

진동 저감 및 기동 특성 향상을 위한 선형동기전동기의 영구자석 배열

이승훈, 안호진, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A Study on the magnet Arrangement for vibration reduction and improvement in Starting Characteristic

Seung-Hoon Lee, Ho-Jin Ahn, Ki-bong Jang, Gyu-Tak Kim
 Changwon National University Electrical Engineering

Abstract - This paper deals with the magnet arrangement for vibration reduction and improvement in Starting Characteristic of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM). Thrust, detent force, normal force and lateral force are generated in PMLSM. The detent force and lateral force cause the vibration of PMLSM. The detent force and the lateral force are analyzed by using 3-Dimensional Finite Element Method (3-D FEM). The efficiency and vibration of PMLSM are measured by experiment.

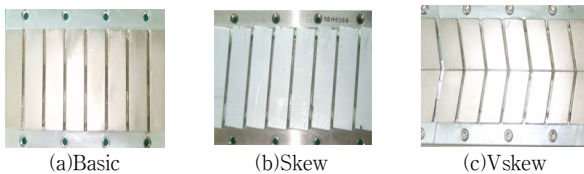
1. 서 론

슬롯구조의 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM)는 높은 에너지밀도와 높은 제어성능 때문에 공장 또는 사무자동화에 널리 이용된다. 그러나 치 슬롯구조에 의한 공극에서의 자기 저항의 차와 단부효과에 의해 디텐트력이 항상 발생한다. 이러한 디텐트력은 추력의 리플로 작용하여 진동 및 소음을 발생시키고, 위치결정능력을 저하시키므로 PMLSM에서 디텐트력의 저감은 필수적이다. 디텐트력을 감소시키는 가장 일반적인 방법은 영구자석 또는 코어에 스큐를 시행하는 것이다. 그러나 영구자석에 스큐가 시행되면 추력이 감소되며, 왜교 자속이 비대칭이 되어 리니어 모터의 운전 방향에 직각 방향으로 작용하는 lateral force도 발생하여 가동자와 리니어 모션 가이드 사이의 마찰력으로 작용한다. 즉, 디텐트력과 측력에 의한 추력 리플 및 마찰력은 진동, 소음 및 기동특성을 저하시킨다.

본 논문에서는 측력을 없애기 위하여 V스큐모형을 제안하였다. 디텐트력을 감소시키기 위하여 영구자석에 V스큐를 시행하고, 이에 따른 추력의 감소를 보상하기 위하여 영구자석의 길이를 Z축 방향으로 증가시켰다. 즉, PM의 Z축 방향의 길이를 코어의 길이보다 길게 하였다. 그리고 영구자석 형상에 따른 특성을 비교하기 위하여 스큐가 들어가지 않은 기본모델과 일반적인 스큐모형을 V스큐 모델과 비교하였다. 2차원 유한요소법으로는 측력을 구할 수 없기 때문에 3차원 유한요소법을 이용하여 디텐트력 및 추력, 추력을 계산하였으며, 디텐트력과 추력, 진동 그리고 효율 실험을 수행하여 해석결과와 비교하였다.

2. 본 론

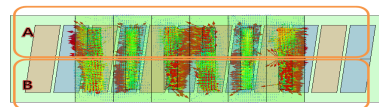
2.1 디텐트력 및 측력 해석



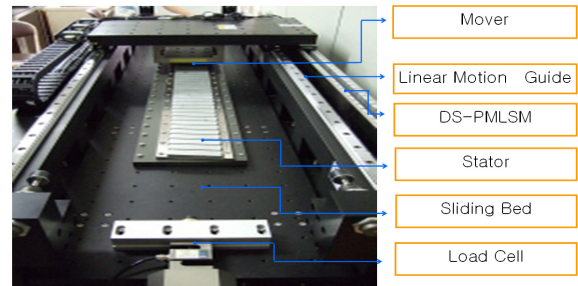
(a)Basic (b)Skew (c)Vskew
〈그림 1〉 해석모델의 영구자석 배열

그림 1은 영구자석의 배열을 나타낸다. (a)는 기본모델, (b)는 스큐모델, (c)는 V스큐모델이다. 스큐모델과 V스큐모델의 스큐길이는 10mm(1/3극간격)이다. 스큐모델과 V스큐모델의 추력을 보상하기 위한 오버행의 길이는 4mm이다. 영구자석 배열을 제외한 고정자와 가동자의 크기 및 재질은 동일하다. 일반적으로 영구자석의 길이와 코어의 길이가 같을 때 2차원 유한요소 해석이 사용된다. 스큐효과는 슬라이스 방법으로 해석 될 수 있다. 그러나 슬라이스 개수에 의한 어려가 있다. 그리고 2차원 해석으로 오버 행 효과와 측력은 해석될 수 없다.

그림 2는 스큐 모델의 자속 벡터도를 나타낸다. 기본모델과 V스큐모델은 x축 방향으로 대칭적인 자속의 분포를 가진다. 그러나 스큐모델은 그림 2와 같이 x축을 기준으로 A부분과 B부분의 자속분포가 대칭이 되지 않기 때문에 이로 인하여 측력이 발생한다.



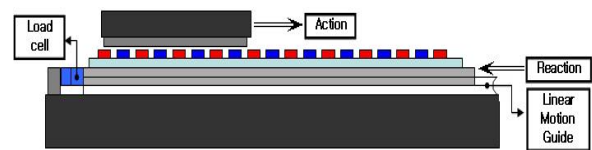
〈그림 2〉 Skew model 자속 벡터도



〈그림 3〉 디텐트력 및 추력측정 장비

그림 3은 디텐트력 및 추력을 측정하기 위한 장비이다. 추력의 측정을 위해서 로드셀을 Sliding Bed에 고정시킨다. 이때 고정자가 설치되어 있는 슬라이딩 베드는 양 쪽에 리니어 가이드가 설치되어 있어 자유롭게 움직일 수 있다. 따라서 가동자가 가속될 때 작용-반작용 법칙에 의해 고정자에 가해지는 동추력이 로드셀에 의하여 측정되고, 이때 가동자의 변위와 속도는 리니어 스케일을 이용하여 측정하였으며, 리니어 스케일의 오차 범위는 1 [μm]이다.

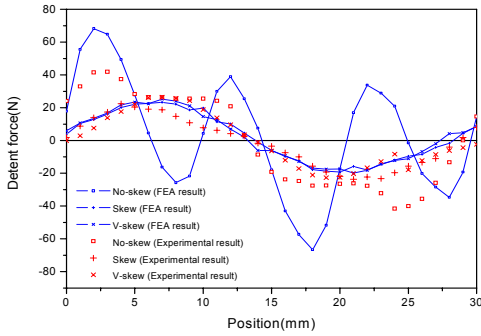
디텐트력의 측정방법은 다음과 같다. 슬라이딩 베드를 고정시키고, 로드셀을 가동자에 연결하여 고정시킨후 가동자를 1mm씩 이동시켜 위치에 따라 발생하는 디텐트력을 측정한다.



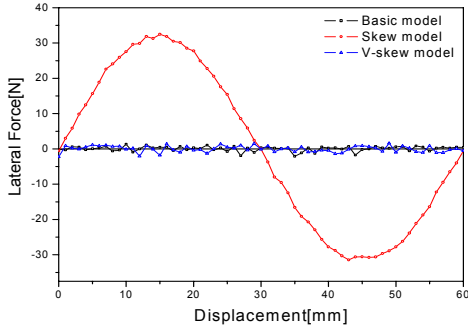
〈그림 4〉 디텐트력 및 추력측정 장비 개념도

그림 4는 로드셀에 전달되는 추력을 도식화 한 그림이다. 가동자가 x축 방향으로 움직이면 반작용에 의하여 고정자가 부착된 슬라이딩 베드의 반작용이 발생하여 추력이 로드셀에 전달된다.

그림 5는 각 모델의 디텐트력의 해석 결과와 실험 결과를 나타낸다. 디텐트력을 만드는 요인은 치-슬롯 구조에 의한 것과 단부효과에 의한 것이 있다. 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력의 주기는 10[mm]이고, 단부효과에 의한 디텐트력의 주기는 극간격과 같은 30[mm]이다. 기본모델의 디텐트력의 해석의 최대값은 68.3[N]이고 스큐모델과 V스큐 모델의 디텐트력은 각각 23.3[N], 25.3[N]이다. 기본모델의 디텐트력 주기와 다른 모델들의 디텐트력 주기가 다르게 나타나는 이유는 기본모델에서 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력이 단부효과에 의한 디텐트력 보다 크기 때문에 10[mm]주기를 나타내고 스큐모델과 V스큐 모델에서는 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력이 많이 감소하여 단부효과에 의한 디텐트력인 30mm 주기로 나타난다. 기본모델에서 실험결과와 해석결과가 단위 변위의 변화에 의해 많은 차이를 나타낸다. 그러나 스큐모델과 V스큐 모델의 해석결과와 실험결과는 서로 비슷하였다.



〈그림 5〉 디텐트력 해석결과 및 실험결과

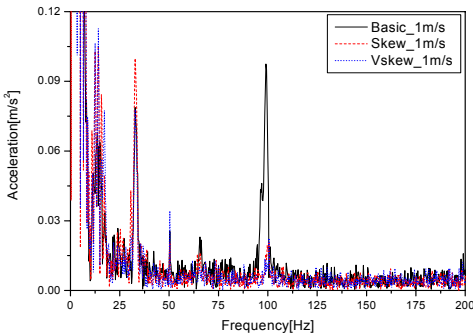


〈그림 6〉 축력 해석결과

그림 6은 축력의 3차원 유한요소 해석결과이다. 그림3의 장비로 로드셀을 이용한 축력의 측정은 구조적으로 어렵기 때문에 본 논문에서는 해석결과만 나타내었다. 기본모델과 v스큐모델의 축력은 1.5[N], 2.1[N]이다. 스큐모델의 경우 축력은 38.8[N]으로 매우 크고, 그 주기는 60mm로 나타난다.

2.2 진동 및 효율 특성

디텐트력에 의한 진동을 측정하기 위하여 운전방향인 x축 방향으로 가속도 센서를 부착하여 0.5[m/s], [1m/s], [1.5m/s], [2m/s]의 속도로 각각 운전하여 진동을 측정하였다.



〈그림 7〉 진동실험 결과

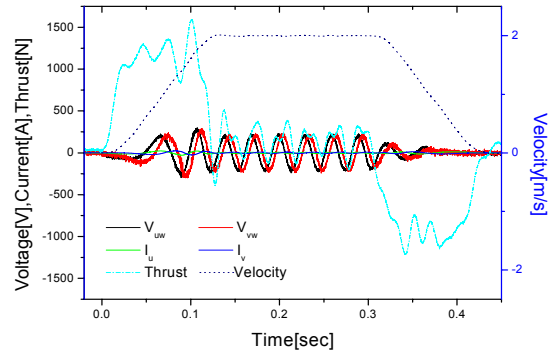
그림 7은 1[m/s]로 운전 시의 진동실험 결과를 나타낸다. 1[m/s]로 운전할 경우 10[mm]주기를 가지는 치-슬롯구조에 의한 디텐트력은 100[Hz]의 진동을 발생시키며, 30[mm]주기를 가지는 단부효과에 의한 디텐트력은 33.3[Hz]의 진동을 발생시킨다. 기본모델의 경우 10[mm]주기의 디텐트력에 의한 진동이 100[Hz]의 주파수에서 크게 나타나며, 30[mm]주기의 디텐트력에 의한 진동이 33.3[Hz]에서 크게 나타났다. 스큐모델과 V스큐모델의 경우 치-슬롯구조에 의한 디텐트력 성분이 감소함에 따라 30[mm]주기의 디텐트력 성분에 의한 100[Hz]에서의 진동이 거의 나타나지 않았다. 0.5[m/s], 1.5[m/s] 와 2[m/s] 속도에서 디텐트력에 의한 진동의 주파수가 속도에 비례하여 나타났다.

PMLSM의 효율은 식 (1)에 의하여 입력과 출력에 의하여 계산되어진다. 선간전압과 상전류가 오실로 스코프로 측정되었다. PMLSM의 추력 및 output은 식 2에 의하여 계산된다. PMLSM의 추력은 로드셀에 의해 측정되고 속도는 리니어 스케일에 의하여 측정된 변위를 미분하여 계산

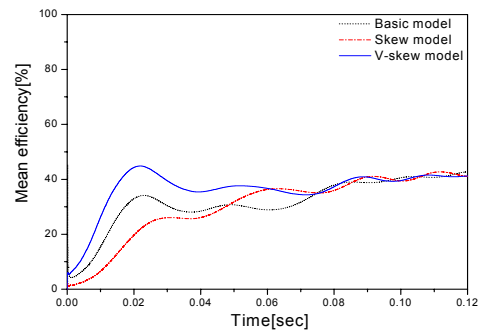
되었다.

$$P_{input} = (v_{uw} \times i_u) + (v_{vw} \times i_v) \quad (1)$$

$$P_{out} = F \times v \quad (2)$$



〈그림 8〉 입력 및 출력 파형



〈그림 9〉 가속구간 평균 효율

그림 8은 각 모델의 선간전압, 상전류, 추력, 속도를 나타낸다. 이 값들은 순시치 이므로 이 값들로 계산된 순시효율의 패턴은 물리적 의미를 가지지 못하며, 단지 효율의 변화만을 보여준다. 그러므로 물리적 의미를 가지는 평균효율을 계산하였다. 그림 9는 각 모델이 2m/s까지 가속할 때의 평균효율을 나타낸다. 그림 9에서 각 모델의 가속구간에서 스큐모델의 평균 효율이 가장 낮았고 V스큐 모델의 효율이 가장 높았다. 가속을 함에 따라 관성이 증가하였고, 0.08초 이후에 관성이 감소하였다. 관성이 감소하는 시점의 평균효율의 평균값은 서로 비슷하였다. PMLSM은 일반적으로 가속과 감속운전을 한다. 그러므로 가속을 반복하는 경우 V스큐의 평균 효율이 다른 모델의 효율보다 더 높음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 PMLSM의 진동저감 및 기동특성을 향상시키기 위하여 V스큐모델을 제안하여 기본모델과 스큐모델과의 특성 비교를 통해 결과를 고찰하였다. PMLSM에서 발생하는 전자기력과 디텐트력을 3차원 유한요소법으로 해석하고 실험 결과와 비교하였다. 각 모델의 진동 및 효율을 실험을 통하여 측정하였다. 3차원 유한요소 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때, 스큐 및 V스큐모델에서 치-슬롯구조에 의하여 발생하는 디텐트력이 90%이상 감소하였으며, 축력의 해석결과 V스큐를 시행함으로써 축력이 거의 나타나지 않았다. 진동 및 효율 실험결과 V스큐 모델이 PMLSM의 진동 저감에 아주 적절하며, 기동시의 효율이 다른 모델에 비하여 우수하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김규탁 외, "BLDC Motor의 비대칭 오버행 효과에 의한 소음 및 진동 특성", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집 pp109~111, 2006
- [2] Ki-Chae Lim, Joon-Keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim,, "Detent force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-160, 2002