韓國精密工學會 '96年度 春季學術大會論文集 pp.641~645

본 연구는 1995년도 교육부학술연구비 (기계공학 : ME95-E-10)에 의하여 연구되었음

NC선반의 동적이송오차에 관한 연구

여 인 완(연세대학교 기계공학과 대학원)
박 철 우(연세대학교 기계공학과 대학원)
이 상 조(연세대학교 기계공학과)

ABSTRACT

Ball screws are used in the feeding system for transmission of driving force. The friction effect between bed and table , which can affect in accuracy in one dimension feeding and describe the dynamic feeding error , could be simplified as a specific model through experiments. The experiments for dynamic feeding errors were performed in the NC lathe with a ball screw. The errors in feeding were measured with respect to the variances of feed, spindle speed and motor current for feeding . A rotary encoder and a current sensor were installed with NC lathe.

Key Word : ball screw(볼나사), dynamic feed error(동적이송오차), NC lathe (수치제어선반)

1.서론

공작기계나 자동화기기에 위치결정시스템에 많이 사용되어지고 있는 이송시스템으로 볼스크류를 채용되는데, 볼스크류는 나사축과 너트사이에 볼을 게재시켜 운동마찰을 최소화한 것으로 리드 스크류에 비하여 구동효율이 높고 예압을 준 볼 스크류의 경우, 백래시를 감소시킬 수 있는 등, 볼스크류 자체의 고정밀 이송특성이외에 여러 가지 장점이 있다.

이렇게 높은 효율과 정밀도를 갖고 있는 볼스크류를 이송시스템에 사용한다고 하더라도 볼스크류 자체의 정밀도이외에 Fig.1과 같은 설계요소에는 많은 주변장치 및 기구들이 있어 이들 부품의 선정과 조립 등에 의한 이송오차가 발생할 수 있기 때문에 설계 및 제작시에 주위를 요한다. 이송오차에는 정적이송오차를 가지고 공작기계의 정밀도 판단기준으로 하고 있었다.[5] 그러나, 최근의 연구에 의하면, 테이블 이동시에 동적이송오차가 발생하고 있으며, 특히, 볼스크류 연삭과 같이 기계의 이송오차가 제품의 정밀도로 전사되는 경우, 기계의 동적이송오차가 심각한 문제가 된다는 연구가 있다.[3]

또한, 일반 선삭이나 연삭의 경우에도 가공중 발생하는 동적이송오차는 제품의 표면 형상, 거칠기에 악영향을 미칠 수있으므로 이에 대한 구체적인 연구가 필요한 상황이다.

특히, 동적이송오차의 주요원인을 베드와 테이블면의 접촉상태변화라고 판단하며, 접촉상태변화의 원인은 모터의 부하요인변동와 테이블의 중량에 의한 베드와 테이블면의 마찰현상, 테이블에 작용하는 수직하중의 변화가 이들 접촉상태의 변화를 야기시킨다고 판단하여 이들 원인을 규명하기 위하여 연구를 수행한다.

본 연구에서는 실험 대상인 NC선반의 이송시스템 스틱슬립현상을 각종 인자를 집약하여 이론적으로 모델링한다. 특히 모델링의 검증과 실제상황의 분석을 위하여 사용한 공작기계의 어미나사부에 로우터리 엔코더를 설치하여 가공시 시간에 따른 이송오차를 검출하고 구동모터의 입력에는 전류센서를 설치하여 동력변화의 상태를 검출하여, 이들 자료를 토대로 동적이송오차의 원인에 대하여 고찰한다.

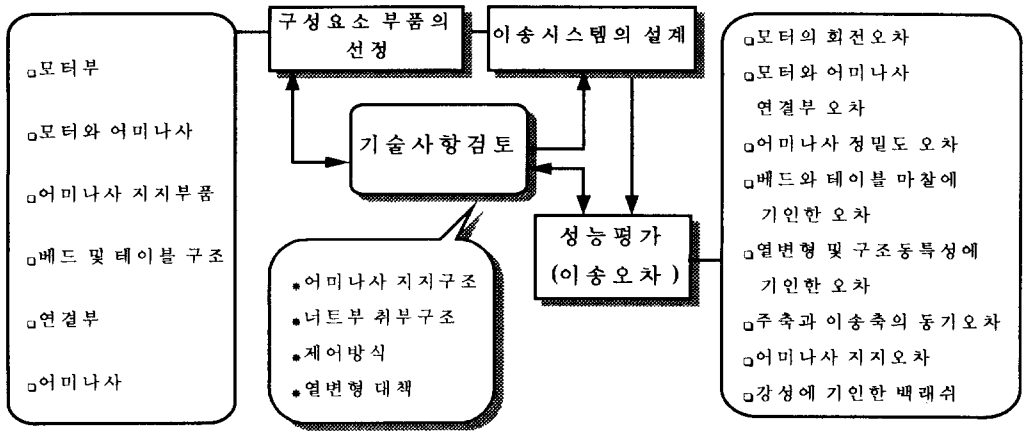

Fig.1 Feed System Components and Performance Evaluation

2.스틱슬립현상의 모델링

Fig.1은 이송시스템의 설계변수들과 성능평가사항을 도시한 것이다.

동압안내면의 경우 , 경계윤활영역에서 비교적 낮은 미끄럼 속도에서 이송 테이블이 움직일 때, 스틱-슬립이라 불리는 불규칙적인 운동이 자주 발생한다.[1] 이 현상은 Fig.2 Stribeck Curve의 음의 기울기와 관계가 있는데, 주기적인 정지-출발을 한다.

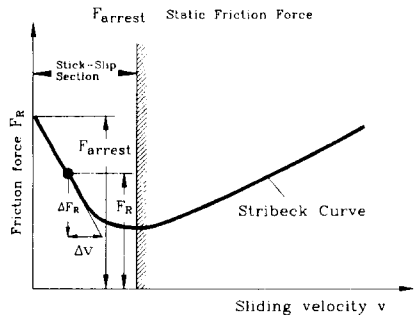

Fig.2 Stick-Slip section in the Stribeck Curve

Fig.3는 스틱-슬립현상을 수학적으로 모델링하기 위한 이송 테이블을 1차원으로 간략화한 것이다.

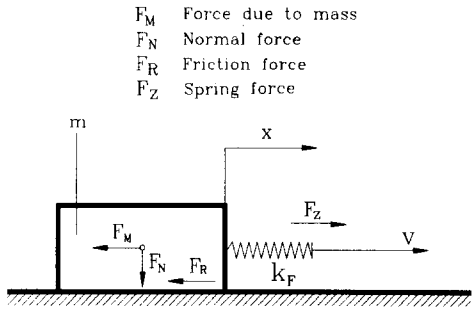

Fig3. Diagram of Stick-Slip Modelling

스프링 상수 k_F는 구동계의 요소, 즉 이송축, 이송부지지지강성, 너트부등 등의 등가 탄성계수를 의미한다. 일정한 속도 v로 슬라이더를 끌기 시작하면 탄성력 F_z가 정 마찰력과 같아 질때까지 증가한다. 이 구간은 물체 m이 움직이지 않는 스틱구간에 해당하며, 탄성력이 정 마찰력보다 커지는 순간, 슬라이더가 움직이게 되며

이 구간은 슬립구간에 해당한다. 스프링은 슬라이더가 움직이는 동안 상대적으로 줄어들어 그 만큼 탄성력 F_x가 작아져 Slider가 정지하게 된다. 다시 슬라이더가 움직일 때까지 스프링은 늘어나고 이 구간은 스틱구간이 된다. 이 같은 현상을 반복하여 일어나는 것을 스틱-슬립현상이라 한다.

이를 수식으로 표현하면,

$$m\ddot{x} + F_R + k_F x = k_F vt$$

와 같고 구동계의 damping효과를 무시한다면 이 계는 오직 마찰력에 의해서 감쇠된다. 마찰력 F_R은 Fig.2에 의하여

$$F_R \approx F_{arrest} + c_1 v$$

이고, c_1은 Stribeck-Curve의 기울기로 $\frac{\Delta F_R}{\Delta \dot{x}}$가 된다. Stribeck Curve의 Stick-Slip영역에 해당하는 기울기이므로 미끄럼 속도가 증가하면 계의 감쇠가 감소함을 의미한다. 결국 경계윤활영역(Stick-Slip section)에서 운동방정식은

$$m\ddot{x} - c_1\dot{x} + K_F x = K_F vt - F_{arrest}$$

가 된다. 또한 미끄럼 속도가 Critical Velocity (Stribeck Curve의 기울기가 영)을 지나면 유체 마찰영역이 되어 스틱-슬립현상이 일어나지 않는다. Fig4.은 모의실험 결과의 예를 그린 것이다. 미끄럼 속도가 일정하므로 일정한 스틱-슬립시간을 가진 결과를 보여준다. 시간에 대한 변위의 값을 그린 것으로 주기적인 계단식 이송오차가 나타난다.

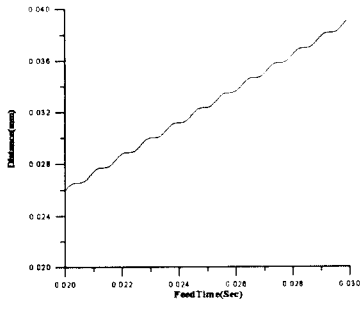

Fig.4 Simulation Result

3. 실험방법

3.1 실험장치

Fig5는 본 연구에서 사용한 NC 선반의 이송계와 로터리 엔코더, 카운터, PC를 개략적으로 그린 것이다. 실험에서 사용된 실험 장치의 사양은 표1과 같다.

표1. 실험장치 사양

(주) 대우 중공업 PAN 20 CNC LATHE	
z-axis D.C Servo motor	1.1 (Kw)
Spindle D.C motor	15 (Kw)
z-axis LBU	0.001 (mm/pulse)
Feedrate Command	1 ~ 4000 (mm/min)
Ball Screw Pitch	8 (mm)
SANSEI ELECTRIC CORP. Rotary Encoder	
10000 (pulse/rev), 170 (kHz)	
LEM current transducer	
Nominal Current	25 (A)
Response Time at 90% Ip	≥ 1μs

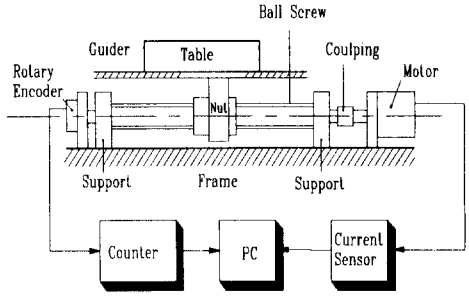

Fig5. Experimental Setup

로터리 엔코더에서 나온 신호는 32 bit 카운터와 인터페이스 카드를 이용하여 PC로 읽어 들이다. 전류 센서로부터의 신호는 PC-LAB 718 AD Board를 이용하여 처리하였다. 그리고 데이터 저장 시간을 단축하기위하여 신호는 PC RAM 메모리로 우선 저장하고 측정이 끝난 후에 Hard Disk에 저장하는 방법을 취했다.

3.2 실험 방법

NC 선반으로 z축과 공작물의 회전속도를 제어하고 Feedrate (mm/min)를 변화시키며 이송실험을 행하고 실제 절삭시에는 feedrate와 주축회전속도 그리고 절삭깊이를 변화시키며 실험을 행한다. 데이터는 이송시스템으로 사용된 볼스크류의 피치인 8 (mm)를 넘는 이송거리동안 받았다. 표2는 실험조건이다.

표2. 실험 조건

이송실험	
이송량 변화	60,1200(mm/min)
절삭실험	
feedrate	200(mm/min)
주축회전속도	200, 500, 800(rpm)
절삭깊이변화	0.5, 0.8(mm)

4.실험결과

NC선반의 지령값을 이론값으로 하고 엔코더에서 나온 신호를 실험값으로 하여 이송오차를 계산하였다.

이송오차 : 실험값-이론값 (mm)

실험값: $\frac{number\ of\ pulse}{10000} * 8$

이론값: $\frac{feed(mm/\min)}{60} * time(\sec)$

Fig 6.7은 이송량의 변화에 대한 시간, 변위그래프이다. 실험 데이터중 이송량의 차이가 큰 60, 1200 (mm/min)에 대해서 살펴보면 이송량의 변화에 대해 엔코더의 신호는 큰 차이가 없는 것을 알 수있다. Fig 8은 이송오차로 나타내는 것으로 각각 이송오차가 시간에 대해 주기성을 띠고 있는 것을 알 수있다. 60 (mm/min)의 경우는 순간적으로 이송오차가 변하나 1200 (mm/min)인 경우는 이송오차가 변하는 큰 주기속에 오차가 가감하는 작은 주기를 포함하고 있다.

Fig. 9은 절삭시 주축회전속도의 변화에 따른 이송오차의 결과를 보여준다. Fig.9는 이송량이 1200 (mm/min), 절삭깊이 0.5 (mm)로 일정하고 주축회전속도가 200, 500, 800 (rpm)일때의 이송오차를 그린 것이다. 주축회

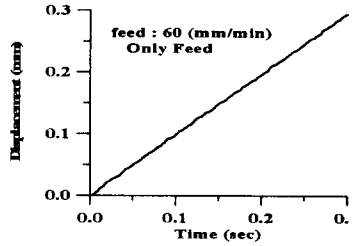

Fig.6 feed 60 (mm/min) Time-Displacement

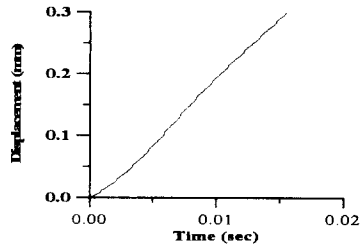

Fig. 7 feed 1200 (mm/min) Time-Displacement

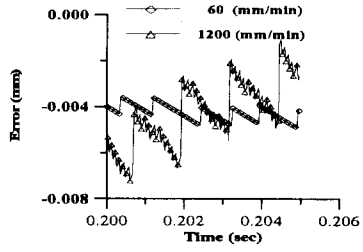

Fig.8 Comparison with Time-Error with respect to feed

전속도가 증가함에 따라 이송오차가 뚜렷한 주기성을 띠고 있음을 알 수있다. 200 rpm에서는 이송오차의 경향을 전혀 알 수없고 주축회전속도가 증가하면 주기성을 띠는 것을 알 수있다. 이송량은 일정하지만 이송만을 행한 경우와 마찬가지로 주축회전속도가 증가하면 이송오차의 큰 주기속에 작은 주기가 포함되어 나타난다. 주축회전속도가 작을 경우 한 주기에 대한 이송오차 진폭이 작고, 주축회전속도가 증가하면 한 주기당 이송오차의 진폭이 커짐을 알 수있다. 이는 주축회전속도의 변

동에 따른 절삭력의 변화가 이송오차에 영향을 줌을 알 수 있다. 즉 같은 절삭시간동안 주축회전속도에 비례하여 절삭력의 변동이 규칙적임을 알 수있다.

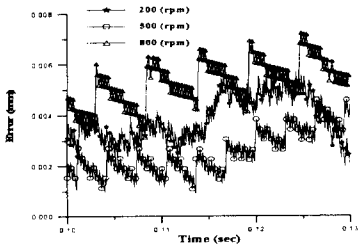

Fig.9 Comparison with feed error varying rpm in the same feedrate 1200 (mm/min)

Fig.10은 주축회전속도가 500 (rpm)이고 절삭깊이가 0.8 (mm), 이송량이 200 (mm/min)인 경우에 대하여 이송오차와 이송모터의 전류신호를 같은 절삭시간에 대해 그린 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이송모터가 DC servo motor인데, 모터를 구동하는 특성으로서 , 삼각파형이 나오는 것은 펄스로 DC motor의 이송오차보상 전류로 인한 것으로 판단된다. 펄스형태도 일정한 크기를 갖는 것이 아니라 Sin파 형태로 나오는데, 이는 NC가 가지고 있는 피드백제어시스템에서 이송오차를 측정한 것이라 볼 수 있다. 같은 시간대비 이송모터전류값이 커지면 이송오차의 진폭도 커지는 것을 알 수 있다. 이송모터의 전류신호와 이송오차의 관계가 있음을 알 수 있다.

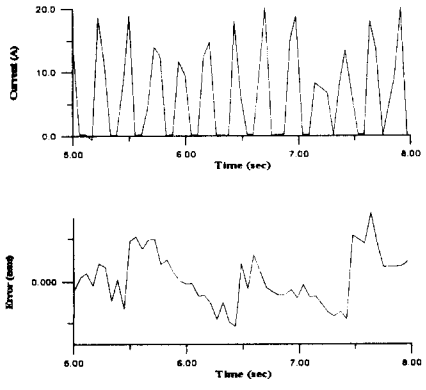

Fig.10 Comparison with motor current and feed error

전체적인 실험의 결과로부터 판단할 때, 이송시스템의 동적이송오차는 존재하지만 이것이 베드면과 테이블의 순수한 스틱-슬립현상이라 보기 어려우며 외부적인 영향이 테이블의 수직하중에 영향을 준다고 생각되며 앞으로 스틱-슬립모델에 외부적인 영향이 있을 경우를 고려한 모델링이 필요하다.

5.결론

이송계를 1차원으로 모델링하여 스틱-슬립현상에 대한 모의실험을 행하였고 NC선반의 이송축에 로터리 엔코더를 장착하여 이송축모터제어부의 전류신호를 측정하고 이송량과 주축회전속도를 바꾸며 실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일정한 미끄럼 속도로 물체가 움직일때에 특히 저속에서의 스틱-슬립현상을 모의 실험을 통해 시간대비 변위 선도를 통해 알 수있다.
2. 이송량를 변화시키면서 로터리 엔코더를 통해 변위를 살펴보았다. 일정 속도에서는 이송계의 변위는 선형적임을 알 수있고, 이송량이 커지면 이송오차가 뚜렷한 주기성을 띰을 알 수있다.
3. 실제 절삭시 일정한 이송량과 절삭깊이에서 주축회전속도를 변화시키며 실험한 결과에서 이송오차를 살펴보면 주축회전수가 증가할수록 이송오차에 주기성이 뚜렷해지는데, 이는 주축회전수의 증가가 절삭력의 변동을 일으켜 이것이 이송정밀도에 영향을 끼치는 것이라 할 수있다.
4. 절삭시에 이송오차와 이송계를 구동시키는 이송모터의 전류를 측정한 결과에서는 모터에 들어가는 전류의 변화가 이송오차의 변화와 관계가 있음을 알 수있다.

참고문헌

1. Manfred Weck, Handbook of Machine Tools, pp103-106, Vol.2, Wiley, 1984.
2. Dean Karnopp, 1985, " Computer Simulation of Stick-Slip Friction in Mechanical Dynamic System " , J.ASME, pp 100- 103 , Vol.107.
3. 이 상조 외 2명, "나사연삭기 회전전달오차 및 테이블 이송오차평가에 관한 연구",한국정밀공학회, 제13권 1호, 1996.
4. S.Kato, 1974, " Stick-Slip Motion of Tool Slideway ", Journal of Engineering for Industry, pp557-566.
5. JIS, 공작기계, B 6202-1986 .