에 따른 디텐트력과 정 추력의 변화를 나타낸 것이다. 디텐트력과 추력은 자석의 폭에 비례하여 증가함을 볼 수 있다. 그러나, 자석의 폭이 27[mm] 이상이 되면 디텐트력과 추력 모두 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다. 그러나, 영구자석의 폭이 26[mm]이상인 경우 추력의 증가분에 비해 디텐트력의 증가분이 매우 커 발생 추력의 리플을, 왜형을 등을 고려하여 본 논문에서는 자석의 폭을 26[mm]로 결정하였다.

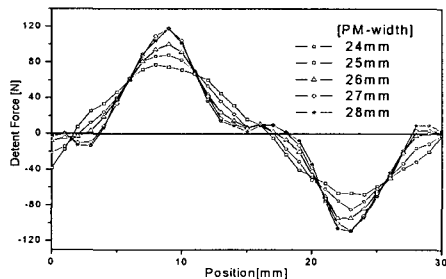


그림 6 영구 자석 폭에 따른 디텐트력

Fig. 6 Detent force according to PM width

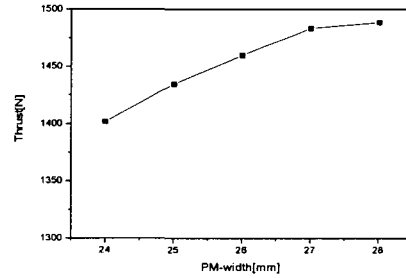


그림 7 영구 자석 폭에 따른 추력의 피크치

Fig. 7 Thrust peak value according to PM width

3.2 코어 폭 변화에 따른 특성 변화

그림 8과 9은 치 폭의 변화에 따른 디텐트력과 정 추력을 나타낸 것이다. 치 폭이 23[mm]인 경우 디텐트력의 피크치가 최소이며, 위치에 따른 디텐트력의 변화도 가장 적다. 또한 정추력의 피크치도 가장 큰 값을 갖는다. 이러한 원인은 치 폭이 22[mm]인 경우보다 23[mm]인 경우가 자속이 지나는 단면적이 크기 때문에 추력이 증가하지만, 23[mm] 이상에서는 누설 자속이 증가하여 오히려 추력은 감소한다.

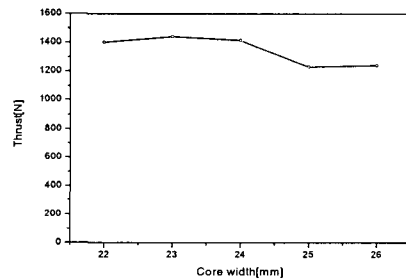


그림 8 치 폭에 따른 추력

Fig. 8 Thrust according to teeth width

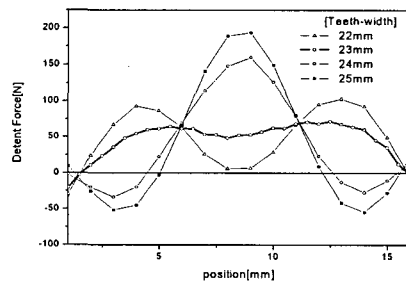


그림 9 코어 폭에 따른 디텐트력

Fig. 9 Detent force according to teeth width

3.3 영구 자석의 오버행 길이에 따른 특성 변화

그림 10는 영구자석의 길이는 26[mm], 치 폭은 23[mm]인 경우, 영구자석 오버행 길이 변화에 따른 공극에서의 자속밀도 분포도이다. 치의 z방향 길이는 73.5[mm]이다. 영구자석의 오버행 길이가 0인 경우에는 철심 양 edge부분으로의 누설 자속이 크게 나타났으나, 영구자석의 오버행 길이가 기계적 공

극의 2.5배인 3[mm]인 경우에는 철심 유효폭 내의 자속이 크게 증가하여 그림 11 에서 보는바와 같이 발생 추력도 7.38 [%] 증가하게 된다. 영구자석의 오버행 길이가 공극의 4배인 4.8[mm]인 경우에는 철심의 z방향 끝단부에서 자속의 침투과가 발생하게 됨은 물론 철심 유효폭내의 자속도 지속적으로 증가하게 된다. 또한, 영구자석의 오버행 끝단부에서 자속밀도의 침투과 현상이 나타났다. 따라서, 철심의 유효폭내의 자속증가로 인하여 발생추력도 지속적으로 증가하게 된다.

그러나, 영구자석의 오버행 길이가 4.8[mm]이상으로 증가시키는 경우에는 철심 유효폭내의 자속은 증가하지 않고 영구자석 오버행의 끝단부에서의 슐림현상만 두드러지게 나타나 추력의 포화현상이 발생하게 된다.

그림 11은 영구자석의 오버행 길이 변화에 따른 디텐트력과 추력의 변화를 나타낸 것이다. 오버행 길이가 증가함에 따라 디텐트력과 추력의 증가함을 볼 수 있으면 이러한 이유는 그림 10에서 보는바와 같이, 영구자석의 오버행 길이가 증가함에 따라 z축 방향 edge부분에서의 자속 밀도가 증가하기 때문이다. 그러나, 오버행의 길이가 4.8[mm] 이상이 되는 경우, 포화 현상 때문에 철심 유효폭 내에서의 자속이 더 이상 증가하지 않기 때문에 추력의 증가폭이 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 12은 영구자석의 오버행 증가에 따른 수직력의 변화를 나타낸 것이다. 오버행 길이의 증가에 따라 공극 자속 밀도가 증가하여 가동자와 영구자석 사이에 작용하는 수직력이 증가함을 알 수 있으며 오버행이 4.8[mm]이상이 되면서 공극 자속 밀도의 포화현상으로 수직력의 증가폭이 감소하였다.

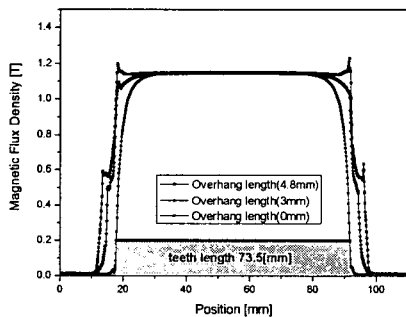


그림 10 영구자석의 오버행 길이에 따른 z축방향의 자속분포
Fig. 10 Z-axis flux density distributions according to overhang length change

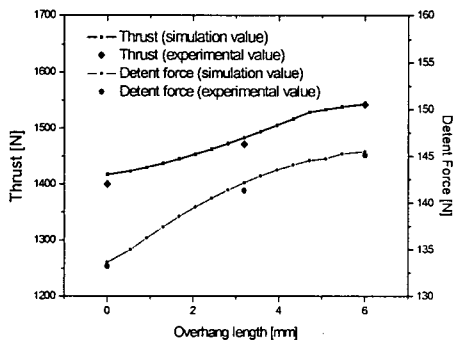


그림 11 영구자석의 오버행 길이에 따른 추력과 디텐트력
Fig. 11 Thrust and Detent force according to overhang length

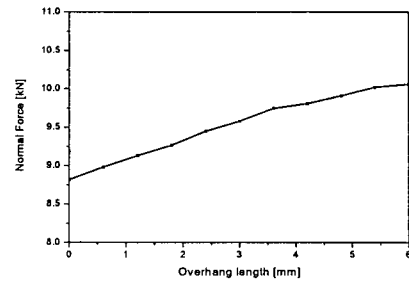


그림 12 영구자석의 오버행 길이에 따른 수직력
Fig. 12 Normal force according to overhang length

3.4 영구자석의 스큐에 따른 특성변화

일반적으로 추력 리플의 주 원인인 디텐트력을 줄이기 위하여 철심 또는 영구 자석에 스큐를 시행하는 방법을 사용한다. 따라서 스큐에 따른 PMLSM의 특성 변화를 고찰하기 위하여 3D 유한 요소 해석을 수행하였다.

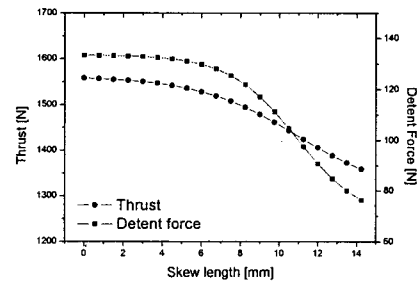


그림 13 영구자석의 스큐 길이에 따른 추력과 디텐트력
Fig. 13 Thrust and detent force according to skew length

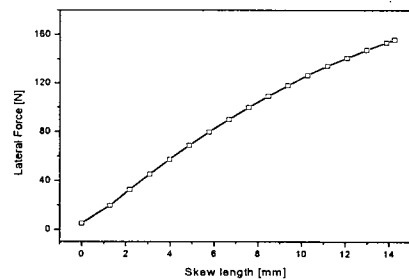


그림 14 스큐 길이에 따른 Lateral force
Fig. 14 Lateral force according to skew length

그림 13는 기본 모델(치 폭: 24[mm], overhang: 0[mm])에 스큐를 적용함에 따른 추력과 디텐트력의 변화를 나타낸 것이다. 영구자석의 오버행 길이가 0인 경우, 영구자석에 스큐를 시행하지 않은 경우 디텐트력은 133[N]이나 영구자석을 극간격의 1/2(14.25[mm])만큼 스큐를 시행한 경우에는 76.37[N]으로 57.4[%]로 대폭 감소하였다. 그러나, 추력의 피크치는 1557[N]에서 1359[N]으로 약 8.7[%]만 감소하여 디텐트력의 감소에 비하여 추력의 감소율은 매우 적음을 알 수 있다. 따라서, 디텐트의 대폭적인 감소로 인하여 발생 추력의 왜형을 및 리플율은 현저히 감소하게 된다. 영구자석의 스큐에 의한 추력의 감소분은 영구자석의 오버행 길이를 증가시키면 보완할 수 있으므로 큰 문제가 되지 않는다.

그러나, 영구자석에 스큐를 시행하면 디텐트력 감소에 의한 발생 추력의 왜형을 및 리플율은 대폭 감소하나, PMLSM의 가동자의 안내 및 지지를 위한 LM 가이드에 영구자석의 스큐방향과 직각으로 작용하는 lateral force가 발생하며 LM 가이드에 브레이킹력으로 작용하여 PMLSM의 제반 특성이 저하된다. 스큐에 따른 lateral force의 변화 특성을 그림 14에 나타내었다. 영구자석을 6[mm] 스큐시키는 경우 lateral force는 79.64[N]으로 나타났으며, 영구자석을 극간격의 1/3인 9.5[mm] 스큐시키는 경우 118.23[N]로 매우 크게 나타남을 알 수 있으며 이러한 lateral force는 이동자와 linear-guide 사이에 마찰력으로 작용하여 효율을 감소시키게 된다.

따라서, 본 연구에서는 디텐트력을 저감시키기 위하여 영구자석을 극간격의 1/3인 9.5[mm]만큼 스큐를 시행하였으며 영구자석의 스큐에 따른 추력 감소분을 보완하기 위하여 공극길이의 2.5배인 3[mm]만큼 영구자석의 오버행 길이를 증가시켜 기본모델의 제반 특성과 비교하여 본 연구의 타당성을 증명하였다.

4. 특성 비교 및 고찰

그림 15는 기본 모델과 개선 모델의 디텐트 특성을 나타낸 그래프이다. 스큐와 오버행을 적용하지 않은 기본 모델의 경우 디텐트력의 최대값이 133.4[N]으로 나타났으며, 스큐길이를 극간격의 1/3인 9.5[mm]와 오버행을 공극의 2.5배인 3[mm]를 준 경우의 디텐트력의 최대값은 75.31[N], 실험치는 74.55[N]으로 실험되어 계산의 정밀도를 확인할 수 있었다. 한편, 디텐트력은 이론치를 기준으로 개선모델이 기본모델의 56.45[%]에 지나지 않아 소음, 진동 등이 크게 감소하는 양호한 결과를 얻을 수 있으리라 사료된다.

그림 16는 기본 모델과 개선 모델의 정추력을 비교한 그래프이다. 기본 모델의 경우 추력의 최대값은 1,506.249[N]이며, 개선 모델은 1,508.228[N], 시작기의 실험치는 1,436.13[N]으로 나타났다. 실험치가 해석치보다 작게 나온 이유는 lateral force와 normal force에 의한 마찰력 때문이다. 또한 그림 17에서 보는바와 같이 발생 추력의 왜형을 살펴보면, 기본 모델은 4.29[%], 개선모델은 2.3[%]로 나타나 개선 모델이 기본 모델에 비하여 왜형율이 크게 감소하여 소음, 진동 등이 발생하지 않는 양호한 운전 특성을 얻을 수 있으리라 사료된다.

그림 18에 역기전력 파형을 측정하여 나타낸 것이다. 코일과 영구자석의 비는 4 : 3이다. 가동자의 한상 당 코일은 3개로서 총 9개의 코일로 구성하였으며 한 상의 권선은 병렬로 연결하였다. 가동자를 1[m/s]로 구동시 역기전력의 최대값은 63.1[V]로 측정되었다. 따라서, 이때의 전기적 추력상수는 567.9[N/A]이므로 정격전류 2.66[A]가 흐를 시의 발생 추력은 1510.6[N]으로 계산된다. 이론치와 역기전력으로 환산한 실험치의 오차가 0.17[%]로 매우 만족스러운 결과를 얻었다. 그러나, 정격전류시 로드셀에 의해 실측한 추력은 1,436.13[N]으로 그 차는 74.47[N]로 나타났다. 즉, 74.47[N]은 수직력 및 lateral force에 의한 LM가이드의 마찰력으로 기계손에 해당됨을 알 수 있다. 따라서, 보다 효율적인 리니어 모터의 운전을 위하여는 수직력 및 영구자석의 스큐에 의한 lateral force의 최소화가 요구된다.

그림 19은 부하각 90[deg]에서의 정상상태 추력을 나타낸 것으로 기본 모델과 개선 모델의 추력 리플율은 8.2[%]와 3.56[%]로 나타났다. 따라서, 개선 모델의 리플율이 크게 감소하였으며 이는 디텐트력의 큰 감소에 의한 것이다.

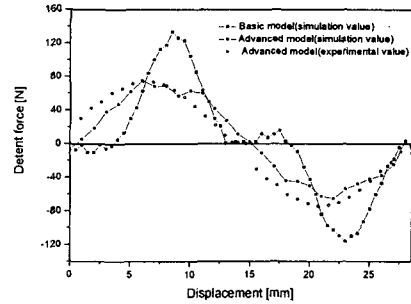


그림 15 디텐트력
Fig. 15 Detent force

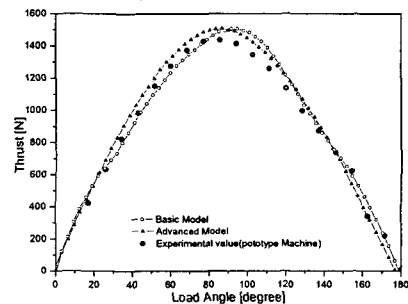


그림 16 정추력
Fig. 16 Thrust

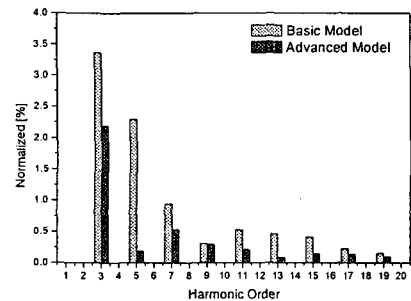


그림 17 고조파 분석
Fig. 17 Harmonic components

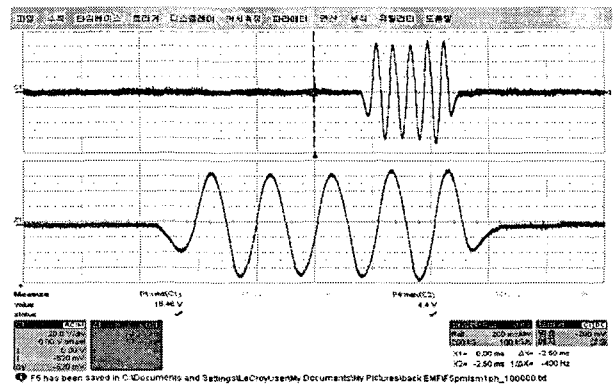


그림 18 역기전력 (1m/s 구동시)
Fig. 18 Back EMF

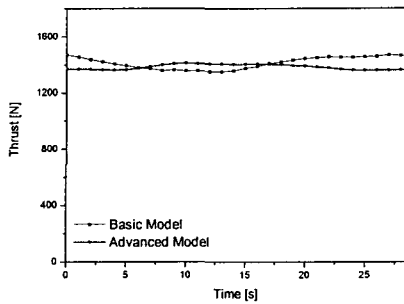


그림 19 부하각 90(deg)에서의 정상 상태 추력
 Fig. 19 Thrust in steady state operation (load angle 90(deg))

5. 결 론

본 논문에서는 영구 자석과 철심의 폭을 변화시킴에 따른 디텐트력과 추력의 변화를 해석하였고, 영구자석에 스큐와 오버행 적용 시 PMLSM에 미치는 영향을 3D유한 요소 해석과 실험을 통하여 규명하였다.

영구자석에 스큐와 오버행 적용함으로써, 기본 모델(no-skew, overhang 0[mm])보다 개선 모델(skew 9.5[mm], overhang 3[mm])의 디텐트력을 56.45[%] 감소 시켰고, 스큐 시행에 따른 추력의 감소분을 보상하였다. 이러한 디텐트력의 감소로 왜형률은 기본 모델 4.29[%]에서 개선 모델 2.3[%]로 감소하였고, 추력 리플을 또한 8.2[%]에서 3.56[%]로 감소하였다. 즉, 영구자석의 스큐 및 overhang의 길이를 조정함으로써 일정 추력을 유지하면서, 왜형률과 리플을 크게 저감시켜 PMLSM의 운전 특성을 향상시킬 수 있었다.

또한 영구자석에 스큐를 적용 시 스큐 방향에 수직 방향으로 작용하는 Lateral force 가 발생하고, 오버행의 증가에 따라 수직력이 증가하였다. 로드셀을 이용하여 측정한 추력과 역기전력을 측정하여 계산한 추력의 값을 비교하여 lateral force와 수직력에 의하여 발생하는 마찰력이 74.47[N]임을 알 수 있었다. 따라서, 보다 효율적인 리니어 모터의 운전을 위하여 수직력 및 영구자석의 스큐에 의한 lateral force의 최소화 요구된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 山田, 리니어 모터 응용 핸드북, 도서출판 世和, 1988.
 [2] 故 任達鎬 博士 追慕會, 電磁에너지 변환기기의 해석과 응용, 한양대학교 출판원, 1997.
 [3] 천장성, “급가속용 선형동기전동기의 특성해석 및 최적설계”, 서울대학교 박사학위논문, 1999.
 [4] 임기채, 우준근, 김규탁, 홍정표, “영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법”, 대한전기학회 논문지, 2000.

[5] 장석명, 윤인기, 이성호, 이증호, “영구자석형 선형동기전동기의 디텐트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호비교”, 2000년 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.757~759, 2000.

저 자 소 개



이 동 업 (李 東 燁)

1976년 3월 29일생. 2001년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 055-279-7642
 Fax : 055-263-9956
 E-mail : dongyeuplee@changwon.ac.kr



황 인 철 (黃 寅 喆)

1979년 1월 21일생. 2006년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 055-279-7642
 Fax : 055-263-9956
 E-mail : pfs0121@nate.com



강 규 홍 (姜 圭 洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~2005년 창원대학교 BK교수. 2005~현재 (주)모터넷 연구소장.
 Tel : 032-621-2829
 Fax : 032-621-2805
 E-mail : ipmsm@korea.com



김 규 탁 (金 奎 卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~2000년 일본 早稲田大 客員研究員, 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.
 Tel : 055-279-7515
 Fax : 055-263-9956
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr