

연구 자석형 선형 진동 기기의 특성 시험법에 관한 연구

김명진*, 장기봉, 이 주
한양대학교 전기공학과

A Set of Experiments to more fully characterize PM Linear Oscillatory Machines

Myung-Chin Kim*, Ki-Bong Jang and Ju Lee
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper is intended to introduce a set of static and dynamic experiments for a better characterization of the linear permanent magnet oscillatory machine. The experiment have been performed on two prototypes; one with buried permanent magnets with flux concentration while the other with surface permanent magnets.

Though the testing arrangement allows for it, temperature, noise and vibration have not been in this paper.

1. 서 론

연구 자석형 선형 진동 기기 (PM Linear Brushless Oscillatory Machines; 이하 PM형 LOM)는 최근에 들어 와서 냉장고의 컴프레서, 하이브리드 자동차 및 신재생 에너지 부분 등에서 각광을 받고 있는 기기이다.[1,2]

비록, 여러 문헌에 시험법이 소개되고는 있으나 [3,4], 주로 부하에 따른 효율에 집중을 할 뿐, 기기의 전기적인 회로 파라미터, 공진 주파수 및 구동 특성에 대한 시험법은 아직 체계화되어 있지는 못한 실정이다.

본 연구에서는 PM형 LOM의 특성을 파악할 수 있는 여러 정특성 및 동특성 시험법을 소개하고 실제 제작된 시제품을 이용하여 자속집중형 매입 방식의 기기와 표면 부착 방식 기기 [5,6]의 특성을 측정할 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 정특성 시험 (Static Tests)

2.1.1 수평력의 측정

직류 전류를 이용한 정특성 시험은 기기에 흐르는 전류와 가동자의 위치에 따른 수평력의 변화 추이를 알아내는 것에 주 목적이 있다. 정특성 시험을 위한 시험 장비의 구성은 그림 1과 같이 한다. 그림에서 알 수 있듯이, 시험의 대상이 되는 PM형 LOM, 수평력과 가동자의 위치를 측정할 수 있는 센서 및 가동자의 위치를 정밀히 변화시킬 수 있는 위치 조정 시스템으로 구성되어 되어 있다.

시험에 사용된 PM형 LOM의 시제품[5]은 연구자석형 가동자가 있는 자속 역전식 선형 기기로 기기의 양측의 끝단에는 개선된 효율을 얻을 수 있는 스프링이 설치되었다. (그림 2 참고)본 연구에 사용된 시제품의 주요 사양은 다음과 같다. 스트로크의 길이는 10mm, 공극은 1mm이며, 가동자의 무게는 2kg이다. 권선의 저항은 8.75 옴이며, 정격 출력은 200W이다.

그림 3에는 전류가 0일 때와 서로 다른 직류 전류를 인가했을 때의 가동자의 위치에 따른 수평력의 분포가 나타나 있다.

전류가 0일 때의 수평력은 코깅에 의한 힘과 스프링의 탄성력의 합을 의미한다. 순수한 코깅에 의한 힘은 스프링에 의한 반작용력을 전체 수평력에서 빼는 방법으로

구할 수 있다. 수평력은 가동자의 위치를 변화시키면서 측정을 하였다.

직류 전류를 인가하여 정특성을 파악하는 것이 일반적이지만, 상용 인버터를 이용하여 저주파수의 교류 전류를 인가하여 기기의 정특성을 파악할 수도 있다. 이 경우엔 교류, 위치 및 수평력은 디지털 스코프나 A/D 컨버터를 이용하여 구할 수 있다.

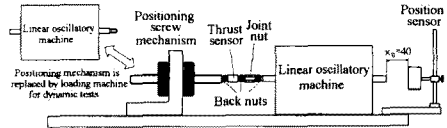


그림 1. 정특성 시험을 위한 실험 개략도

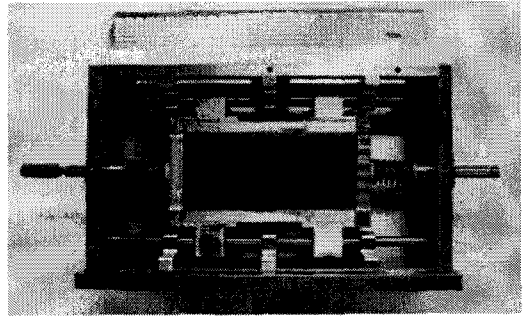


그림 2. 제작된 PM형 LOM 시제품의 형상

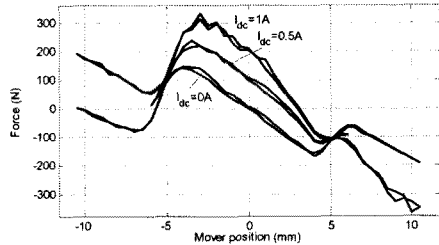


그림 3. 전류 가동자의 위치에 따른 수평력

2.1.2 인덕턴스 측정 시험

기기의 인덕턴스는 직류 전류의 감쇄 시험법을 이용하여 측정이 가능하다. 이 시험법의 실험 장비 구성은 그림 4에 나타나 있다.

기기에 충분한 시간동안 직류 전류가 인가된 후에 스위치 T를 턴-오프하게 되면 다이오드는 자동적으로 턴-온이 되면서 전류는 회로의 파라미터에 따라 감소하게 된다. 인덕턴스를 구하는 과정은 다음과 같다.

기기의 전압을 V, 전류를 I라고 하면, 고정자에서는 다

음과 같은 식 (1)이 성립한다.

$$V(t) = RI(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 주자속을 식 (2)와같이 구할 수 있다.

$$\Psi(t) = \int_{t=0}^t (V(t) - RI(t))dt + \Psi(0); \quad (2)$$

이때, 자속의 초기량은 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\Psi(0) = L_1 I_{dc} + \Psi_{pm} \quad (3)$$

충분한 시간이 지난 후에 모든 전류는 0이 되기 때문에, 최종 자속은 영구 자속에 의한 자속과 동일하게 된다. 결국, 인덕턴스는 다음 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$L_1 = \frac{1}{I_{dc}} \int_{t=0}^{\infty} (RI(t) - V(t))dt \quad (4)$$

동일한 시험을 서로 다른 초기 전류를 이용하여 시행할 경우에 자화곡선을 얻을 수 있게 된다. 이 시험법의 경우에는, 기기 전압 V와 전류 I를 기록해야 한다.

인덕턴스의 경우도 범용 산업용 인버터를 이용하여 구할 수 있다. 인버터의 주파수를 0.1Hz로 하고 인가해주는 DC 전원의 크기는 미리 설정되어 있는 V/F 패턴을 통하여 알 수 있다. 범용 인버터를 이용한 전류 감쇄 시험의 개략도가 그림 5에 나타나 있다. 후자의 방법을 이용하여 구한 인덕턴스의 분포가 그림 6에 나타나 있다. 그림 6에서 나타나는 전류가 0인 지점을 기준으로 한 인덕턴스의 비대칭성은 자기 포화로 인한 것으로 해석이 된다.

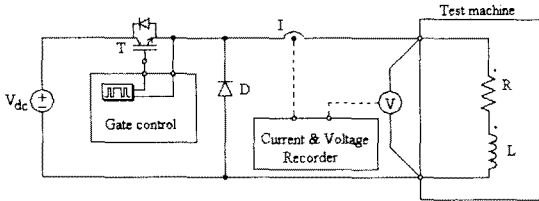


그림 4. DC 전류 감쇄 시험의 개략도

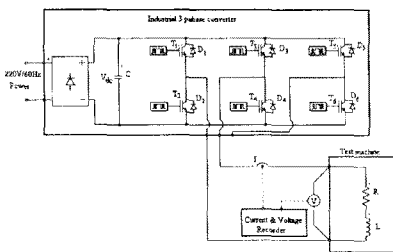


그림 5. 범용 3상 인버터를 이용한 인덕턴스의 측정

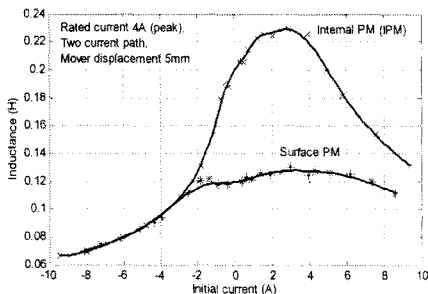


그림 6. 인덕턴스 측정 결과

2.2 동특성 시험 (Dynamic Tests)

2.2.1 공진 주파수의 결정

PM형 LOM은 전기적 주파수가 기계적인 공진 주파수가 동일할 때 동작 특성이 최적화되기 때문에, 기계적인 공진 주파수는 상당히 중요한 파라미터이다. 본 연구에서는 기기가 동작을 멈추는 동안의 과도상태를 분석하여 공진 주파수를 결정하였다. 일반적으로, 공진주파수(resonant frequency)는 기기의 자유 공진 주파수(mechanical free oscillation frequency)와 비슷하기 때문에 본 연구에서는 가동자가 0 지점을 통과하는 횟수(그림 7 참고)를 이용하여 공진 주파수를 결정하였다. 과도상태 분석을 이용하여 구한 자유 공진 주파수의 분포 양상이 그림 8에 나타나 있다.

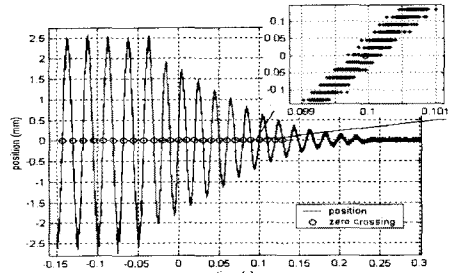


그림 7. 공진 주파수 결정을 위한 파형

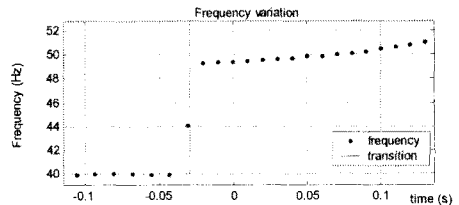


그림 8. 자유 공진 주파수의 결정

2.2.2 무부하 및 부하 시험

이 경우의 시험 장비의 구성은 발전기-전동기 모드(back to back mode)로 하고 이는 그림 1에 나타나 있다. 이 시험의 결과로 알 수 있는 정보로는, 주파수에 따른 전압에 대한 무부하 전류 및 무부하 손의 분포 양상, 다양한 주파수에서의 발생하는 역기전력, 대략적인 공진 주파수의 범위, 주파수에 따른 발전기의 효율 및 부하에 따른 외부특성 곡선 등이 있다. 임의의 부하에 대한 위치와 전류의 파형이 그림 9에 나타나 있다.

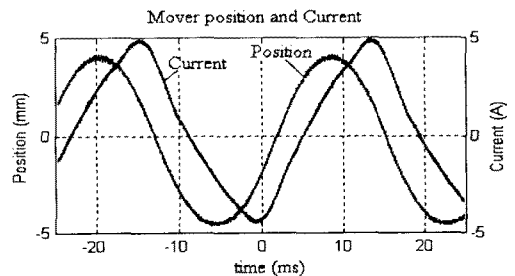


그림 9. LOM의 전류 및 위치 파형

무부하 시험을 진행하는 동안, 발생하는 역기전력과 가동자의 위치는 기록되어야 한다. 이때, 전류 및 위치 파형 등에서 볼 수 있는 전류 성분은 측정 오차에서 기인한 것으로 고려된다. 영구 자속에 의한 쇄교 자속은 역기전력을 시간에 대해서 적분하여 얻을 수 있으며 이의 가동자의 위치에 대한 변화 양상은 그림 10에 나타나 있다.

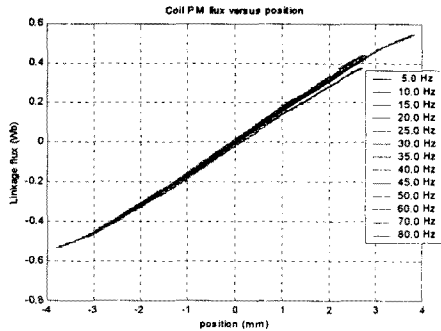


그림 10. 위치에 대한 영구자석에 의한 쇄교자속의 분포

하나의 기기를 발전기로, 다른 기기를 전동기로 사용하는 부하 시험의 경우에는 각 기기의 위치, 전류 및 전압을 지속적으로 기록해야 한다. 이때의 동손은 측정된 전류와 dc 저항 성분을 이용하여 직접 계산할 수 있다. 두 개의 기기에 동일한 철손과 기계손이 있다고 가정한다면, 모터의 출력 전력과 발전기의 입력 전력은 계산될 수 있다. 이를 이용하여 각 기기의 효율을 구할 수 있으며 실제 두 기기 (자속집중형 매입 방식의 기기와 표면 부착 방식 기기의) 효율이 그림 11에 나타나 있다.

발전기의 외부 특성 곡선 (전류에 대한 전압의 변화 양상)과 전동기의 기계적인 특성 (일정 전압과 주파수에서의 수평력에 대한 가동자의 위치)가 각각 그림 12와 그림 13에 나타나 있다. 그림 12의 외부 특성 곡선을 보면, 선형적인 관계를 지님을 알 수 있는데, 이는 발전기의 인덕턴스를 고려하여 발전기의 외부에 22 μ F 커패시터를 부가했기 때문이다.

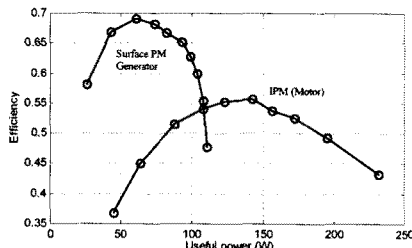


그림 11. PM형 LOM 기기의 측정 효율

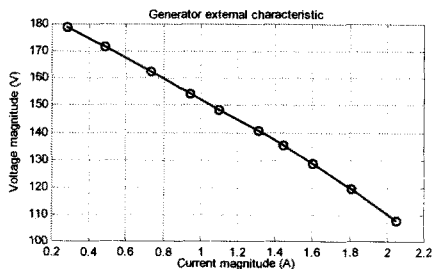


그림 12. PM형 LOM 발전기의 외부특성 곡선

그림 13의 기계적인 특성에 대한 곡선을 통하여, 일정 전압하에서 공진 주파수에서 가동자의 변위가 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한, 부하의 유효 힘이 커질 경우에는 인가해주는 전압을 크게 하여 가동자의 변위를 일정하게 유지할 수 있다

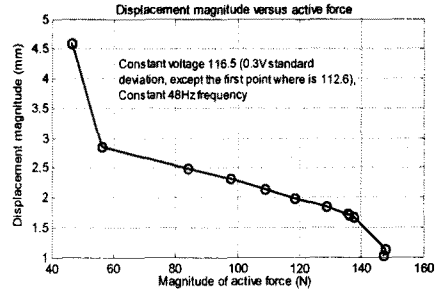


그림 13. PM형 LOM의 기계적인 특성

3. 결 론

본 연구에서는 PM형 LOM의 특성을 보다 완벽히 파악할 수 있는 여러 시험법을 제시하였다. 위치와 전류에 따른 정상상태에서의 수평력 측정을 통하여 수평력 뿐만 아니라, 전류와 위치에 대한 기기의 수평력 계수의 의존도를 알 수 있다. 위치와 전류에 따른 인덕턴스의 변화는 회로의 관점에서 상당히 중요한 파라미터이며, 실제 DC 전류 감쇄 시험을 통하여 판단을 할 수 있었다. 위 실험법에서의 상용 인버터의 응용 가능성도 소개하였다. 무부하 시험에서의 발전 전압을 이용하여 위치에 따른 영구 자석의 쇄교자속을 구할 수 있었으며 부하 시험을 통해 구한 외부특성 곡선 및 자석의 형상을 달리하였을 때(자속집중형 매입 방식과 표면 부착 방식)의 특성을 파악하였다. LOM의 성능을 주요하게 좌우하는 공진 주파수의 경우에는 탄-오프 과도 상태에서의 자유 공진 주파수를 통하여 알 수 있다.

위의 시험법을 이용하여 구한 파라미터 및 기기의 특성을 이용하여 유사한 기기의 시뮬레이션을 위한 모델링, 제어 알고리즘 및 설계의 타당성 검토에 주요하게 사용될 것으로 기대 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.Cosic, J.Lindback, W.M.Arshad, M.Leksell, P.Thein, E. Nordlund, "Application of a free-piston generator in a series hybrid vehicle", Proc. Of the 4th International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, LDIA2003, 8-10 September, Birmingham, UK.
- [2] W.Cawthorne, P.Famouy, N.Clark, "Integrated design of Linear Alternator/Engine System for HEV Auxiliary Power Unit", Record of IEEE - IEMDC 2001, MIT pp 267-274.
- [3] R. Redlich, R.Unger, N. Van Der Walt, "Linear compressors : motor configuration, modulation and systems", 1996 International Compressor Engineering Conference, Purdue University, July 23-26, 1996.
- [4] O. Roubicek, "Observations of experimental research on oscillating linear drives for small piston compressors", Proc. Inst. Mech. Eng. vol. Vol 203, Part A: Journal of Power Engineering, 1989, pp. 217-228.
- [5] T. H. Kim, H.W. Lee, Y. H. Kim, J. Lee and I. Boldea, "Development of a flux Concentration Type Linear Oscillatory Actuator", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 40.
- [6] J. Lee, T.B. Lim and I. Boldea, "Linear Reciprocation Flux reversal Permanent Magnet Machine", U.S. Patent 6538349. Mar. 25, 2003.