

PMLSM의 디텐트력 및 Lateral Force 최소화를 위한 V-skew 모델에 관한 연구

論 文
57-3-9

A Study on the V-skew Model for Minimization of Detent Force and Lateral Force in PMLSM

黃寅喆* · 張基鳳** · 金奎卓†
(In-Cheol Hwang · Ki-Bong Jang · Gyu-Tak Kim)

Abstract - Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) has high efficiency, high energy density, and high control-ability. But, the detent force always is produced by the structure of slot-teeth. There are the disadvantages such as noise and vibration of the apparatuses are induced and the control ability is curtailed because detent force acts as thrust ripple. Therefore, the detent force reduction is an essential requirement in PMLSM. Generally, the method, skewing permanent magnet or slot-teeth, is used to reduce the detent force. But the thrust is decreased at the same time. If permanent magnet is skewed, the lateral force which operates as the perpendicular direction of skew direction is generated in linear guide of PMLSM. So, V-skew model is proposed for the reduction of lateral force. The lateral force acts as braking force in linear motion guide, and it has bad influence to the characteristics of PMLSM. However, these problems will not be solved by 2-dimensional Finite Element Analysis(FEA). So, in this paper 3-dimensional FEA is applied to analyze the PMLSM where permanent magnet is skewed and has overhang. The detent force and thrust characteristics considering skew and overhang effects of permanent magnet are analyzed by 3-dimensional FEA and the results are compared with experimental values to verify the propriety of analysis.

Key Words : PMLSM, Lateral Force, Detent force, Thrust, V-skew model, 3D-FEM

1. 서 론

현대의 직선 추력이 요구되는 산업 기기 및 자동화 장비는 대부분 회전형 전동기와 동력 변환 장치를 이용하여 직선 추력을 얻는 방식을 채택하고 있다. 그러나 이러한 동력 전달 메커니즘은 구조의 복잡성은 물론 기계적인 소음, 마찰, 진동 등으로 인해 정밀 위치제어 및 시스템 효율이 저하되는 단점을 가진다. [1] 한편, 선형 전동기는 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮은 단점을 가지지만, 직접 직선추력을 발생시키므로 동력 변환 메커니즘에 의해 발생하는 문제점을 근본적으로 제거할 수 있어 리니어 시스템의 전체적인 효율 및 성능 향상을 기대할 수 있다. [2] 광범위한 모터의 응용 분야에서 모터의 높은 효율과 제어 성능이 요구된다. 따라서 추력의 리플 최소화는 필수적이며, 이러한 추력의 리플을 최소화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 추력 리플의 원인으로는 치-슬롯 구조에 의한 공극에서의 자기 저항의 차와 단부 효과에 의해 발생하는 디텐트력, 가동자 권선에 의한 기자력과 고정자 영구자석에 의한 기자력의 교차하면서 발생하는 힘 등으로 추력에 리플이 발생한다. 이러한 추력의 리플은 기기의 소음과 진동으로 작용하

며, 기기의 제어 특성을 저하시키므로 최소화 시켜야 한다. 추력 리플을 최소화 시키는 방법으로는 보조 치 또는 보조 극 설치, 영구 자석의 형상 변화, 영구자석 또는 철심에 스큐를 시행하는 방법 등이 있으며, 본 논문에서는 공극에서의 자기 저항차로 발생하는 디텐트력을 최소화하기 위해 영구 자석에 스큐를 시행하였다. 이로 인한 디텐트력의 감소로 추력의 왜형률이 개선되며, 진동과 소음이 감소하게 되는 장점이 있다. [3-5] 반면에, 스큐(skew)를 시행하게 되면 추력 또한 감소하는 단점을 갖는다. 이러한 추력의 감소분을 보상하기 위해 영구자석에 오버행(overhang)을 시행하고 영구 자석의 스큐(skew) 길이와 오버행(overhang) 길이의 변화에 따른 PMLSM의 특성을 고찰하여, 추력은 일정하게 유지하면서 디텐트력을 최소화시키는 스큐(skew) 모델을 설계하였다. 그러나 스큐(skew)를 시행하는 경우 추력의 감소뿐만 아니라 PMLSM의 운전 방향에 직각 방향으로 작용하는 lateral force도 발생한다. 코일의 엔드 턴에 쇄교하는 자속의 비대칭에 의해 발생하는 lateral force는 Z-축 방향으로 작용하여 가동자와 리니어 가이드 사이에서 마찰력을 증가시키는 원인이 된다. 이러한 마찰력은 PMLSM의 디텐트력과 마찬가지로 PMLSM의 운전에 악영향으로 작용하기 때문에 최소화시켜야 한다. 따라서 비대칭 구조를 원천적으로 제거하기 위하여 V-skew 모델을 제안하였으며, 실험치와 이론치를 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

* 學生會員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

† 교신저자, 正會員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr

接受日字 : 2007年 12月 27日

最終完了 : 2008年 2月 12日

2. 해석 모델

2.1 해석 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이, No-skew 모델, 일반적인 스큐(skew) 모델, V-skew 모델을 사용하여 해석 및 실험을 수행하였다. No-skew 모델은 skew와 오버행이 시행되지 않은 모델로 본 논문에서 기본 모델로 설정하였으며, 일반적인 skew 모델은 No-skew 모델에서 발생하는 디텐트력을 최소화시키기 위하여 극간격의 1/3만큼 스큐와 추력의 감소분을 보상하기 위하여 영구 자석에 4mm의 오버행을 시행한 모델이다. 그림 1 (c)의 V-skew 모델은 스큐 모델과 오버행 길이는 4mm로 동일하며, 스큐에 의해 발생하는 lateral force의 영향을 알아보고, 그 힘을 최소화시키기 위하여 본 논문에서 제시한 개선 모델이다. 표1은 해석 모델의 사양을 나타내었다. skew 모델과 V-skew 모델의 오버행 길이를 제외한 모든 기계적인 치수는 동일하며, 철심 재질은 실리콘 스틸(S45C)을 사용하였다.

표 1 해석 모델의 사양

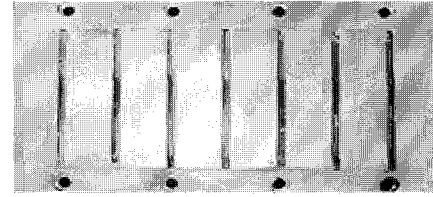
Table 1 Specification of analysis models

	Item	Symbol	Value	
Stator (PM)	Width of PM	w_{PM}	26.5mm	
	Length of PM	l_{PM}	No-skew	93mm
			Skew, V-skew	101mm
			Pole pitch	τ_p
	Skew length	No-skew	0mm	
		Skew, V-skew	10mm	
	Residual magnetic flux density	B_r	1.37T	
Mover (Primary)	Width of teeth	w_t	14mm	
	Height of teeth	h_t	17mm	
	Length of teeth	l_t	95mm	
	Slot pitch	τ_s	40mm	
	Width of slot	w_s	13mm	
Series Turns per Phase			304	
Mechanical air-gap			1.4mm	
Rated current			6.53A	

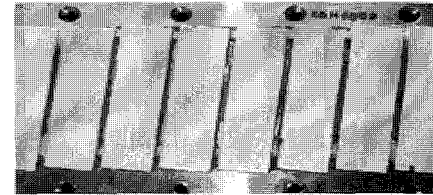
2.2 유한 요소 해석법을 이용한 해석

2차원 유한 요소해석으로는 스큐(skew), 오버행(overhang) 효과 등 전기기기의 축 방향 길이로 해석이 불가능하다. 스큐(skew)의 경우, 슬라이스 기법을 이용하여 스큐(skew) 효과를 알아 볼 수 있지만, 슬라이스 개수에 따라 값의 오차가 발생하며, 자석의 끝 부분에서의 프링징(fringing) 효과를 고려할 수 없기 때문에 정확한 스큐 효과를 알 수 없다. 또한 영구 자석의 오버행(overhang)에 의한 자속의 증가량과 Z축 방향으로 작용하는 힘에 대해서는 고려할 수가 없다. 즉, 2차원 유한 요소 해석에서는 영구자석과 철심의 길이가 동일하다고 가정하기 때문에 오버행(overhang)에 의한 영향

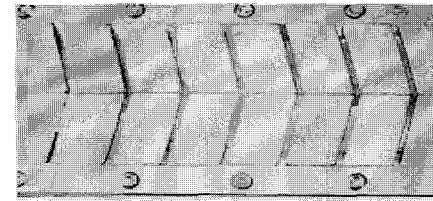
을 고려하기 어렵고, 엔드 턴의 영향을 고려할 수 없기 때문에 Z축 방향으로 작용하는 lateral force도 구할 수 없다. 본 논문에서는 3차원 유한 요소 해석법을 적용하여 PMLSM을 해석하였다.



(a) No-skew



(b) Skew



(c) V-skew

그림 1 해석 모델

Fig. 1 Analysis model

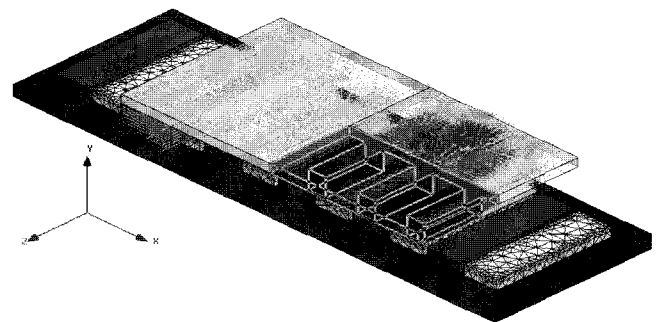


그림 2 해석 모델의 요소 분할, 자속 벡터, 자속 밀도 분포

Fig. 2 Magnetic field of analysis model

2.3 실험 방법

그림 3은 선형 전동기의 디텐트력, 추력, 역기전력, 부하 특성, 운전특성 등을 측정하기 위한 장비이다. 디텐트력의 측정은 로드셀(제조사: CAS, 모델명: SB-20L)의 한 쪽을 고정자가 설치되어 있는 슬라이딩 베드에 고정시키고, 다른 한 쪽은 측정 장비에 고정 시켰으며, 고정자가 설치되어 있는 슬라이딩 베드는 양 쪽에 리니어 가이드가 설치되어 있어 자유롭게 움직일 수 있다. 따라서 가동자의 변위를 이동시키면 작용-반작용 법칙에 의해 고정자에 가해지는 디텐트력

이 로드셀에 의하여 측정된다. 이때 가동자의 변위는 리니어 스케일을 이용하여 측정하였으며, 리니어 스케일의 오차 범위는 1 마이크로미터이다.

정추력의 측정은 디텐트력의 측정 방법과 같이 로드셀(제조사: CAS, 모델명: SBA-200L)을 고정시킨 후 가동자의 권선에 3상 전원을 인가하여 측정하였다. 이 때 가동자에 이동 자체가 발생하게 되며 부하각에 따른 추력이 발생하게 된다. 가동자는 측정 장비에 고정되어 있으므로 부하각에 따른 추력은 디텐트력과 마찬가지로 작용-반작용 법칙에 의해 로드셀에 전달된다. 이 때 로드셀에서 출력되는 전압은 매우 작아서 측정이 어려움으로 실시간 증폭기를 사용하여 증폭시킨 후 측정하였다. 이때 증폭기의 전압 출력범위는 0~10V이며, 10V일 경우 200 kg-cm의 추력을 나타낸다. 또한 추력의 크기는 로드셀의 출력 전압과 비례한다.

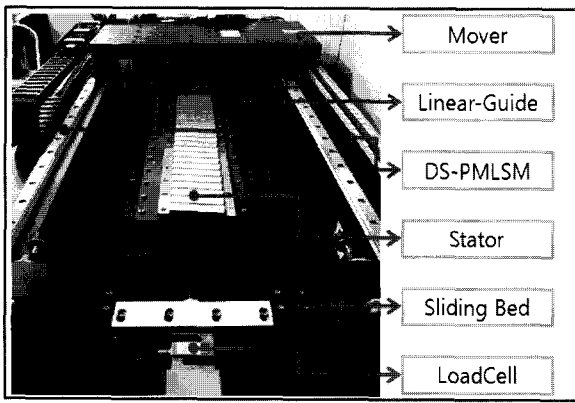


그림 3 실험 장비
Fig. 3 Measurement equipments

3. PMLSM에서의 발생하는 힘

그림 4는 PMLSM에서 발생하는 힘을 도식적으로 표현하였다. 영구 자석형 선형 동기 전동기에는 디텐트력, 추력, 수직력, lateral force 등의 힘이 발생한다. 일반적으로 디텐트력, 수직력, lateral force는 PMLSM의 전반적인 특성에 악영향을 끼친다.

디텐트력은 영구 자석과 치와의 인력에 의하여 주기적으로 발생하며, 추력의 맥동으로 작용하여 기기 운전 시 소음과 진동으로 작용하며, 위치 정밀도를 저하시키게 된다. 수직력은 영구 자석과 가동자 사이의 인력으로 발생하며, 이로 인해 마찰력이 증가한다.

lateral force는 영구 자석에 스큐를 시행하는 경우, 엔드 턴에 쇠교하는 자속이 비대칭을 이루면서 Z-축 방향의 양의 방향 또는 음의 방향으로 작용하는 힘이다. 이는 리니어 가이드와 가동자 사이에 마찰력으로 작용하며, 리니어 가이드의 구조상 수평 방향으로 작용하는 마찰력에 대해서는 크게 작용하게 되어 추력의 손실 및 진동-소음의 원인이 된다.

그림 5에는 lateral force에 영향을 주는 원인을 도식적으로 표현하였다. 그림과 같이 엔드 턴을 Z-축으로 접하는 영구자석에 따라 나누면 4개의 파트로 나눌 수 있으며, 각 파트에 흐르는 전류는 일정하므로 쇠교하는 자속량에 따라서 각 부분이 받는 힘은 달라진다.

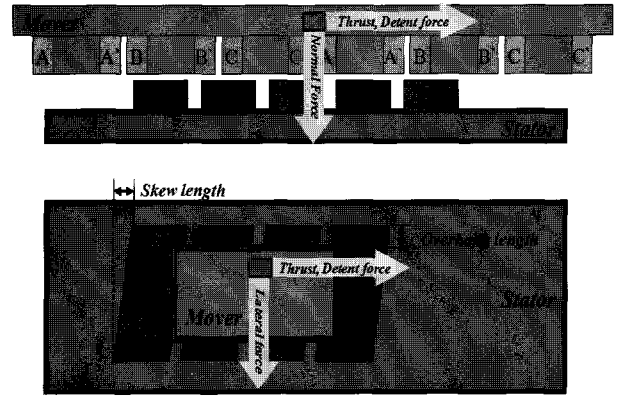
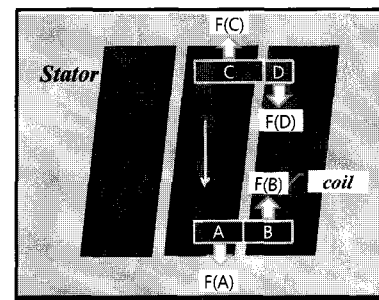
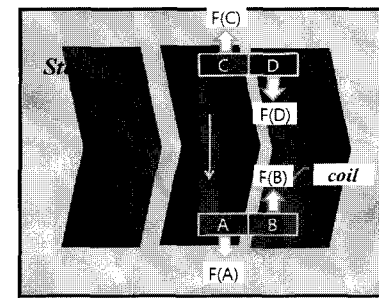


그림 4 PMLSM에서의 발생력
Fig. 4 Operating force in PMLSM



(a) Skew model



(b) V-skew model

그림 5 엔드 턴에서 발생하는 힘
Fig. 5 Generated force at end turn

그림 5(a)의 skew 모델의 경우 "A"와 "C"의 부분에서의 힘은 반대 방향이고 그 크기는 "C"부분에서 쇠교하는 자속이 더욱 크기 때문에 Z-축 방향으로 힘이 작용하며, 마찬가지로 "B"와 "D"부분의 경우에도 "B"부분에 쇠교하는 자속의 밀도가 더 크기 때문에 Z-축 방향으로 힘이 작용한다. 이때 F(C)와 F(B)의 합이 F(A)와 F(D)의 합보다 크기 때문에 힘의 비대칭에 의해 한쪽으로 치우치는 lateral force가 발생하게 된다. 또한 이러한 lateral force에 영향을 주는 요소는 엔드 턴에 쇠교하는 자속, 전류의 크기, 스큐 길이, 도체 길이가 원인이 될 수 있다. 따라서 이러한 비대칭 원인을 원천적으로 해소하기 위하여 V-skew 모델을 제안하였으며, 그림 5(b)에서 보듯이 양 쪽 엔드 턴에서 쇠교하는 자속이 대칭을 이루기 때문에 lateral force가 발생하지 않는다.

4. Skew와 Overhang이 PMLSM에 미치는 영향

4.1 스큐(Skew)에 의한 영향

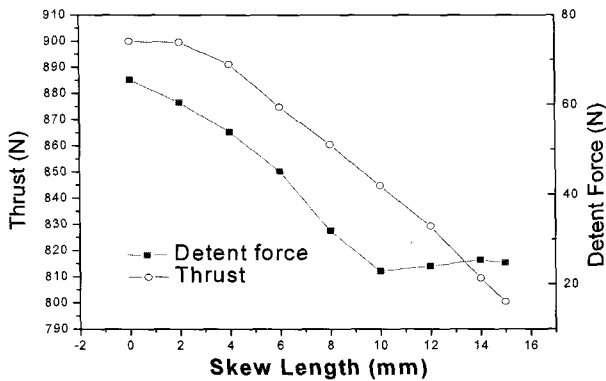


그림 6 스큐(skew)에 따른 디텐트력과 추력 특성
Fig. 6 Thrust and detent force by skewing length

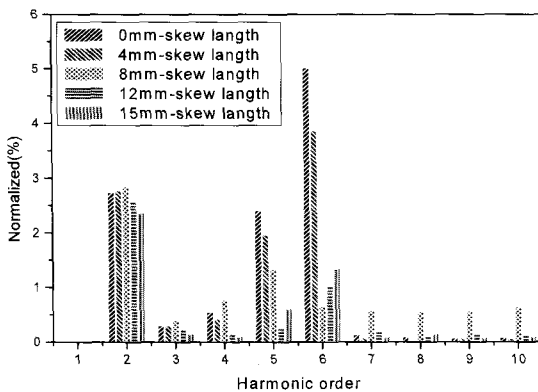


그림 7 스큐(skew)에 따른 추력 고조파 분석
Fig. 7 Harmonic analysis of thrust by skewing

디텐트력을 저감하는 다양한 방법 중 철심 또는 영구자석에 스큐(skew)를 시행하는 것이 가장 보편화되어 있다. 디텐트력을 최소로 갖는 스큐(skew) 길이를 선정하기 위하여 스큐(skew)를 일정길이 증가시키면서 디텐트력과 추력의 변화를 살펴보았다

그림 6은 스큐(skew) 길이에 따른 디텐트력과 추력의 최대값의 변화를 나타내었다. 스큐(skew)길이가 극 간격의 1/3인 10mm가 되는 경우, 디텐트력이 최소가 되었으며, 추력은 스큐(skew)가 증가할수록 계속 감소함을 알 수 있다. 추력의 감소분은 오버행(overhang)을 시행함으로써 보상할 수 있으므로, 디텐트력이 최소가 되는 10mm의 스큐(skew) 길이를 모델에 적용하였다.

그림 7은 스큐(skew) 길이에 따른 추력의 고조파 성분을 나타내었다. 스큐(skew) 길이가 증가할수록 5,6 고조파 성분이 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서 그림 8와 같이 추력의 왜형을 또한 No-skew 모델에 비하여 대폭 개선됨을 알 수 있다.

그림 9은 스큐(skew) 길이에 따른 lateral force를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 스큐(skew) 길이가 증

가함에 따라 lateral force가 증가함을 알 수 있다. 스큐(skew) 길이가 극 간격의 1/3인 10mm인 경우, lateral force는 10.4N으로 나타났다. 이러한 lateral force는 가동자와 LM 가이드 사이에 마찰력으로 작용하기 때문에 추력 손실의 원인이 된다.

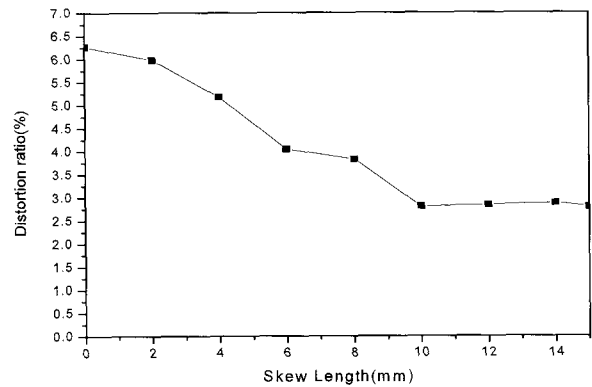


그림 8 스큐(skew)에 따른 왜형률 변화
Fig. 8 Distortion ratio by skewing

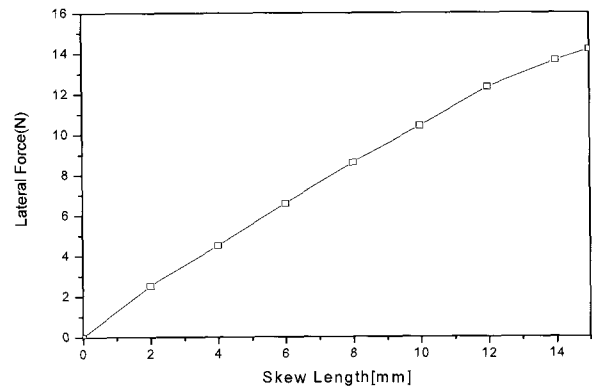


그림 9 스큐(skew)에 따른 lateral force
Fig. 9 Lateral force by skewing

4.2 오버행(overhang)에 의한 영향

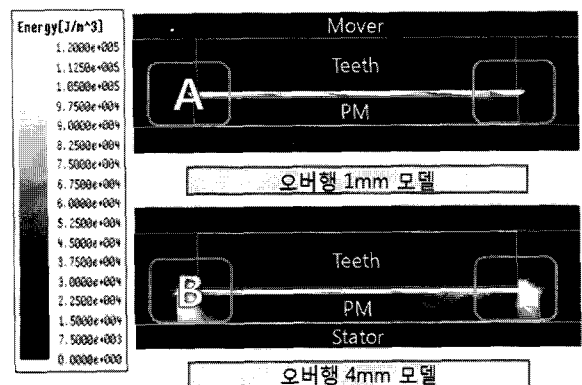


그림 10 오버행(overhang) 길이에 따른 공극에서 에너지
Fig. 10 Energy according to overhang length in air-gap

스큐(skew)를 적용하면 디텐트력이 감소하는 장점을 갖는 반면 추력이 감소하는 특징을 갖는다. 스큐(skew)를 10mm 시행한 경우 추력이 No-skew 모델 900.0N에서 skew 모델 844.8N으로 감소하였다. 이 추력의 감소분은 영구자석의 축 방향 길이를 증가시켜 자속의 양을 증가시킴으로써 보상할 수 있다.

그림 10에는 오버행(overhang) 길이에 따른 공극에서의 에너지 분포를 나타낸다. 오버행(overhang)이 1mm 인 경우 (A)에 비해 4mm인 경우 철심의 끝 부분(B)에서의 에너지가 매우 높게 나타난다. 따라서 오버행(overhang)이 증가함에 따라 자속량이 증가하여 추력이 증가함을 알 수 있다.

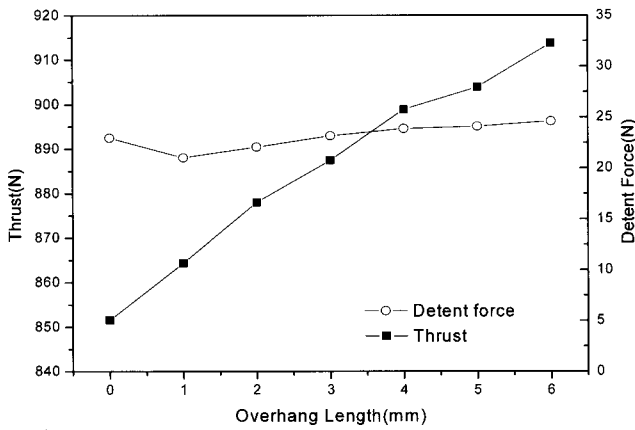


그림 11 오버행(overhang)에 따른 디텐트력과 추력의 변화
Fig. 11 Thrust and detent force according to overhang length

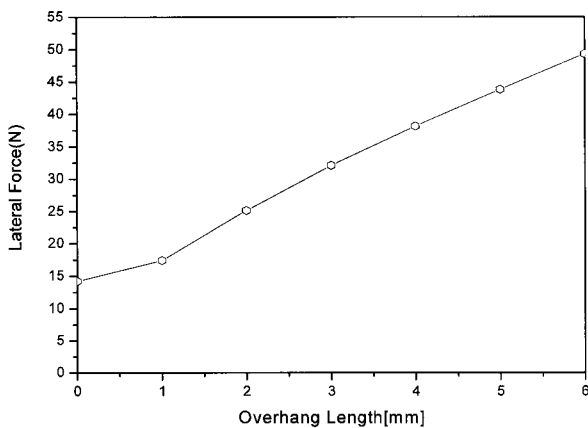


그림 12 오버행(overhang)에 따른 lateral force의 변화
Fig. 12 Lateral force according to overhang length

그림 11에는 오버행(overhang)에 따른 추력과 디텐트력의 변화를 나타내었다. 이때 영구자석에는 10mm의 스큐(skew)가 적용되었다. 오버행(overhang)을 시행하는 경우 디텐트력의 변화량은 매우 작은 반면, 추력은 매우 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 본 논문에서 기본 모델인 No-skew의 추력은 900.0N이었고, 스큐(skew)모델에 영구 자석 양단의 길이를 4mm씩 증가시키면 추력이 899.1N 증가하여 기본 모델의 99.9%만큼의 추력을 보상할 수 있음을 알 수 있다.

그림 12에는 오버행(overhang) 증가에 따른 lateral force를 나타냈다. lateral force의 경우 오버행(overhang)의 증가에 따라 매우 큰 폭으로 증가한다. 이는 오버행(overhang)이 증가할수록 코일에 쇄교하는 자속의 양이 커지기 때문이다. 본 논문에서 적용한 스큐(skew) 모델의 오버행(overhang) 길이는 4mm이며, 이때 lateral force는 추력 크기의 4.25%만큼인 38.2N으로 나타났다. 이는 정격 전류 인가 시 발생하는 힘이며, 실제 운전 시 전류의 크기에 따라 변하게 된다. 또한 선형 전동기의 경우 가-감속 및 방향 전환이 빈번하기 때문에 정격 전류보다 큰 기동 전류가 빈번하게 발생하므로 더욱 큰 lateral force가 발생하게 된다. 이러한 lateral force는 LM 가이드와 가동자 사이에 마찰력으로 작용하여 추력 손실, 소음, 진동의 원인이 되므로, 반드시 최소화 시켜야 한다.

4.3 No-skew 모델과 Skew 모델의 비교

본 논문에서는 디텐트력 저감과 스큐(skew)에 의한 추력 감소분을 보상하기 위하여 영구자석에 10mm의 스큐(skew) 길이와 4mm의 오버행(overhang) 길이를 적용하였다.

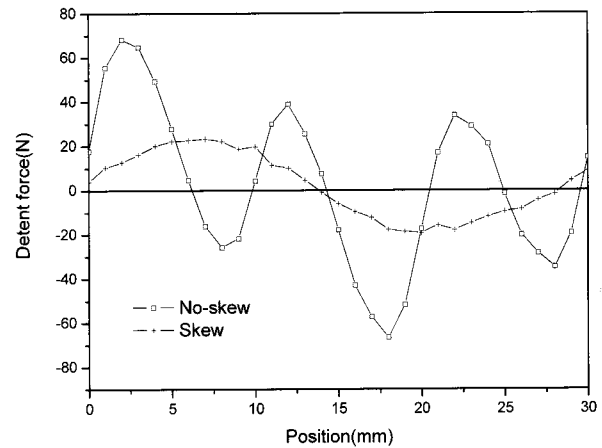
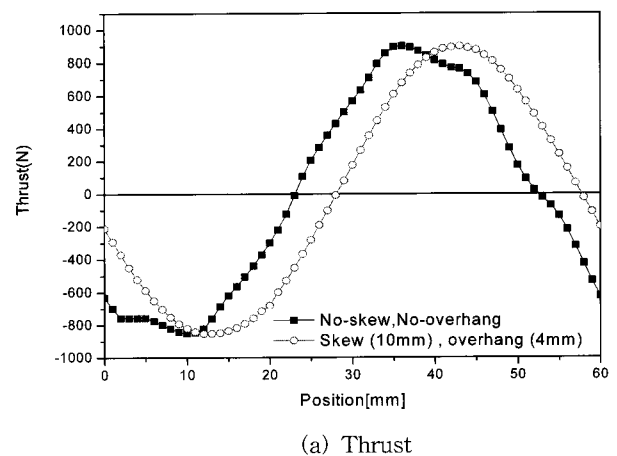
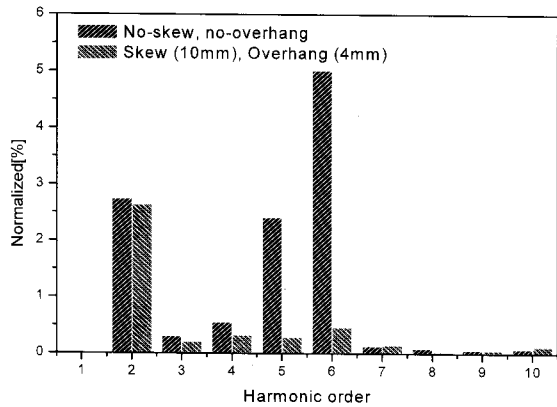


그림 13 디텐트력
Fig. 13 Detent force



(a) Thrust



(b) Harmonic analysis of the thrust

그림 14 추력

Fig. 14 Thrust

그림 13는 No-skew 모델과 10mm의 스큐(skew) 길이와 4mm의 오버행(overhang) 길이를 갖는 스큐(skew) 모델의 디텐트력을 나타낸 것이다. 스큐(skew)를 시행함에 따라 디텐트력이 No-skew 모델 68.3N에서 skew 모델 23.3N으로 65.9% 감소함을 알 수 있다.

그림 14는 추력(a)과 고조파 분석(b)을 나타낸 것이다. 그림 14(a)는 추력을 비교한 것이다. 스큐(skew) 모델에 오버행(overhang)을 시행함으로써 추력의 크기를 거의 일치시켰다.

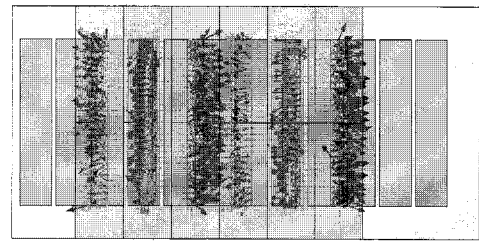
그림 14(b)는 두 모델의 고조파 분석을 한 것이다. 그림에서 보듯이 5,6고조파의 현저하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 왜형률이 6.27%에서 2.74%로 크게 감소하였고, 이러한 왜형률의 현저한 감소는 추력의 리플이 감소하는 것을 의미하며, 기기의 소음과 진동 또한 매우 큰 폭으로 저감될 것이라 사료된다.

5. Lateral force 저감을 위한 V-skew 모델의 제안

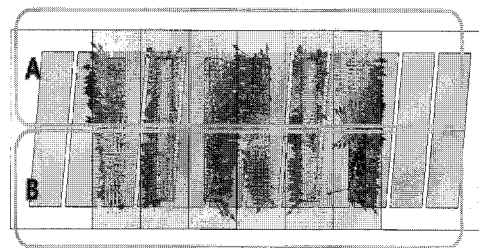
그림 15에는 No-skew 모델(a)과 스큐(skew) 모델(b), V-skew 모델(c)의 자속 벡터도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 No-skew 모델과 V-skew 모델의 경우 Z-축 방향에 대해서 대칭적인 자속 분포를 보이는 반면, 스큐(skew) 모델의 경우 Z-축 방향에 대해서 A 부분이 B 부분의 자속 밀도가 비대칭임을 알 수 있다. 이러한 비대칭적인 힘의 분포가 Z-축 방향으로 뒤틀리는 힘을 작용하게 함으로써 lateral force가 발생하게 된다.

따라서 이러한 비대칭 구조를 개선하기 위해서 V형상의 영구 자석 배열을 제안하였다. 그림 15은 영구 자석의 배열 방법에 따른 디텐트력의 실험치와 유한 요소 해석결과이다. 스큐(skew)를 적용하지 않은 경우 68.3[N]으로 디텐트력의 영향이 가장 크며, 실험치와 해석치의 오차가 크게 발생한 이유는 유한 요소 해석 결과, 1mm씩 가동자의 변위를 이동시킬 경우, 최고 1mm당 68N 이상의 디텐트력 변화가 있었다. 즉 디텐트력의 변화 폭이 매우 큰 이유로 해석치와 실험치의 오차가 크게 발생하였다. 스큐(skew)모델과 V-skew 모델의 경우 각각 23.3[N]과 25.3[N]으로 스큐(skew)를 적용

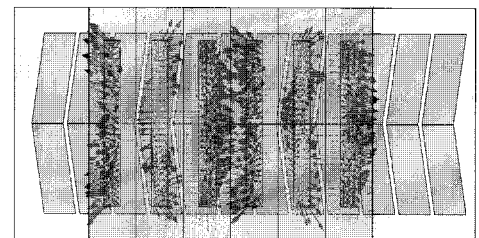
하지 않은 No-skew 모델에 비하여 34.1[%], 37.0[%]로 감소하였다. 또한 스큐(skew) 모델과 V-skew 모델의 디텐트력 실험치는 19.2[N], 26.4[N]으로 해석치와 대동소이한 값을 얻었다.



(a) No-skew



(b) Skew



(c) V-skew

그림 15 자속 벡터도

Fig. 15 Flux Vector

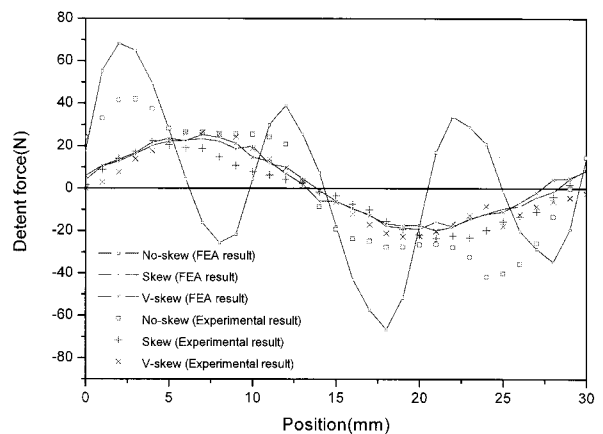


그림 16 디텐트력

Fig. 16 Detent force

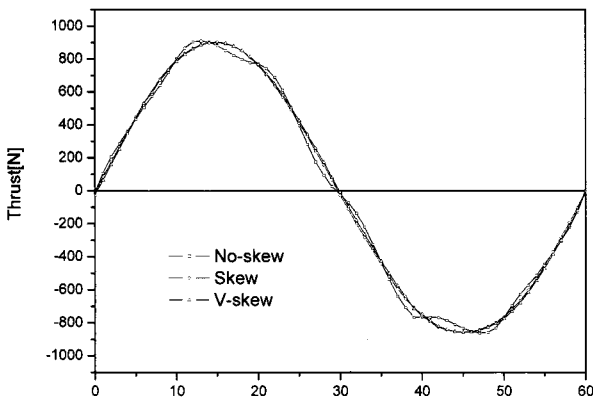


그림 17 추력 (해석치)
Fig. 17 FEM results of thrust

그림 17에는 스큐(skew) 형태에 따른 추력 특성을 나타내었다. 스큐(skew)를 시행하지 않은 경우의 추력은 피크치가 900.0[N]이고 일반적인 스큐(skew)와 V-skew의 경우 899.1[N], 902.9[N]의 값을 갖는다.

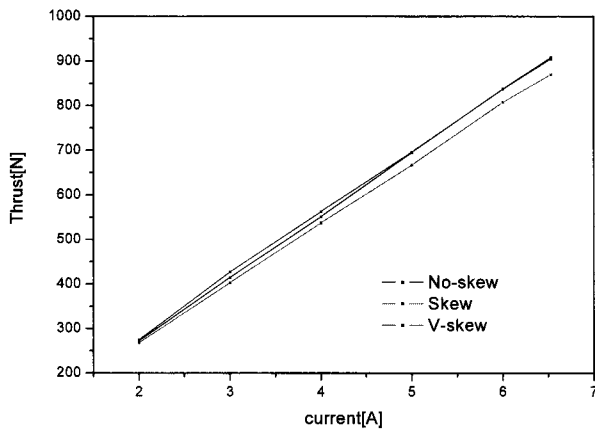


그림 18 추력 (실험치)
Fig. 18 Experimental value of thrust

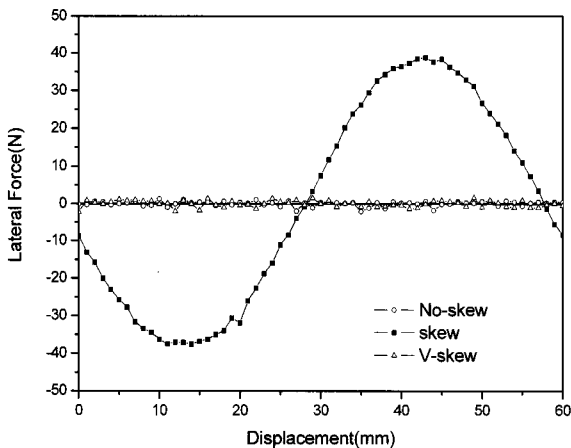


그림 19 Lateral force(해석치)
Fig. 19 Simulation value of lateral force

그림 18은 전류에 따른 추력 특성을 나타낸 것이다. 유한 요소 해석 결과에서는 3가지 모델이 대동소이한 값을 가졌다. 그러나 실험 결과에서는 스큐(skew) 모델이 다른 두 모델에 비하여 추력 값이 감소하였음을 알 수 있다. No-skew 모델과 V-skew 모델에 비하여 일반적인 스큐(skew) 모델이 30.9N 작은 값을 갖는다. 따라서 영구 자석의 형상이 추력에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이처럼 추력이 감소한 원인은 스큐(skew) 모델에 lateral force가 발생했기 때문이다.

또한 전류가 낮은 경우의 추력 차이는 작은 반면 전류가 증가할수록 추력차이가 많이 나는 것은 lateral force가 전류에 비례하여 증가하기 때문이다. 따라서 lateral force에 의한 마찰 손실이 커짐에 따라 추력 감소량도 커졌기 때문이다. 따라서 이러한 lateral force의 저감은 반드시 필요하다.

그림 19는 3가지 모델의 lateral force를 비교한 것이다. No-skew와 V-skew는 각각 1.5N 2.1N이며, 스큐(skew) 모델의 경우 38.8N의 값을 갖는다. 따라서 V-skew 모델이 스큐(skew)에 의한 lateral force를 근본적으로 해결할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 디텐트력 저감과 lateral force의 최소화를 위한 방법에 대하여 고찰하였다. 일반적으로 No-skew 모델의 경우, 디텐트력이 매우 큰 값을 가지기 때문에 추력의 맥동으로 작용하기 때문에 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 소음과 진동의 원인이 된다. 따라서 디텐트력을 저감하기 위하여 영구자석에 스큐(skew)를 시행함에 따라 디텐트력은 No-skew 모델에 비하여 65.9%로 감소하였다. 그러나 디텐트력뿐만 아니라 추력 또한 큰 폭으로 감소하게 된다. 이러한 추력의 보상을 위하여 영구자석에 오버행(overhang)을 시행하였다. 영구 자석에 4mm의 오버행(overhang)을 시행함에 따라 No-skew 모델과 0.1%의 추력 차이를 갖는 스큐(skew) 모델을 설계하였다. 그러나 로드셀을 이용하여 실측한 결과, 스큐(skew) 모델의 추력이 이론치에 비하여 30.9N만큼 작은 값을 나타낸다. 그 이유는 스큐(skew)를 시행하는 경우 Z-축 방향으로 작용하는 lateral force로 추측할 수 있다. lateral force의 발생원인은 Z-축 방향으로의 자속 분포가 비대칭이 됨에 따라 엔드 턴에 쇄교하는 자속 또한 비대칭이 되기 때문에 발생한다. 이는 엔드 턴에 쇄교하는 자속과 전류, 엔드 턴의 길이에 비례하기 때문에 오버행(overhang)이 증가하거나, 전류가 증가하는 경우에 그 값은 더욱 커지며, 스큐(skew) 길이가 증가하는 경우에는 한 쪽 방향으로 치우치는 힘이 커지기 때문에 lateral force는 더욱 증가하게 된다. 따라서 이러한 비대칭 요소를 제거하면서, 스큐(skew) 효과를 갖는 모델인 V-skew 모델을 제안하였다. V-skew 모델의 경우 스큐(skew) 모델과 디텐트력과 추력은 각각 7.9%, 0.32%의 차이를 가지면서 lateral force는 나타나지 않는 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 지방기술혁신사업(RTI04-01-03)과 기초전력연구원(R-2003-B-271)의 지원에 의한 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar, Linear Motion Electromagnetic Systems, John Wiley and Sons, 1985.
- [2] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motors - Transportation and Automation Systems, CRC Press, 2000.
- [3] 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현", 창원대학교 박사논문, 2000년.
- [4] Ki-Chae Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "The Novel Technique Considering Slot Effect by Equivalent Magnetizing Current", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 3691-3693, 1999.
- [5] 강규홍, 홍정표, 김규탁, 박정우, "직접 구동 슬롯리스 영구자석 동기전동기의 설계", 전기학회논문지, 49B권 12호, 2002.

저 자 소 개



황인철 (黃寅喆)

1979년 1월 21일생. 2006년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
Tel : 055-213-3640
Fax : 055-263-9956
E-mail : pfes0121@nate.com



장기봉 (張基鳳)

1970년 5월 25일생. 1994년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2005년~2006년 한국건설교통기술평가원 선임 연구원. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.
Tel : 055-213-3639
Fax : 055-263-9956
E-mail : kgjang@changwon.ac.kr



김규탁 (金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 일본 早稻田大 客員研究. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.
Tel : 055-213-3635
Fax : 055-263-9956
E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr