

공작기계 이송시 스틱슬립에 관한 고찰

정성택* , 박종남(조선대 대학원 기계공학과) , 조규재(조선대 기계공학과) ,

A Study of the stick-slip by feed of the machining center

S. T. Jeong, J. N. Park(Grad. Mech. Eng. Dept., CSU), G. J. Cho(Mech. Eng. Dept., CSU)

ABSTRACT

In the ballscrew slide system the major problems in accomplishing the high-speed and high-precision are the friction between elements and the decrease of axial stiffness. Especially the friction on the guide have a bad effect on the precision of sliding. Furthermore stick-slip occur when the low stiffness of slide system. The stick-slip have a bad influence on the precision. In this research, the affection of stick-slip friction to the precision of the slide system is studied and the possible solution of the precision is proposed.

Key Words : Stick-slip (스틱슬립)

1. 서론

최근 산업의 발달과 더불어 생산품은 고기능, 경량화의 추세에 있고, 이에 따라 다양한 신소재가 개발되어지고 있으며, 제품의 정밀도에 대한 요구도 점차 높아지고 있다. 공작기계 분야에 있어서도 고생산성과 고정밀도를 갖춘 제품을 제작하기 위한 노력이 계속되어지고 있다. 가공 정밀도를 향상시켜 생산품의 부가가치를 높이고, 고정도화에 따른 이송계의 구조 및 위치 결정 정밀도의 성능향상을 위하여 공작기계의 고정밀화, 고신뢰화, 고속화, 그리고 자동화 등이 요구되고 있다. 공작기계의 이송계는 주축계와 더불어 공작물의 형상정도를 결정하는 중요한 운동 요소로써 보수가 용이하고 강성이 높고, 진동 특성이 양호한 정.동압적인 미끄럼 안내형식이 각종 공작기계에 많이 사용되고 있다. 정.동압적인 미끄럼 안내면에서는 안내면의 형상오차, 마찰력의 변동 등에 의한 이송계의 운동오차가 발생하게 된다.

이미 이송시스템에는 이전의 사각나사보다 그 기능이 훨씬 뛰어난 볼나사(ball screw)를 채용한 시스템이 대다수를 이루고 있으므로 볼나사 자체를 고정밀화하고 고속이송시 진동 및 발열의 문제가 없도록 하는 것이 크게 중요시되고 있다. 또한 이송계 전체의 관점에서 볼 때 이송 구동기구의 핵심인 볼나사 뿐만 아니라 지지베어링, 서보 모터, 안내면, 커플링 등과 이송계를 지지하는 베이스에 이르기까지 동시에 고려해야 할 시점에 이르렀다고 할 수 있다.

볼나사 이송계의 경우 고속 고정밀화를 이루는데 가장 큰 문제가 되는 것은 각 요소와 요소 사이에서의 마찰과 이송계 자체의 축 방향 강성의 저하이다. 이송계 각부 즉 안내면 볼나사와 너트, 지지베어링, 서보 모터의 모든 부분에 존재하는 마찰은 이송시스템의 성능을 저하시키는데, 특히 안내면에서의 마찰이 이송정밀도에 나쁜 영향을 준다. 게다가 이송계의 강성이 낮은 경우에는 스틱슬립과 같은 특수한 마찰 형태가 발생하기도 한다. 또한 무

부하시어 이러한 스틱슬립현상이 미세하지만 공작물의 무게에 의해 하중이 가해질 때는 스틱슬립 현상이 이송정밀도에 미치는 영향이 크다고 사료되므로 본 논문에서는 스틱슬립 마찰에 의한 운동 오차에 따른 변화들을 고찰하여 최적의 이송정밀도를 찾는 방안을 제시하려한다.

2. 스틱슬립

2.1 스틱슬립 원리

서로 접촉하고 있는 두 물체가 상대 운동을 시작하려고 할 때, 접촉면에는 어떤 마찰력이 작용하게 된다. 달리 말하면 서로 접촉하고 있는 어떤 두 물체가 정지상태에서부터 운동을 시작하기 위해 극복해야 할 최대 힘이 양방향에 존재하고 이것을 최대 정지 마찰력이라 할 수 있다.

이때 최대 정지마찰력보다 작은 외력이 존재한다면 두 물체는 서로 상대운동하지 않고, 이 때의 두 물체간의 마찰력은 작용 외력을 완전히 상쇄하는 작용 외력과 같은 크기의 값이라 할 수 있다. 즉 속도가 0인 상태를 벗어나, 두 물체간의 상대 운동을 일으키기 위해서는 외력의 크기가 마찰력보다 커야 두 물체간의 접촉 상태를 완전히 분리시켜 운동할 수 있다. 이때 이러한 접촉 상태를 스틱킹(sticking)이라 한다. 외력이 이러한 응착력(stiction force)을 넘어서 가해지면, 물체간의 접촉은 분리되고, 서로간 표면의 미끄러짐이 발생하여 상대운동을 하게된다. 이 때 작용하는 마찰력은 미끄러짐 마찰력(slip force)이다. 이와 같이 속도가 없을 때 일어나는 특별한 형태의 마찰이 스틱슬립이다.

2.2. 스틱 슬립에 의한 자세거동

저속 이송의 경우에는 이송계에 스틱슬립이 발생할 가능성이 크게 된다. 스틱슬립은 안내면의 정마찰계수가 동마찰계수 보다 큰데서 원인이 된다. 이송 중에 스틱슬립이 발생하면, 진폭은 이송 구동시의 최소이송단위와 위치결정시 이송체 정지위치의 불규칙한 범위를 결정하는 것이 되므로 미소위 치결정을 어렵게 한다.

Fig. 2.1(a)는 수직 안내면의 구동기구를 나타내었다. 이송체 미끄럼(slide)면에 작용하는 마찰력이 규칙적으로 변동하는 경우에는 스틱슬립이 발생하게 된다. 일반적으로 스틱슬립은 저속 이송시 발생하며 가공면에도 스틱슬립의 주기적으로 표시가 관찰된다. 또한 미끄럼(slide)면상의 마찰력의 작용점이 이송위치에 따라 다를 때엔 불규칙한 자세거동이 발생하게 된다. Fig. 2.1(a)을 간략하게

표현하기 위해 이송체에서 Y 와 Z 방향은 이송체 운동을 구속하지만, X 방향은 병진운동이 가능하게 된다. 이송체 중량은 중심(G) 위치에 부하가 집중되므로 볼나사의 강성을 등가 스프링 정수(k)로 변환시키면 Fig. 2.1(a)는 Fig. 2.1(b)와 같이 1 자유도의 역학 모델로 변환시킬 수 있다. 이송체 중심(G) 및 구동점 (P)은 안내면 A 및 B 면의 중심선상에 있지 않는 것이 보통이기 때문에 Fig. 2.1(b)와 같이 A 및 B 면의 중심선과 이송체 중심(G) 사이의 거리를 a_1 로 나타내고, A 및 B 면의 중심선과 구동점(P) 사이의 거리를 a_2 로 나타내었다. 또한 절대 좌표계에서 이송체 변위를 x 로 하고, 구동점(D)의 변위를 x_d 로 나타내었다.

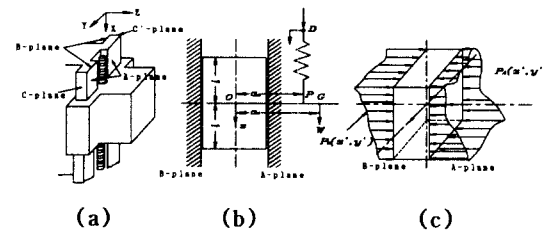


Fig. 2.1 Vertical feed system and 1 degree of freedom model

Fig. 2.1(c)는 안내면(guideway)의 압력 분포를 나타내는데, A 와 B 면의 면압분포를 $p_A(x', y')$, $p_B(x', y')$ 로 나타낸다면 A 와 B 면에서의 수직면 하중 N_A 와 N_B 는 식(2.1)과 식(2.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_A = \int_{-l}^l \int_{-d}^d p_A(x', y') dx' dy' \quad (2.1)$$

$$N_B = \int_{-l}^l \int_{-d}^d p_B(x', y') dx' dy' \quad (2.2)$$

Z방향은 힘의 평형에 의해 식(2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_A = N_B \quad (2.3)$$

또한 Y축 회전 모멘트의 균형에 의해 식(2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{-l}^l \int_{-d}^d \{ p_A(x', y') - p_B(x', y') \} \cdot x' dx' dy' = M_y \quad (2.4)$$

그러므로 모멘트 M_y 는 식(2.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_y = 2l \{ L_1 W - L_2 k(x - x_d) \} \quad (2.5)$$

여기서, $L_1 = \frac{a_1}{2l}, L_2 = \frac{a_2}{2l}$
 $(x - x_d)$: 구동 스프링 곡선

실제 안내면 거동에 있어서 면압 분포는 복잡하게 변화하지만 여기에서 문제를 간단히 하기 위해 Fig. 2.2와 같이 3가지의 경우에 있어서 면압은 M_y 의 절대치 $|M_y|$ 에 배렬하면 식(2.3), 식(2.4), 식(2.5)에 의해 M_y 와 평행한 p_A 와 p_B 를 결정하고 다음 식(2.1)과(2.2)을 이용한다면 N_A 와 N_B 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} N_A &= N_B \\ &= A | L_1 W - L_2 k(x - x_d) | + N_p \\ &= A | M_y | / 2l + N_p \end{aligned} \quad (2.6)$$

Fig. 2.2(a)에 있어서 C-C'면에 구동 면압은 Y축 회전 모멘트 M_y 에 영향을 주는 일정치 N_c 로 나타내면 이송체에 구동 수직면 하중의 합계 N 는 식(2.6)에 의하면 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = 2 \{ A | L_1 W - L_2 k(x - x_d) | + N_p + N_c \} \quad (2.7)$$

그러므로 이송체의 관성력은 구동력 자중 및 마찰력이 일치하게 되면 다음과 같은 운동 방정식을 나타낼 수 있다.

$$\frac{W}{g} \ddot{x} = -k(x - x_d) + W - 2 \mu_d \cdot \{ A | L_1 W - L_2 k(x - x_d) | + N_p + N_c \} \cdot \text{SINGN} \left(\frac{\dot{x}}{x} \right) \quad (2.8)$$

이상의 관계식은 안내면의 점성력은 무시한다.

또한 μ_d 는 미끄럼 중의 마찰계수를 나타내고,

$\text{SINGN} \left(\frac{\dot{x}}{x} \right)$ 에서 $\frac{\dot{x}}{x}$ 이 양이면 +1, 음이면 -1을 취하는 부호 계수이고, x_d 는 $x_d(0) + vt$ 로 할 수 있고, 여기서 v 는 구동속도, $x_d(0)$ 는 구동점 D의 초기변위이다.

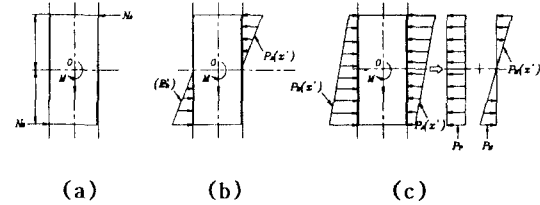


Fig. 2.2 Continuous of plane pressure

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 전반적인 실험장비는 수직형 머시닝 센터(Machining center)와 레이저 측정기(laser interferometer)가 사용되었다. 머시닝 센터의 사양은 Table 3.1에 나타내었으며, 레이저 측정기의 사양은 다음과 같다.(OPTODYNE, INC. 1180 Mahalo Place Compton, CA 90220:레이저 측정기)

Table 3.1 Specifications of machining center & servo moter

specifi-cation	Dimension & Illustration	specifi-cation	Dimension & Illustration	
Type	Vertical 3 axis machining center	Steady torque	4.87 kgf·m	
Model	Sirius-2 Fanuc korea. Co.	Rapid travel speed	X, Y, Z axis	30000 mm/min
Table size	760 × 430 mm	Feed speed	1~24000 mm/min	
Table length	X axis 560 mm	Servo moter	X axis	1.4 kW
	Y axis 410 mm		Y axis	1.4 kW
	Z axis 460 mm		Z axis	2.8 kW
Main shaft rpm	80~8000 rpm	Table movable load	400 kgf	

아래의 Fig. 3.1은 실험장치를 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 절삭가공시 가장 많이 활

용되는 머시닝센터 베드부의 중앙위치에 레이저 측정기의 반사경(reflector)을 올려놓고, 레이저 헤드를 머시닝센터 바깥에 고정시키고 백래쉬(backlash)보정을 위해 X축 한 방향으로 이송과 휴지(dwell time)를 3회 반복한 후 같은 방향의 축이송을 시키면서 스틱슬립을 측정했다.

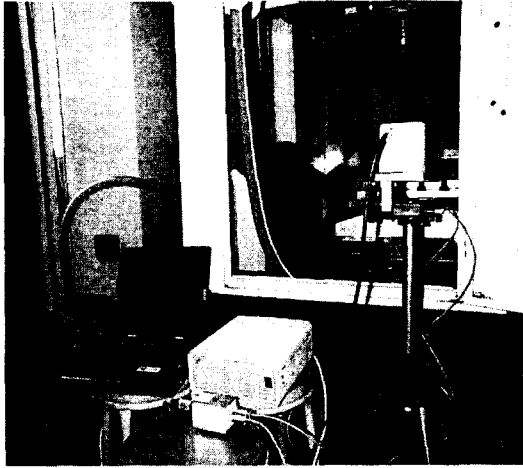
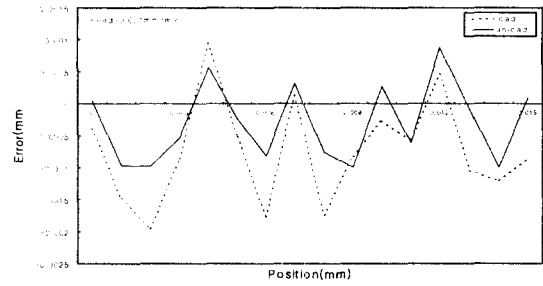


Fig. 3.1. The experimental setup

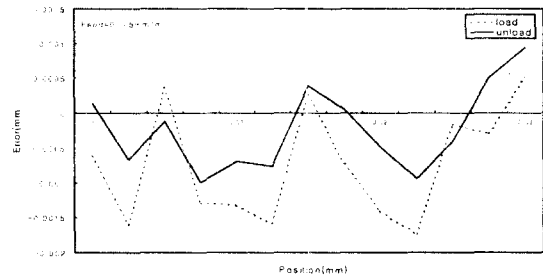
3. 2 실험결과

실제 가공시 공작물의 적재하중, 이송속도 등에 따라 가공정밀도나 이송모터의 토크 또는 스틱슬립 현상 등이 다르게 나타날 것이라고 사료된다. 따라서 본 논문에서의 이송조건은 베드에 100kg의 하중을 준 상태와 무부하 상태에서의 이송조건에 따라 스틱슬립을 측정하였다. 스틱슬립에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 존재하나, 그 중 가장 핵심적인 요소는 이송속도이다. Fig.3.2의 (a)~(d)는 부하와 무부하에 따른 이송속도를 0.001 mm/min부터 0.05 mm/min까지 변화시켰을 때의 스틱슬립의 효과를 나타내고 있다.

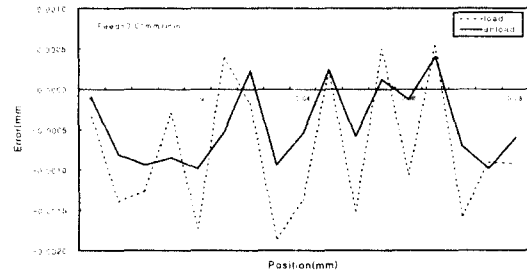
그림(a)에 나타난 바와 같이 이송속도가 낮은 영역일수록 스틱슬립의 진폭이 매우 크며, 부하상태일때가 무부하상태 보다 스틱(-오차값)현상이 두드러짐을 알 수 있다. 즉, 이것은 속도가 작으므로 정지 마찰력의 작용시간이 길어져 발생하는 현상이라 볼 수 있다. 이송속도가 증가할수록 정지 마찰력의 작용시간이 짧아지므로 스틱슬립의 효과는 Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 이송속도가 낮은영역일수록 스틱슬립의 진폭이 매우 크며, 부하상태일수록 무부하상태 보다 스틱(-오차값)현상이 두드러짐을 알 수 있다. 즉, 이것은 속도가 작으므로 정지 마찰력의 작용시간이 길어져 발생하는 현상이라



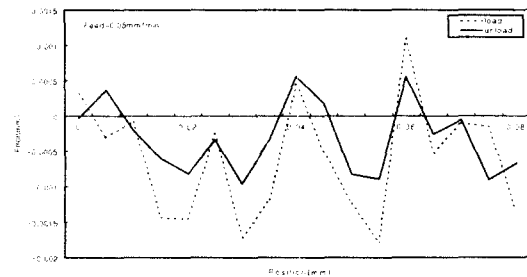
(a) Feed=0.001mm/min



(b) Feed=0.005mm/min



(c) Feed=0.01mm/min



(d) Feed=0.05mm/min

Fig. 3.2 Variation of stick-slip effect according to velocity

볼 수 있다. 이송속도가 증가할수록 정지 마찰력의 작용시간이 짧아지므로 스틱슬립의 효과는 감소한다. 이러한 효과는 이송속도가 상대적으로 가장 빠른 0.05mm/min 일 때 테이블의 이송운동이 저속에서보다 안정됨을 실험을 통해 잘 알 수 있다.

4. 결론

1. 실험용 머시닝센터는 안내면 및 볼나사와 너트 사이의 마찰로 인하여, 기계의 최소 이송속도나 이송거리에 따라서 움직임량 이상의 진폭을 가지는 스틱 슬립 현상을 보인다.
2. 동일조건에서 이송속도가 낮을수록 스틱슬립 현상이 크게 나타나고 이송속도 값이 높을수록 스틱슬립현상은 미세하게 나타남이 실험결과 확인되었다.
3. 실험에서 무부하시보다 100kg의 부하시에 더 큰 스틱(-오차값) 현상이 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. D.Karnopp, "Computer Simulation of Stick-slip Friction in Mechanism Dynamic Systems", Trans. ASME, J.Dyn. Syst. Meas. Contr. V100, pp100, 1985
2. Jih-Hua Chin, Chun-Chien Chen, "A Study of Stick-slip motion and its influence on the cutting process" , int. j. Mech. Sci, Vol.35, No.5, pp353-370, 1993
3. 주종남, "이송전류신호를 이용한 이송계의 마찰 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회 95년도 추계 학술대회 논문집, pp.249-253
- 4.Gwang-Nam Lee, Yoon-Young Kim
"Nonlinear rate-dependent stick-slip phenomena"
International journal of solids and structures
38(2001)1415-1431
5. Peter Vielsack,"stick-slip instability of decelerative sliding" International journal of Non- Linear Mechanics(2001)237-247