

유압 텔레스코픽 붐의 스틱-슬립에 대한 거동해석 Behavior analysis on stick-slip of hydraulic telescopic boom

백일현, 정재연*, 김신**

전북대학교 정밀기계공학과 대학원

*전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구소

** (주)수산특장 기술연구소

Il-Hyun Baek, Jae-Youn Jung*, Shin Kim**

Graduate School, Chonbuk National University

*Faculty of Mechanical & Aerospace System Engineering and AHTRI, Chonbuk National University

**R&D Institute, Soosan Special Purpose Vehicles, Co., Ltd

Abstract - Tribology, in other words, interacting surfaces in relative motion, is essential in life. The relative motion on surfaces may cause some problems with heat, vibration, noise, and so on. Unwanted vibrations by friction, which may arise during the operation of machines, are costly in terms of reduction of performance and service life. All these phenomena involve stick-slip. The telescopic boom operations involves stick-slip oscillations like slideways. Unwanted stick-slip oscillations on telescopic boom operations cannot achieve smooth sliding and many developers of that machine makes a lot of effort to remove or reduce it. So this paper presents stick-slip oscillation with pressure of the hydraulic cylinder which drives booms, and attempts a theoretical approach for the numerical analysis for its stick-slip condition.

Keywords - aerial working platform, telescope boom, stick-slip, oscillation

1. 서론

조선소의 선박 건조, 빌딩 외벽 작업, 보수 공사 등의 고공작업을 할 경우, 인력 및 공사비를 절감하고 안전한 작업을 목적으로 고소작업대(aerial working platform)가 주로 사용되고 있으며, 이러한 고소작업대에는 크게 telescope type, knuckle type, scissors type의 세 종류로 분류된다.

본 논문의 연구대상인 telescope type은 직진식으로 불리우며, 안테나처럼 각 단의

boom이 인출 또는 인입되면서 상대 미끄럼 운동을 하게 된다(Fig.1.1).

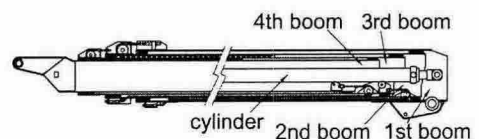


Fig.1.1 Telescopic boom

이 때, boom의 재질인 철과 철이 마찰하게 되면 상당히 큰 마찰력과 불안정적인 운동을 하게 되고, boom 모재에 대한 마모

가 발생하여 안전에도 위험한 영향을 끼치게 된다. 따라서 각 boom에는 윤활제가 함유되어 있는 재질이 함유된 pad가 삽입되어 마찰력의 저감 및 작동성을 향상시킨다.

하지만 저속 영역에서는 boom이 비정상적인 움직임과 멈춤을 반복하여, 불안정한 진동이 유발됨으로써 stick-slip이 발생할 수 있다. 이 경우, stick-slip에 의해 발생하는 문제들이 장비의 오작동, 기기 파손, 심한 경우는 인명에 치명적인 피해를 입히기도 한다. 부품이 많고 상대운동을 하는 부분이 많은 현대의 산업기계들은 이러한 문제에 항상 직면해 있기 때문에, stick-slip의 발생 원인과 이에 대한 저감 대책이 절실히 요구된다.

본 연구에서는 telescope boom에 있어서 stick-slip에 대한 기본적인 현상을 파악하고, boom과 cylinder에 대한 모델링을 통해 이론적 접근을 시도하였다.

2. Stick-Slip 이론

2.1. Stick-Slip 현상

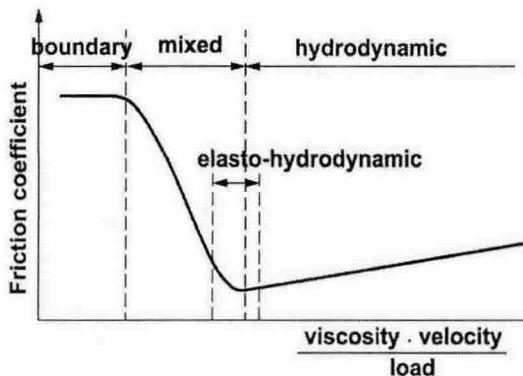


Fig.2.1 Stribeck curve

Fig.2.1에서 stribeck curve를 보여주며, stick-slip 현상은 속도가 매우 작고 수직력은 상대적으로 매우 큰 영역에서 발생하기 때문에 경계윤활영역에 포함된다.

Fig.2.2에서 stick-slip 현상을 파악해 보도록 한다. 물체 A를 일정한 속도 v 로 움직이면 spring의 압축력이 정지마찰력과 같아지는 순간까지 질량 m 을 가지는 물체 B는 움직이지 않는다.

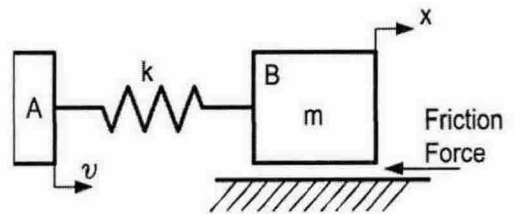


Fig.2.2 Stick-slip model

A가 계속 움직여 spring의 압축력이 정지마찰력보다 커지는 순간 물체는 움직이게 되며 갑작스러운 마찰계수의 저하로 인해 마찰력이 작아지고 spring의 압축력과 운동마찰력의 차이에 의해 B가 움직이게 된다(slip). 이 힘의 차이는 B를 가속시키는 가속력으로 작용하게 된다.

B가 가속되어 A의 속도보다 빠르게 되면 감속구간을 지나게 되는데, 이 때 spring은 인장이 되고 B에는 반대의 힘이 작용하게 되며 감속된다. B의 속도가 점점 줄어 운동마찰력보다 spring의 힘이 작게 되면 B의 운동은 정지(stick)하게 되며 이를 다시 움직이기 위해서는 이의 정지마찰력보다 spring의 압축력이 커졌을 때 가능하게 된다. 이러한 미끄럼과 정지의 현상이 반복되는 것이 바로 “STICK-SLIP”이다.

2.2. Friction-Velocity Relation

Stick-slip 현상에 있어서 중요한 인자 중의 하나는 friction-velocity 특성이다.

일반적으로 마찰력은 마찰계수와 수직력에 의해서만 변화한다고 생각하지만, 실제의 조건에서는 기하학적인 형상, 표면상태 등에 의해서도 크게 달라질 수 있다.

많은 연구자들이 이상적인 모델의 해석을 위해 다양한 friction-velocity 곡선을 연구, 제시하였다.

본 연구에서는 Fig. 2.3과 같이 물체가 움직이기 직전까지 마찰력이 증가하고, 정지마찰력 F_{fk} 를 넘어서는 순간 운동마찰력 F_k 로 떨어지고 속도의 증가에 따라 점차 운동마찰력 F_k 가 감소하는 경향을 가진 모델을 적용하였다.

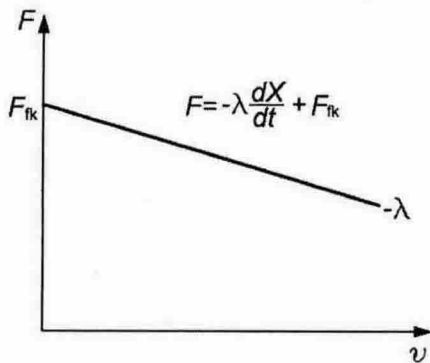


Fig.2.3 Friction force-velocity characteristic

3. Telescopic Boom의 이론

3.1. 개요

본 연구에서 대상으로 하는 telescopic boom은 Fig.1.1과 같이 cylinder와 chain을

이용한 구동하는 4th boom으로 구성되어 있으며, cylinder가 2nd boom을, chain이 3rd 및 4th boom을 구동한다.

즉, Cylinder가 움직임에 따라 2단 boom이 구동되며 2단 boom의 roller가 1단 boom과 3단 boom에 고정된 chain을 밀어 3단 boom을 움직이고, 3단 boom이 움직이기 시작하면 3단 boom의 roller는 2단 boom과 4단 boom에 고정된 chain을 밀어 4단 boom을 움직이게 된다.

Boom의 거동에 따른 전체 stroke에 대한 해석은 방대한 data양과, 고유량에서의 오차의 누적 때문에 cylinder에 의한 구동과 chain에 의한 구동에 대한 부분적인 해석을 행하고, 전체적인 telescopic boom에 대한 이론적인 접근이 필요하다.

따라서, 본 연구는 먼저 cylinder에 대한 구동, 즉 1 mass-cylinder 구동계에 대한 이론적인 접근을 시도하였고, 해석을 위해 다음과 같이 가정하였다..

- ① Boom은 1차원 거동(수평)만을 행한다.
- ② Pad의 반력은 pad 도심에 수직으로 작용한다.
- ③ Boom의 구동 시 stick-slip 이외의 불안정한 운동조건은 존재하지 않는다.
- ④ Boom의 구동 시 pad 면과 작동유의 온도는 일정하다.
- ⑤ 마찰계수는 negative-gradient특성을 가지며, 속도와 관계만 가진다.
- ⑥ 작동유의 압축성은 온도나 다른 조건에 따라 변하지 않고 일정하다.
- ⑦ Pad의 감쇠력은 다른 힘들에 비해 매우 작기 때문에 무시한다.

⑧ Pad 마찰력 이외의 다른 마찰력은 무시한다.

해석은 Runge-Kutta 5차 방법을 이용하였으며, 가변시간폭을 가지는 방법을 이용하였다. 각각의 해석조건에서 초기조건은 실제와 유사한 조건을 적용하였다.

3.2. 1 mass-cylinder system

Fig.3.2과 같이 boom과 cylinder의 관계를 1 mass-cylinder system으로 모델화하였다.

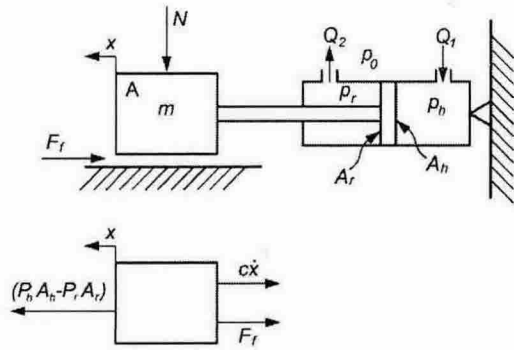


Fig.3.1 1 mass-cylinder system

Cylinder에 공급되는 유량은 cylinder head 측으로 인입되어 head측의 압력을 상승시킨다. Cylinder head 측의 압력이 상승하여 이 압력에 의한 힘이 A의 정지 마찰력 F_{fs} 보다 크게 되면 A는 움직이기 시작한다(slip). A가 움직이게 되면 cylinder head측의 체적 증가로 인해 압력이 낮아지고 A의 동마찰력 F_{fk} 보다 작게 되면 멈추게 된다(stick).

이 system의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = -F_f + (p_n \cdot A_n - p_r \cdot A_r) \dots\dots\dots (1)$$

여기에서 마찰력(F_f)는 정지상태와 운동상태에서 다르게 표현된다.

$$\begin{cases} F_{fs} = \mu_s \cdot N & (\text{정지상태}) \\ F_{fs} = (\mu_s - \lambda_k \cdot \dot{x})N & (\text{운동상태}) \end{cases} \dots (2)$$

Stick-slip 상태에서 마찰력 변동에 의한 힘의 변화에 따라서 가속력이 변화한다. 이러한 조건들은 물체의 가속력은 다음과 같이 변화한다.

[Case A] $\dot{x} = 0$ 일 때,

i) $F_p < F_{fs}$
 ➔ 가속력 = 0

ii) $F_p > F_{fs}$
 ➔ 가속력 = $F_p - F_{fk}$

만약, 압력에 의한 힘이 $-F_{fs}$ 보다 작게 되면 반대방향으로 움직인다.

➔ 가속력 = $F_p + F_{fk}$

즉, 물체가 정지한 경우, $F_p > F_{fs}$ 일 때 운동을 시작한다.

[Case B] $\dot{x} \neq 0$ 일 때,

i) $F_p > F_{fk}$
 ➔ 가속력 = $F_p - F_{fk} > 0$ (가속)

ii) $F_p < F_{fk}$
 ➔ 가속력 = $F_p - F_{fk} < 0$ (감속)

Cylinder head 측과 rod 측의 유량의 변화(Q_1, Q_2)와 cylinder stroke (x) 변화는 head측과 rod측의 압력에 영향을 미친다. 연속방정식을 이용해 cylinder head측의 압력변화는 식 (3)으로, rod측의 압력변화를 식 (4)로 표현할 수 있다.

- Cylinder head 측의 압력변화

$$\dot{p}_h = \frac{K_f}{V_{h0} + A_h x} (Q_1 - A_h \dot{x}) \dots\dots\dots (3)$$

- Cylinder rod 측의 압력변화

$$\dot{p}_r = \frac{K_f}{V_{r0} - A_r x} A_r \dot{x} - C_c A_c \sqrt{\frac{2(p_r - p_0)}{\rho}} \dots\dots\dots (4)$$

위 식들은 1차 연립미분방정식의 형태로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{dx}{dt} \\ \ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{1}{m} [(p_h A_h - p_r A_r) - F_f] \\ \dot{p}_h = \frac{dp_h}{dt} = \frac{K_f}{V_{h0} + A_h x} (Q_1 - A_h \dot{x}) \\ \dot{p}_r = \frac{dp_r}{dt} \\ \quad = \frac{K_f}{V_{r0} - A_r x} A_r \dot{x} - C_c A_c \sqrt{\frac{2(p_r - p_0)}{\rho}} \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

3.3. 해석결과

수치해석은 Ruge-Kutta 5차 방법을 이용하였으며, 해석에 사용된 각 입력값들은 Table 3.1과 같다.

Fig.3.2는 대표적인 해석결과를 보여주며, 질량의 변위는 계단 형상으로 증가하고 있다. 초기상태에서는 압력에 의한 힘이 정지마찰력보다 작기 때문에 물체는 움직이지 않는다. 입력유량에 의해 cylinder head 측의 압력이 증가하여 정지마찰력보다 커지면 움직이기 시작한다. 이 때 속도는 0보다 커지게 되며 정지마찰력과 동마찰력의 차이에 의한 가속이 시작된다. 일단 움직이기

시작하면 마찰력의 감소에 의해 속도가 증가하고 head측의 체적이 증가하여 압력이 저하한다.

Table 3.1 Input parameter

Cylinder tube diameter	d_h	110	mm
Cylinder rod diameter	d_r	80	mm
Cylinder outlet diameter	d_c	9	mm
Initial volume	V_{no}	0.65×10^{-3}	m^3
Initial volume	V_{ro}	0.022	m^3
Bulk modulus of oil	K_f	1.7×10^7	N/m^2
Density of oil	ρ	870	kg/m^3
Discharge coefficient of outlet	C_d	0.6	
Mass	m	1,500	kg
Static friction coefficient	μ_s	0.3	
Kinetic friction coefficient	μ_k	0.25	
Friction-velocity gradient	λ_k	0.05	
Return line pressure	P_0	0.2×10^5	N/m^2

그리하여 동마찰력보다 압력에 의해 미는 힘이 작아지면 물체는 감속되고 결국 멈추게 된다. 만약 입력유량이 많아 멈추기 전에 동마찰력보다 큰 압력을 형성하게 되면 stick이 일어나지 않게 된다.

여기에서 압력의 형상은 톱니 파형을 나타냄을 (d)를 통해 볼 수 있다. 이 압력의 변화는 cylinder 구동시스템에서는 system을 control한다. System의 control에 있어서 압력은 유량을 결정하는 요소가 되며 이의 파악은 곧 system의 control을 얼마나 잘 할 수 있느냐에 큰 영향을 끼치게 되는 것이다. Stick-slip상태에서의 cylinder 내 압력 변화는 톱니형상으로 나타난다.

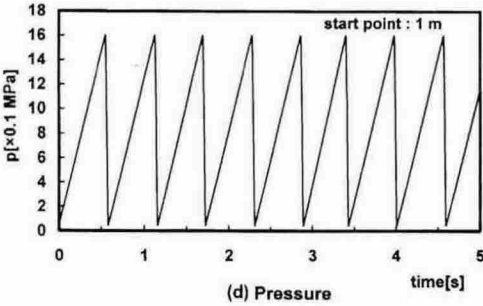
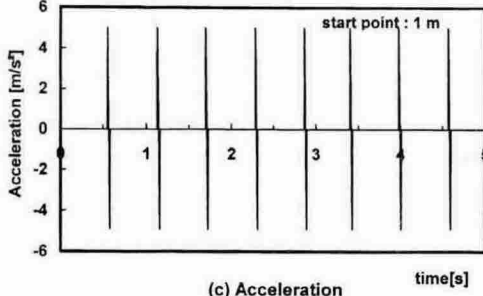
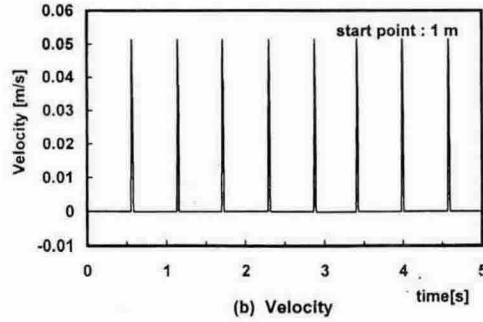
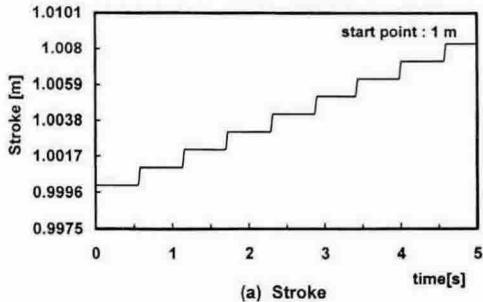


Fig.3.2 Stick-slip

Cylinder가 움직이지 않는 동안 head측의 압력은 입력 유량에 의해 증가를 하게 된다. Cylinder가 움직이는 순간 체적의 증가로 인해 압력은 급강하하며, cylinder의

움직임에 의한 체적 증가가 입력 유량보다 작아지는 순간까지 계속 감소한다.

Cylinder의 속도가 감소하여 입력유량에 의한 압력 상승효과가 더 커지게 되면 압력의 증가가 시작된다. 이로 인해 진동을 유발 시킬 수 있다. 이것이 stick-slip에 의한 자려진동의 한가지 예이다.

Fig.3.3은 유량의 증가에 따른 stick-slip의 변화를 보여준다. 유량이 증가했을 때 stick-slip에 의한 진동주기는 짧아지는 것을 볼 수 있다.

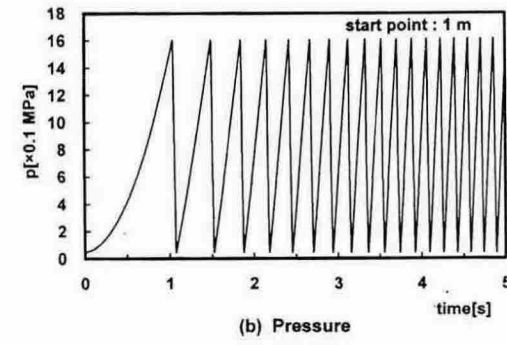
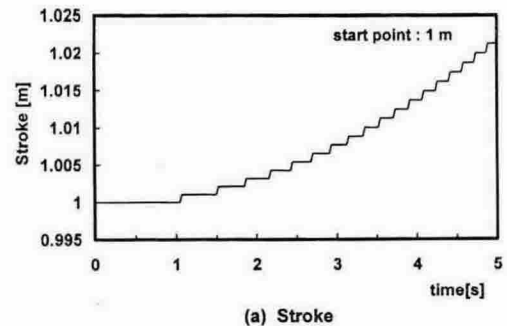


Fig.3.3 Stick-slip for increasing flow rate

Fig.3.4는 움직임이 시작되는 초기의 등마찰계수의 변화에 따른 진동형태를 보여준다. 압력이 감소하는 도중에 물체가 멈추게 되어 다시 압력이 상승하는 형태의 파형이 나타나고 있다.

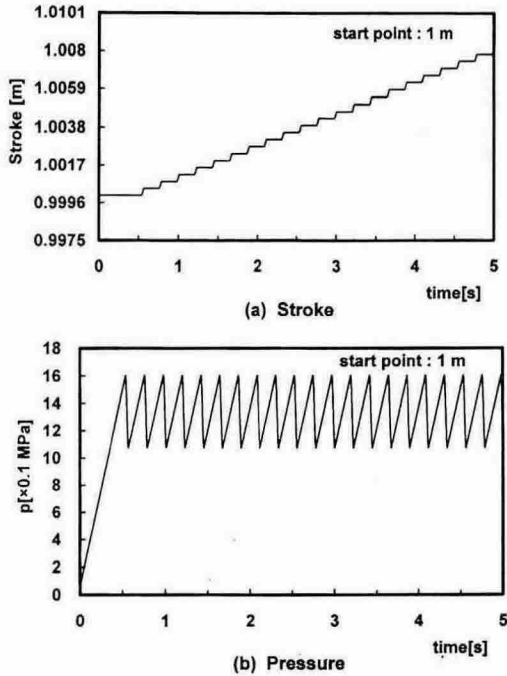


Fig.3.4 Stick-slip for $\mu_k=0.25$

4. 결론

본 연구는 telescopic type 고소작업대에 있어서, boom과 cylinder간의 stick-slip에 대해 이론적인 방법에 대해 논하였다.

이에 따른 몇 가지 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. Stick-slip을 물체간의 미끄럼 운동 시 정마찰력과 동마찰력의 차이에 의해 발생한다.
2. Stick-slip상태에서 cylinder내 압력 변화는 톱니형상으로 나타나는 것을 확인하였다.
3. 유량이 증가했을 때 stick-slip에 의한 진동주기는 짧아진다.

4. 동마찰계수가 증가하면 stick-slip에 의한 진동폭이 짧아진다.

이후의 연구는 본 논문을 기초로 하여 telescopic boom과 chain간의 stick-slip에 대해서 해석할 뿐만 아니라, telescopic boom 전체 시스템의 모델 해석을 통해 stick-slip이 미치는 영향을 파악하고 이의 저감대책을 강구하여 고소작업대의 고성능화에 기여하고자 한다.

Nomenclatures

- A_n : Tube area
- A_r : Tube area-rod area
- c : Damping coefficient
- C_c : Discharge coefficient of outlet port
- F_f : Friction force
- F_{fs} : Static friction force
- F_k : Kinetic friction force
- F_p : Force by pressure in a cylinder
- k : Stiffness of spring
- K_f : Bulk modulus
- N : Normal force
- m : Mass
- p_0 : Pressure in return line
- p_h : Pressure in piston chamber of cylinder
- p_r : Pressure in rod chamber of cylinder
- Q_1 : Flow rate through inlet
- Q_2 : Flow rate through outlet
- v : Velocity
- V_{h0} : Initial volume of piston chamber
- V_{r0} : Initial volume of rod chamber
- x : Displacement
- λ_k : Friction-velocity coefficient

μ_k : Kinetic friction coefficient
 μ_s : Static friction coefficient
 ρ : Density of hydraulic oil

참고문헌

- [1] Van De Velde, F. and De Baets, P., Mathematical approach of the influencing factors on stick-slip induced by decelerative motion, *Wear(Switzerland)*, Vol. 201, No. 1-2, pp. 80-93, Dec. 1996.
- [2] Van De Velde, F., De Baets, P., and Degrieck, J., The Friction Force During Stick-slip with Velocity Reversal, *Wear(Switzerland)*, Vol. 216, No. 1, pp. 138-149, 15 Mar. 1998.
- [3] Van De Velde, F. and De Baets, P., The Relation between Friction Force and Relative Speed During the Slip-phase of a Stick-slip Cycle, *Wear(Switzerland)*, Vol. 219, No. 2, pp. 220-226, Sept. 1998.
- [4] Takano, E., Saeki, M., Sasamoto, K. and Hisano, T., On the Occurrence Conditions of Stick-Slip Phenomena, *J.S.M.E.*, Vol.64, No.620, 1998, pp.1120-1129.
- [5] Bailey, G.E. and McFarland, D.M., Investigation of Stick-Slip Friction in Slideways, *Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division*, DSC-Vol.58, pp.207-213, 1996.
- [6] Galvanetto, U. Bishop, S.R. and Briseghella, L., Mechanical Stick-Slip Vibrations, *Vol.5, No.3*, 1995, pp.637-651.
- [7] Karnopp, D., ComputerSimulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic Systems, *Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.107, No.1, 1985, pp.100-103.
- [8] S. Kato, N. Sato and T. Matsubayashi., Some considerations on characteristics of static friction of machine tool slideway, *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs, Series F., J. Lubric. Tech.*, 94, No. 3, July, 1973, pp. 234-47.