

구름 요소를 사용하는 LM 가이드에서의 마이크로스케일 진동현상[#]

Micro-scale Vibration Phenomena in a Linear Motion Guide Having Rolling Elements

이용섭* · 김윤영† · 최재석** · 유정훈*** · 이동진**** · 이석원****

Yong-sub Yi, Yoon Young Kim, Jae Seok Choi, Jeonghoon Yoo, Dong-Jin Lee and Suk Won Lee

(2004년 6월 30일 접수 ; 2004년 8월 26일 심사완료)

Key Words : Linear Motion Guide(직선운동 가이드), Micro-scale Vibration(마이크로 스케일 진동), Prerolling(구름전운동), Dahl Model(Dahl 모델), Hysteresis(히스테리시스)

ABSTRACT

Linear motion (LM) guides having rolling elements have been used to position precision machines accurately. For ultra-accurate positioning control of precision machines, the understanding of the dynamic behavior of the LM guide at the macro and/or micro scales is most critical, but the research on this subject is rare. The objective of the present research is to investigate the vibration phenomena of the LM guide where balls are used as the rolling elements. Several experiments show the nonlinear characteristics of the LM guide such as hysteresis behavior and force-dependent natural frequencies phenomena.

1. 서 론

최근 X-Y 스테이지 등과 같은 초정밀장치의 직선 이송을 위하여 구름 요소를 사용하는 직선운동 가이드들이 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾ 이러한 장비는 반도체, LCD, HDD 등 의 첨단 제품 생산이나 초정밀 측정 장비에 필수 불가결한 기계부품이다. 특히 구름 요소를 사용하는 LM 가이드는 구조가 간단하고 관리가 용이하기 때문에 그 활용도가 높다.

구름요소를 사용하는 LM 가이드의 운동 특성을 결정하는 여러 인자가 있지만, 그 중 마찰과 접촉, 윤활, 탄성 변형 등이 가장 중요한 인자라고 할 수 있다. 대부분의 기존 연구들은 제어 관점을 중심으로 이루어져 왔는데, 이들의 연구에서는 전술한 인자들이 LM 가이드의 운동 특성에 끼치는 영향을 파악하기 보다는 현상 자체의 관찰, 특히 이송 속도 혹은 가속도가 매우 느린 정적 운동을 관찰하고 그 현상을 실험식으로 모델링하는데 중점을 두었다.^(2, 3)

생산 기계의 효율화를 위해서는 빠른 이송속도로 작업을 수행해야 하므로 LM 가이드의 진동 특성에 대한 연구가 필요하다. 특히 높은 정밀도를 갖는 LM 가이드를 설계하기 위해서는 과거에 중요하게 생각하지 않았던 구름운동 발생 전까지의 마이크로스케일 운동과 강성, 그리고 그에 따른 진동이 매우 중요한 문제로 등장하게 되었다. 이러한 현상은 마찰의 비선형 특성 때문에 발생하는 것으로 극한주기궤도(limit cycle), 스틱-슬립 현상(stick-slip phenomena)의 원

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : yykim@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7154, Fax : (02) 872-5431

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

** 연세대학교 대학원 기계공학부

*** 정희원, 연세대학교 기계공학부

**** 삼성전자 메카트로닉스센터

이 논문은 2004 춘계학술대회에 우수발표논문으로 추천되었음.

인이 되기도 한다.⁽⁴⁾ 그러나 이에 대한 연구가 거의 전무하여 초정밀 생산장비 설계 및 제어를 원활히 수행하기 어렵다.

이 논문에서는 소형 가진기를 사용하여 가진 주파수, 가진력의 크기 등을 바꾸어 가며 수십 nm 단위에서 수 mm까지의 변위 및 가속도를 측정하여 고유 주파수, 고유 모드 등의 실험 연구 결과를 나노스케일 수준까지 제시하고자 한다. 특히, 이송방향으로 구름운동이 일어나기 전에 발생하는 마이크로스케일의 운동 및 비선형 히스테리시스 곡선을 규명하였으며, 향후 이 연구 결과를 이용한 마찰 보상 방법을 고안한다면, 초정밀 생산장비의 수백 nm 이하급 제어가 가능할 것이다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치 구성

이 연구에서는 LM 가이드의 진동특성 파악을 위해 Fig. 1과 같이 실험장치를 구성하였다.

LM 가이드에 강철 이송블록(2356 g)을 결합하여 방진 테이블 위에 체결하고 진동기를 통해 가진하였다. 이때 시스템이 받는 힘은 힘 변환기(force transducer)를 통해 측정하고 변위 및 가속도를 각각 레이저 변위계와 3축 가속도계를 이용해 측정하였다.

이 실험에 사용된 LM 가이드는 THK사의 제품으로 Fig. 2에 그 구조를 나타내었다. 이 제품은 4열로 배열된 볼이 회전순환하면서 LM 블록을 이송한다. 특히 윗면의 2열은 LM 레일과의 접촉면이 수평이 되도록 배열되어 수직 방향으로 하중을 받게 된다. 따라서 경사면에 하중을 받는 일반 제품에 비해 상대적으로 높은 하중을 견딜 수 있다.

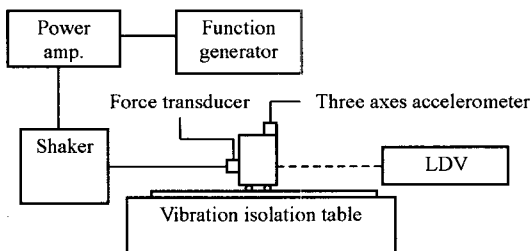


Fig. 1 Experimental setup for the LM guide vibration test

2.2 실험 종류 및 방법

LM 가이드의 진동특성을 관찰하기 위해 아래와 같이 크게 두 종류의 실험을 수행하였다.

- 가진기를 이용하여 이송블록을 세 방향으로 가진하여 고유 주파수 및 고유 모드 형상을 파악
- 터페놀-D(terfenol-D)를 이용한 자기변형 가진기⁽⁵⁾ 및 진동기를 사용하여 이송방향으로 초저주파 가진 후 구름운동 발생 전까지의 히스테리시스 곡선 파악

위의 첫 번째 실험에서는 주파수에 따른 시스템의 응답을 보기 위하여 사인 스위프(sine sweep)를 사용하였고, 두 번째 실험에서는 단일 주파수의 정현파(sine wave)와 삼각파를 이용하여 가진하고 그 응답을 살펴 보았다.

두 번째 실험에서는 터페놀-D 가진기를 이용함으로써, 초저주파에서 거동을 살펴 볼 수 있었으며, 4 nm급의 해상도를 가진 레이저 변위계로 변위를 정밀하게 측정하였다.

3. 고유 주파수 및 고유 모드

3.1 고유 주파수

진동기를 통해 블록의 3면을 각각 가진하고 면당 4 곳, 즉 가진방향(이송방향, 횡방향, 연직방향) 당 12곳에서 3축 가속도계를 이용하여 그 응답을 측정하였다. 가진 방향에 따라 0~3.2 kHz 사이에 4~6개의 고유 주파수가 나타났고 이 결과를 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다.

이송방향 가진시 첫 번째 고유 주파수의 크기가 0~74 Hz로 일정하지 않은 현상이 나타났다. 즉, 가진력이 작을수록 고유 주파수가 높아지고 반대로 가진

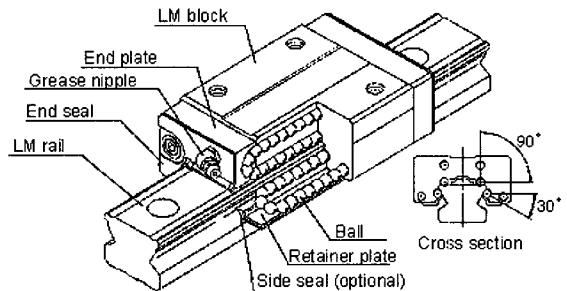


Fig. 2 Configuration of LM guide

력이 커질수록 고유 주파수가 낮아진다. 특히 구름운동이 발생할 정도로 힘이 커지면, 즉 최대정지 마찰력 이상의 힘을 가해주면 0Hz까지 떨어지는 비선형 특성을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상의 원인에 대해서는 4절에서 다루고자 한다.

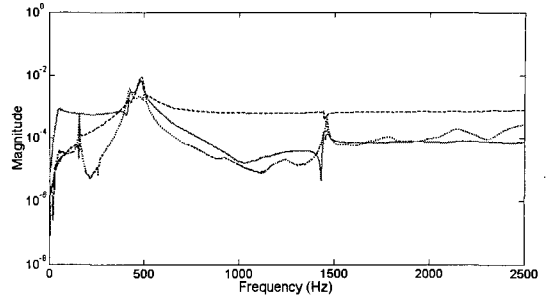
3.2 고유 모드

Ohta 등은⁽⁶⁾ 이송방향을 제외한 2방향의 진동을 측정하였는데, 그는 LM가이드의 진동이 롤링(rolling), 피칭(pitching), 요잉(yawing), 바운싱(bouncing), 고차 롤링(high rolling) 등의 5가지 모드로 나타난다는 사실을 보고한 바 있다.

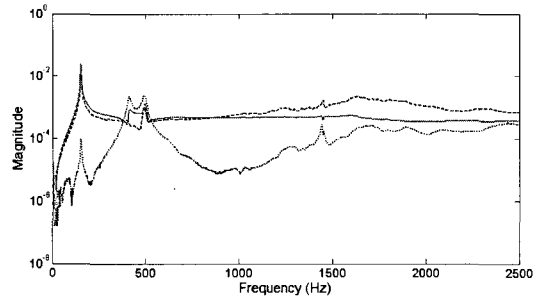
이 연구에서도 이러한 5가지 모드를 관찰할 수 있었으나, 가진 방향에 따라 나타나지 않는 모드들도 있었다. 또한, 이송방향에 대한 가진 및 진동 측정 결과 기존 연구와는 달리 이송방향 강제 운동 모드 형상도 찾을 수 있었다. 그러나, 이 강제 운동 모드는 위에서 언급한 바와 같이 가진력의 크기에 따라 주파수가 크게 바뀌는 경향을 살펴 볼 수 있었다.

5가지 모드를 일으키는 탄성변형은 LM 가이드의 볼과 레일사이에서 나타난다. 각각의 볼이 강성을 갖고 비선형 스프링 거동을 보임으로써 비선형 진동을 발생시키게 되는데, 이러한 비선형 강성을 Hertz 접촉 모델로 모델링하여 라그랑지법, 유한 요소법 등을 이용하여 해석하면 해석적으로도 모드들을 구해낼 수 있다.⁽⁷⁾

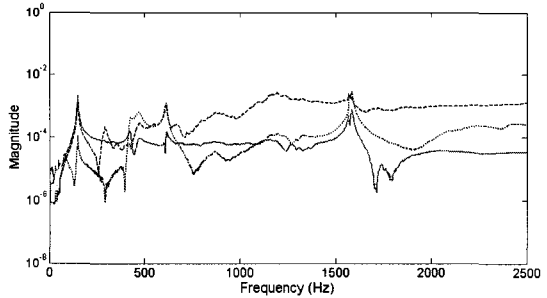
그러나, 기존의 접근 방법으로는 강제 운동 모드에서 0이 아닌 고유주파수의 존재와 가진력에 따른 고유 주파수의 변화를 설명할 수 없게 된다. 일반적으로 이송방향의 강성은 무시하고 해석하는 것이 전통적 방법이었으나, 최근에는 μm 이하급의 정밀도가 요구되므로 이송방향의 강제 진동의 이해는 초정밀 장비에 있어서 매우 필수적인 요소라고 할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Frequency response curve at (a) axial excitation, (b) lateral excitation and (c) vertical excitation

강제 운동을 포함한 6가지 모드 형상을 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 Natural frequencies(Hz)

Mode No.	Axial excit.	Lateral excit.	Vertical excit.
1 st	0~74		
2 nd	158	153	149
3 rd	422	416	422
4 th	487	497	467
5 th			1190
6 th	1460	1450	1590

4. 이송방향 진동특성

4.1 가진력에 따른 변화

3절의 결과를 보면, 이송방향으로 가진할 때 이송방향 강제 운동의 고유 주파수와 고유 모드가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 전통적 개념과는 달리 마찰 외에 이송방향으로 운동을 막는 강성이 존재함을 생각할 수 있다. 이러한 이송방향 강성의 특성을

파악하기 위해 이송방향 가진력과 변위의 관계를 살펴보고자 한다.

가진력 중 관성력의 효과를 없애고 외력만의 영향을 보기 위해서는 이송 블록의 가속도가 작을수록 좋다. 따라서, 초저주파 가진을 통해 관성 효과를 배제하고자 하였다. 실험 결과 구름운동이 발생하지 않는 경우 1 Hz 이하의 가진을 통해 관성의 효과를 없앨

수 있었다. 함수 발생기를 통해 발생된 0.2~1 Hz 사이의 주파수를 갖는 정현파 혹은 삼각파 형태로 이송 블록을 가진하되 그 크기를 변화시켰다. 블록의 운동은 레이저 변위계(laser doppler velocimetry : LDV)로 측정하였으며, 힘과 변위의 관계를 Fig. 4와 같이 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 전형적인 히스테리시스 곡선을 보여주고

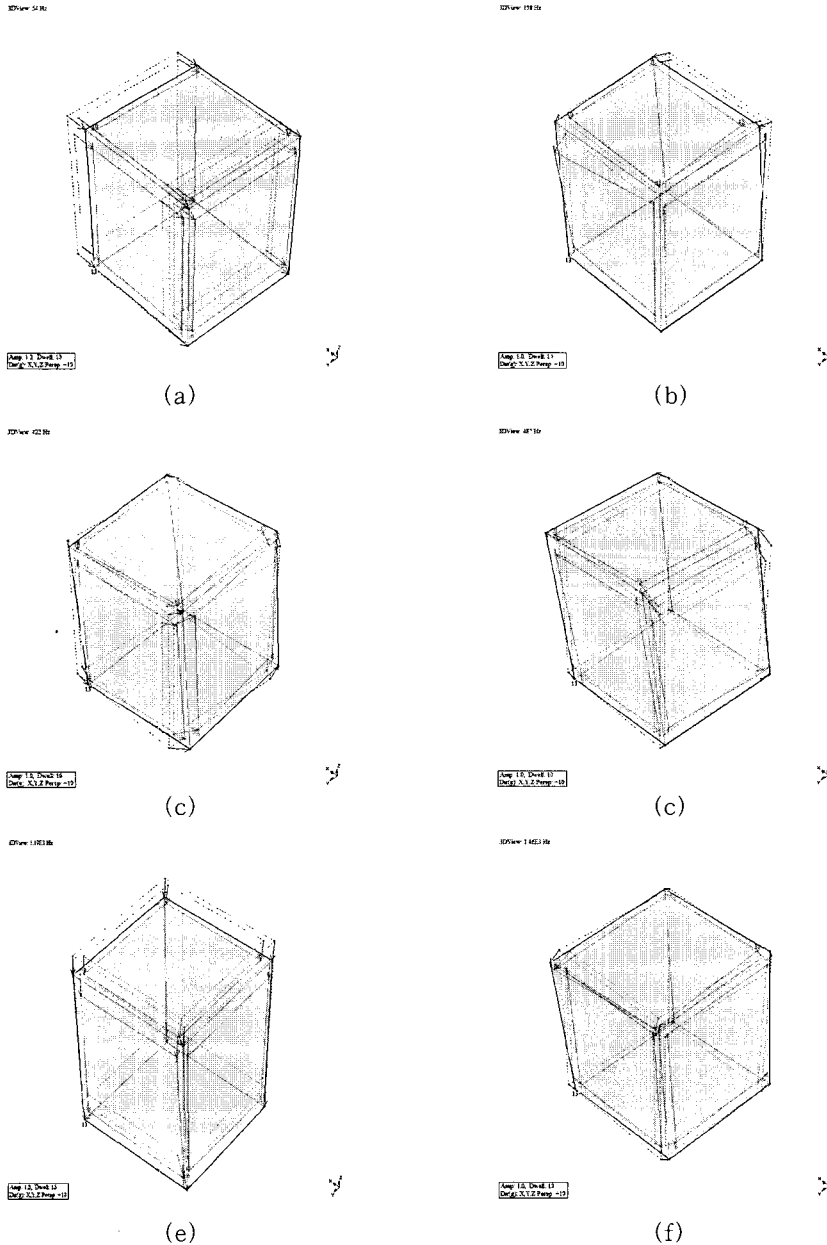
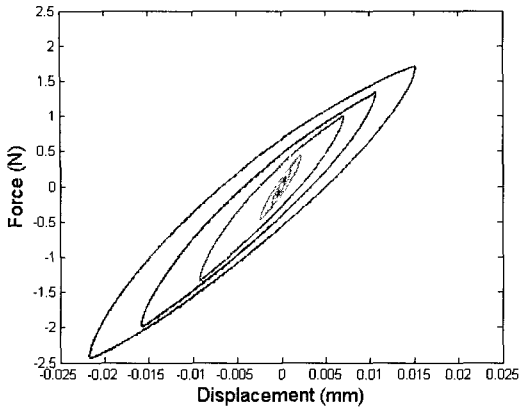
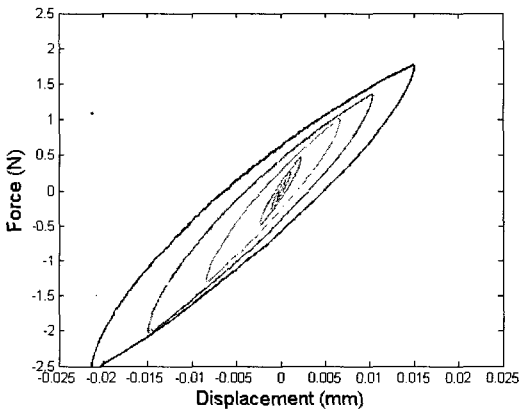


Fig. 4 Mode shapes. (a) translational, (b) rolling, (c) yawing, (d) pitching, (e) bouncing and (f) high-order rolling



(a)



(b)

Fig. 5 Hysteresis curves for the force-displacement relation for (a) 0.5 Hz and (b) 1.0 Hz

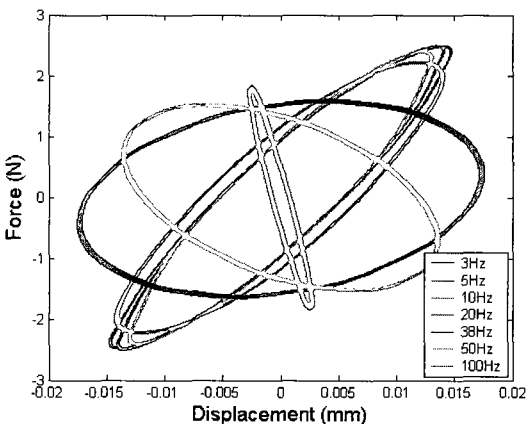


Fig. 6 Force-displacement relation at various excitation frequencies

있는데, 이러한 히스테리시스가 발생하는 메커니즘은 정확하게 규명되지 않고 있다. 하지만, 많은 연구자들이 Dahl의 연구에서 제시된 마찰의 효과와 접촉력의 변화에서 오는 마이크로 스케일 미끄럼(micro-slip)등을 가장 지배적인 원인으로 추측하고 있다.^(8, 9)

Fig. 4의 선도를 보면 변위를 증가시키기 위해서는 가해지는 힘이 비선형적으로 증가해야 한다는 것을 알 수 있다. 즉, 항상 일정한 힘이 작용하는 마찰과는 달리 강성의 역할을 하는 다른 힘이 존재한다고 추정할 수 있다. 이러한 강성이 이송방향 강체 운동 모드의 고유주파수를 나타내는 원인이 된다. Futami 등⁽¹⁰⁾은 이를 등가의 스프링과 질량 및 감쇠기로 모델링하여 제어에 사용하고자 하였다.

또 한 가지 주목하여야 할 점은 이러한 히스테리시스 곡선의 기울기가 가진력의 크기 또는 변위량의 크기에 따라 크게 바뀐다는 점이다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 가진력의 크기가 작을수록 또는 이송변위의 크기가 작을수록 히스테리시스 곡선의 기울기가 커진다. 히스테리시스 곡선의 기울기를 등가강성으로 생각할 수 있으므로 가진력이 작을수록 등가강성이 커진다고 생각할 수 있다. 이러한 현상이 3절에서 살펴본 가진력의 크기에 따라 이송방향 고유 주파수가 바뀌는 원인으로 추정된다. 가진력이 작을수록 등가강성이 커지므로 고유주파수도 따라서 커진다고 예측할 수 있는데, 이 현상은 3절에서 관찰한 현상과 일치한다.

4.2 주파수에 따른 변화

이송방향의 강성과 관성력과의 관계를 보기 위해 가진파의 진폭을 고정하고 가진 주파수만 바꾸어가며 실험하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

가진 주파수가 3~10 Hz까지는 비슷한 응답을 보이나, 공진주파수인 38 Hz에 가까이 갈수록 히스테리시스곡선의 기울기가 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 공진점인 38 Hz에서는 기울기가 0으로 가까워지고 공진주파수를 넘어서면 기울기가 음으로 되어 응답의 위상이 바뀌는 것을 살펴 볼 수 있다.

5. 결론

초정밀 이송장치에서 사용되는 구름요소를 사용한 LM 가이드의 진동특성을 실험적으로 살펴보았다. 주

파수 응답을 통해 고유주파수 및 고유 모드 형상을 파악하였고, 공진의 발생 원인을 살펴봄으로써 해석적으로 고유주파수 및 고유 모드 형상을 구할 수 있는 배경을 제시하였다. 또한, 전통적인 개념의 마찰과는 달리 구름운동이 나타나기 전까지도 미세한 운동이 나타나는데, 이 운동은 비선형 스프링의 특성을 갖고 있는 시스템의 운동과 동일하다. 또한 이러한 비선형 강성 특성으로 인해 이송방향으로도 공진이 나타남을 관찰할 수 있었고, 가진력의 크기에 따라 이송방향 강체 운동 모드의 고유주파수가 바뀌는 현상의 원인도 살펴 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Shimizu, S., Saito, E. and Uchida, H., 1998, "Tribological Studies of Linear Motion Guide Systems", Tribology Transactions, Vol. 41(1), pp. 49~59.
- (2) Canudas de Wit, C., Olsson, H., Åström, K. J. and Lischinsky, P., 1995, "A New Model for Control of Systems with Friction," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 40(3), pp. 419~425.
- (3) Dupont, P., Hayward, V., Armstrong, B. and Altpeter, F., 2002, "Single State Elastoplastic Friction Model," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 47(5), pp. 787~792.
- (4) Tsuruta, K., Murakami, T., Futami, S. and Summimoto, T., 2000, "Genetic Algorithm (GA) Based Modeling of Non-linear Behavior of Friction of A Rolling Ball Guideway", IEEE AMC2000-Nagoya, pp. 181~186.
- (5) 오승훈, 2004, Terfenol-D 구동기의 동적 특성 및 응용, 석사학위논문, 서울대학교 기계항공공학부.
- (6) Ohta, H., and Hayashi, E., 2000, "Vibration of Linear Guideway Type Recirculating Linear Ball Bearings," Journal of Sound and Vibration, Vol. 235(5), pp. 847~861.
- (7) 최재석, 유정훈, 이용섭, 김윤영, 이동진, 이석원, 2004, "볼 베어링을 이용한 Linear Motion Guide의 동적 특성에 관한 연구," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 326~331.
- (8) Dahl, P., 1968, "A Solid Friction Model," Aerospace Corp., El Segundo, CA, Tech. Rep. TOR-0158(3107-18)-1.
- (9) Jhonson, K. L., 1985, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- (10) Futami, S., Furutani, A., and Yoshida, S., 1990, "Nanometer Positioning and Its Micro-dynamics," Nanotechnology, Vol. 1, pp. 31~37.