한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp.695~700.

Linear Compressor 에서 발생하는 마찰에 의한 진동 연구

Friction-induced Vibration of a Linear Compressor

[0]박 종찬**, 왕 세명*, 정 충민***
[0]J. Park**, S. Wang*, and C. Jung***

ABSTRACT

This paper dealt with friction-induced vibrations in engineering practice, specifically arising at the moment of counterturn of two friction surfaces. The harshness of the vibrations are attributed to the sharp change of the friction coefficients from kinetic to static near zero relative velocity, which is one of the examples of the stick slip. But the experimental results and numerical analysis of piston and cylinder operation showed that transition of the friction coefficient from kinetic to static is insignificant in vibrations.

Dry friction itself dominates the harshness of vibrations. This study shows that how dry friction triggers the vibrations and demonstrates the effect of sharp transition from kinetic to static friction coefficient on the vibrations.

1. INTRODUCTION

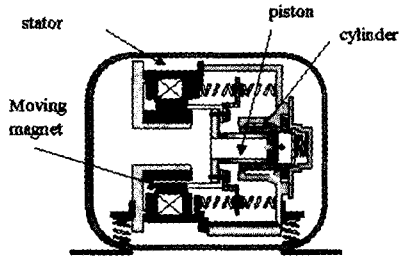
상대운동을 하는 두 접촉면 사이의 마찰 현상에 의해 발생하는 진동현상은 구조 소음을 유발 할뿐 아니라 마찰면의 마모를 증폭 시켜 동역학 시스템의 운전에도 문제를 가져 오므로 수많은 연구자들이 발생 mechanism 에 대한 연구를 수행해오고 있다. 그러나 여전히 명확히 설명되고 있지는 않은데 그것은 기본 적으로 마찰운동이 비선형 현상이기 때문이다. Friction induced vibration 과 stick-stick slip 현상은 유사한 용어로 사용되고 있기는 하지만 마찰에 의해 발생하는 진동현상 중에서도 상대속도가 0 으로 접근할 때 발생하는 물체의 단속적인 변위에 관심을 둔다는 의미에서 stick-slip 현상은 더욱 한정된 연구 분야이다[1-4].

* 광주 과학기술원 정교수
E-mail : smwang@kjist.ac.kr
Tel : (062) 970-2390, Fax : (062) 970-2429
** 광주과학기술원
*** LG DA

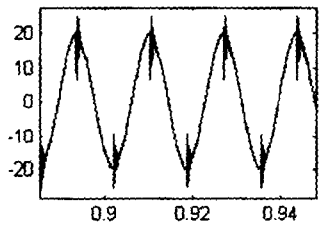
다수의 연구자들[5-6]은 변위와 속도의 관계, 즉 phase plain 에서의 해석이나 속도를 매개 변수로 한 연구에 관심을 두었는데 본 연구에서는 동역학 시스템에 대하여 신호의 분해능이 가장 좋은 가속도를 사용함으로써 운동이 방향이 바뀌는 극히 짧은 시간에 일어나는 운동에 대한 해석을 수행하였다.

마지막으로 본 연구에서는 이론모델에 대한 해석과 더불어 실제로 fig. 1-a 에 주어진 linear compressor 에서 발생하는 진동현상의 거동에 대한 연구를 통하여 마찰력에 의해 발생하는 진동현상에 대한 연구를 수행하였다. Linear compressor 는 전자기력을 piston 의 직선왕복운동으로 변환하여 냉매를 압축하는 기구로써 효율의 증가를 위해서 공진 스프링을 사용하여 축 방향의 공진을 이용한다. Fig.1-b 는 linear compressor 의 frame 에서 측정한 가속도신호로써 운전주파수인 60Hz 의 sinusoidal

성분과 운동의 방향이 바뀌는 매 1 주기마다 가속도의 최고점과 최저점에서 진동현상(peak vibration)이 발생함을 보여주고 있다. 이러한 진동현상은 피스톤과 실린더사이에 작용하는 마찰력에 의한 것으로 상대속도가 0 으로 접근하면서 동 마찰력에서 정 마찰력으로 갑자기 커진 마찰력에 기인한 것으로 생각되어져 왔으며, 일반적인 stick slip 현상의 한 예이다.



a. schematic diagram of a linear compressor



b. acceleration signal

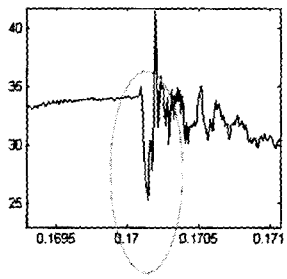
Fig.1 linear compressor and its acceleration signal

2. EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FRICTION INDUCED VIBRATION

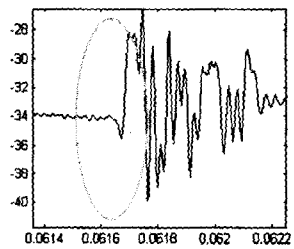
본 연구에서 마찰력에 의해 발생하는 진동현상의 실제 모델로 사용된 Linear compressor 는 피스톤에 부착된 마그넷의 영구자석과 core 에 공급되는 교류전원의 전자기력을 이용하여 피스톤을 직선 왕복 운동시켜 냉매를 압축하는 기구이다.

Piston 과 cylinder 의 상대속도가 0 으로 접근할 때 발생하는 peak vibration 은 극히 짧은 순간에 발생하는 impact response 이기 때문에 response 의 변위나 속도보다는 주파수 분해능이 좋은 가속도 신호에 대한 해석을 수행 하였다.

Fig.2 는 peak vibration 을 maximum 쪽과 minimum 쪽에서 확대한 것이다. 그림에서 주어진 것처럼 peak vibration 의 발생은 가속도의 절대값이 감소하는 방향의 drop 이 발생한 다음 structural vibration 현상이 발생하게 된다. 이러한 acceleration drop 은 시스템에 impulsive force 로 작용하여 진동을 유발시킨다.



a. at maximum



b. at minimum

Fig.2 comparison of the accelerations on both sides of the Frame

Peak vibration의 또 다른 특징의 하나는 운동의 방향이 바뀌는 순간, 즉 acceleration drop의 발생 바로 직전에 가속도의 순간적인 pick up이 발생한다는 것이다. Fig.3은 peak vibration에서 발생하는 pick up을 보여주고 있다.

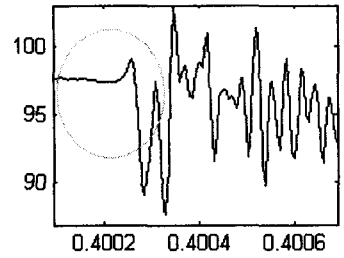


Fig.3 pick up of the acceleration

본 연구는 수치 해석과 이론 해석을 통해서 마찰력에 의한 진동현상의 발생 mechanism 을 규명하였다.

3.THEORETICAL MODEL OF FRICTION

3.1 theoretical dry friction model

Fig.4 는 마찰력이 작용하고 있는 1 자유도 mass-spring-damper system 이다.

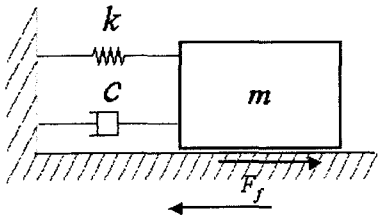


Fig.4 Mass -spring -damper system under friction force

Fig.4 의 system 에서 dry friction 모델을 적용한다면, 작용하는 외력, 즉 마찰력은 mass 의 운동방향에 따라 다음의 Eq.1 과 같이 정의될 수 있다.

$$F_f = F_f(\dot{x}) = \begin{Bmatrix} -\mu N & \dot{x} > 0 \\ 0 & \dot{x} = 0 \\ \mu N & \dot{x} < 0 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

문제를 간단하게 하기위해서 viscous damping 이 없을 때, system 의 지배방정식은 다음과 같이 mass 의 운동방향에 따라 정리된다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + kx &= \mu mg \quad for\ \dot{x} < 0 \\ m\ddot{x} + kx &= -\mu mg \quad for\ \dot{x} > 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Eq.2 의 미분방정식은 비선형이므로 해는 구간을 나누어서 풀어야 한다.

$$\begin{aligned} x(t_a) &= \left(x_0 - \frac{\mu mg}{k} \right) \cos \omega t + \frac{\mu mg}{k} \\ x(t_b) &= \left(x_0 - \frac{3\mu mg}{k} \right) \cos \omega t - \frac{\mu mg}{k} \end{aligned} \tag{3}$$

Eq.3 의 변위해로부터 다음과 같은 가속도해를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t_a) &= -\left(x_0 - \frac{\mu mg}{k} \right) \omega^2 \cos(\omega \cdot \pi / \omega) \\ &= \omega^2 \left(x_0 - \frac{\mu mg}{k} \right) \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t_b) &= -\left(x_0 - \frac{3\mu mg}{k} \right) \omega^2 \cos(\omega \cdot \pi / \omega) \\ &= \omega^2 \left(x_0 - \frac{3\mu mg}{k} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

위의 두식은 운동방향이 바뀌는 순간 가속도의 불연속이 발생하는 것을 보여주고 있다. 이 가속도의 불연속은 dry friction 에 비례하는 $\frac{2\mu mg}{k}$ 의 크기를 갖는다. 이 가속도 불연속이 실제 구조물에 미치는 영향을 보기 위하여 간단한 이론모델에 대한 수치해석이 수행되었다.

3.2 Numerical analysis of the dry friction model

Fig.5 는 fig.4 에 대한 수치 해석 결과로

가속도의 최대값, 즉 mass 의 방향이 바뀌는 부분에서 가속도의 불연속한 peak 을 볼 수 있다. 위의 수치해석에는 4 차 Runge-Kutta 식을 사용하였다.

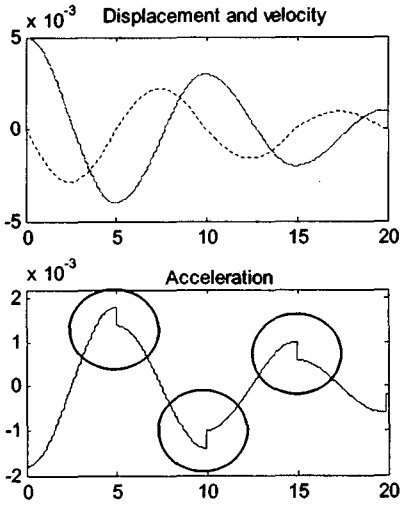


Fig.5 Numerical analysis result

Fig.5 는 mass 의 운동 방향이 바뀌는 순간 이론 해에서 존재하는 가속도의 불연속이 수치해에서도 나타나고 있는 것을 보여준다.

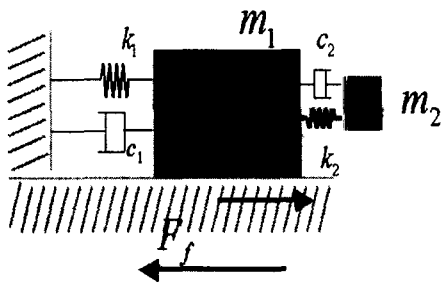
3.3 Physical effect of the acceleration jump

Fig.6-a 는 가속도의 불연속이 연속체 system 에 미치는 영향을 보기 위하여 부가 질량이 추가된 2 자유도계 system 을 보여준다. 부가 질량은 다음과 같은 조건을 가지고 있다.

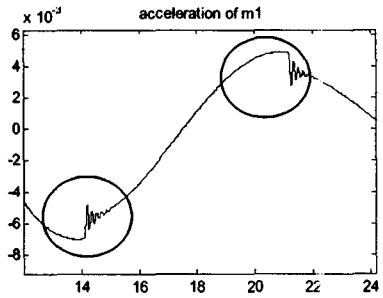
$$m_1 \rangle\rangle m_2 \ , \ k_1 \langle\langle k_2 \qquad (6)$$

따라서, 부가 질량은 impact force 를 받는 structure 의 공진 모드의 영향을 보여 준다.

Fig.6-b 는 가속도 해석결과 이다.



b. added mass



a. numerical analysis results

Fig.6 2 D.O.F system

위의 그림은 마찰에 의해 발생하는 가속도의 불연속은 system 에 대하여 impact force 로 작용한다는 것을 보여 준다.

또한 정 마찰력의 크기에 대한 analysis 는 impulsive force 의 크기는 정 마찰력에 비례함을 보여주었다.

3.4 Effect of the stick slip friction model

Fig.7 은 stick slip friction model 의 negative slope 의 영향을 고려하기 위해서 사용된 마찰력 모델이다. Negative slope 와 critical velocity 에 대한 이러한 단순화는 정 마찰계수와 동 마찰계수의 변이가 일어 나는 시간이 극히 짧기 때문에 가능한 것이며 수치해석결과와 실험결과의 비교를 통해서 검증되었다.

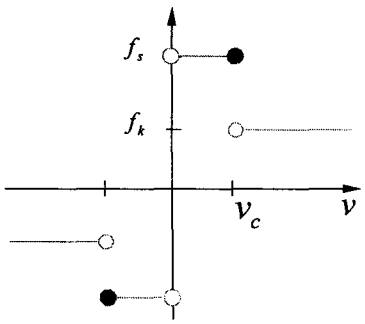
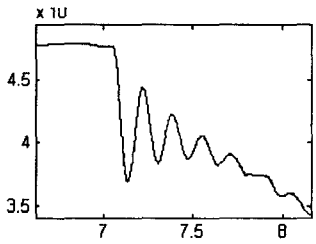
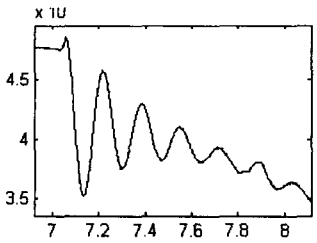


Fig.7 variable friction forces

Fig.8 은 dry friction model 과 variable friction force 모델을 해석 결과이다.



a. dry friction model



b. variable friction(stick slip)

Fig. 8 response of stick slip model

Fig. 8-b 의 해석결과는 운동의 방향이 바뀌는 순간에 발생하는 마찰계수의 갑작스러운 변화가 acceleration drop 이 일어나기 직전에 pick up 현상을 일으키는 것을 보여준다. 이것은 fig.3 의 현상을 설명해주고 있다. 따라서 acceleration drop 이 일어나기 직전에 발생하는 pick up 현상이 바로 variable friction force 의 영향이다.

Fig.6 과 fig.8 의 결과를 종합해보면 상대 운동을 하는 두 마찰면에서 운동의 방향이 바뀌는 순간 발생하는 진동의 주요한 가진원은 마찰력의 방향이 바뀌는 때문이며, 정 마찰력과 동 마찰력의 순간적인 천이는 acceleration drop 이 발생하기 직전에 발생하는 acceleration pick up 에 영향을 준다.

4. NUMERICAL ANALYSIS OF THE VIBRATION OF CYLINDER AND PISTON

Linear Compressor 에서 발생하는 진동현상에 대한 연구를 위해서 Fi.g9 에 주어지는 해석 모델이 만들어 졌다. 이 모델은 Frame 과 Piston 을 m_1 과 m_2 의 mass 로 모델링 하였으며 m_3 은 Frame 과 Piston 의 상대 운동 시 마찰에 의한 가진이 시스템에 미치는 영향을 보기 위한 것이다.

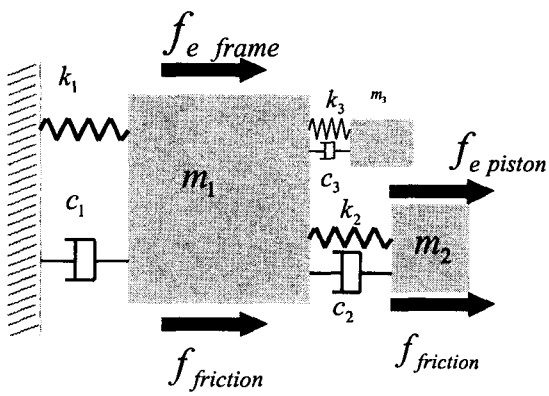
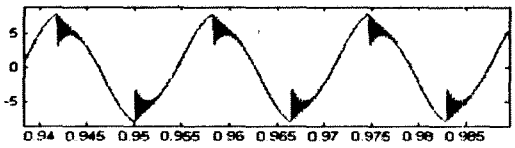


Fig.9 Numerical model of linear compressor

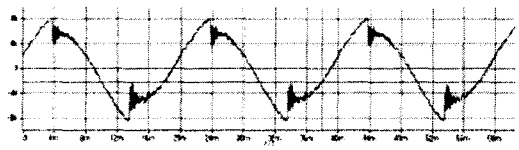
System 의 외력은 전자기력과 상대 운동에 의한 마찰력이며, 수치 해석모델의 구동 조건은 전자기적 가진력 F_e 와 $f_{friction}$ 에 의해서 결정되는데 실제 linear compressor 의 작동실험으로부터 결정 되었다.

본 연구의 관심 대상인 속도가 바뀌는 순간의 마찰력을 결정하기 위하여 슬라이닥스를 이용하여 전원을 0 에서부터 천천히 증가시키다가 처음 compressor 가 운동하기 시작하는 전원과 steady state 상태를 유지한 후 다시 전원을 내리면서 compressor 가 멈추는 전원을 측정하여 마찰력 값을 결정하였다.

Fig.10 은 수치 해석을 통한 예측 결과와 실제 작동중인 compressor 에서 측정한 가속도를 비교하여 보여준다.



a. numerical results



b. Experimental results (data from LG)

Fig.10 acceleration of the frame

Fig.10 은 마찰운동을 하는 두 물체에 대한 해석 결과와 실험결과가 잘 일치하는 것을 보여주는데 이것으로 마찰운동에 의해 발생하는 진동현상에 대한 본 연구의 결과를 검증해주고 있다.

CONCLUSIONS

본 연구에서는 마찰운동에 대한 이론 해석과 수치 해석을 통하여 마찰운동의 상대속도의 방향이 바뀌는 순간에 발생하는 진동현상의 원인을 고찰 하였다.

Linear compressor 의 piston 과 cylinder 의 상대운동에 대한 가속도 해석을 통해서 상대운동의 방향이 바뀌는 순간에 acceleration drop 으로 인한 시스템의 가진과 가속도 peak up 현상을 파악하였다.

마찰운동에 대한 이론적 해석은 시스템에 대한 가진력은 마찰력의 방향이 바뀌는 것에 기인하며 상대 속도가 0 인 순간에 발생하는 마찰계수의 negative slope 은 가속도 peak up 과 관련이 있음을 보여 주었다.

이러한 이론적 해석들은 실제 linear compressor 의 거동을 잘 나타내 주었다.

REFERENCE

[1] Chao. Gao, Doris Kuhlmann-Wilsdorf and David D. Makel, "Fundamentals of stick-slip", Wear, 162-164 (1993) 1139-1149

[2] R. I. Leine, D. H. Van Campen, and A. De Kraker, " Stick-slip vibrations induced by alternate friction models", Nonlinear Dynamics 16:41-54, 1998.

[3] Andrew D. Dimarogonas, Sam Haddad, vibration for engineers (Prentice-Hall, Inc., 1992)

[4] Singiresu s. Rao, mechanical vibrations 3rd(Addison-Wesley Publishing Company, 1995)

[5] Raouf A, Ibrahim, "Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos: Part II-Dynamics and modeling", ASME, 1992

[6] B. L. Van De Vrande, " An approximate analysis of dry-friction-induced stick-slip vibrations by a smoothing procedure", Nonlinear Dynamics 19: 157-169, 1999