

볼스크류의 축-비틀림 복합강성을 고려한 이송계 모델링

이찬홍*, 박천홍, 노승국, 이후상(한국기계연구원)

Modeling of Feed Drive System Considering Combined Stiffness with Longitudinal And Twist Direction

Chan Hong Lee*, Chun Hong Park, Seung Kook Ro, Husang Lee (KIMM)

ABSTRACT

In machine tools, the stiffness of feed drive system is very important for high speed and accurate operation. The ball screw driven feed system has small friction, so the longitudinal and twist stiffness are connected directly and affected by each other. As the longitudinal and twist stiffness are participated in total stiffness of feeding system by about ratio of 4:1, the combined stiffness is necessary to compute when stiffness of feed system is estimated. In this paper, calculation of this combined stiffness is derived and applied for an actual ballscrew feed drive system. The static stiffness and 1st natural frequency of the feed system is measured, and it is proved the difference between estimation and experiment result is less than 6%.

Key Words : Feed Drive System (이송계), Ballscrew (볼스크류), longitudinal and twist Stiffness (축과 비틀림 강성), Natural Frequency(고유진동수)

1. 서론

공작기계의 이송계는 절삭력을 Bed 로 전달하고 기계동력을 절삭점으로 역전달하는 중요한 매개역할을 한다. 이러한 과정에서 기계전체의 운동정밀도와 위치정밀도를 좌우하는 중요한 요소가 되었다. 가공시 발생하는 절삭력은 기계구조물을 따라 전달되면서 가장 취약한 곳에서 축변위와 각변위를 야기시키는데, 주로 두개의 금속이 상대운동을 일으키는 부위, 즉 이송계의 슬롯면이나 LM Guide 에서 많은 변위가 생긴다. 이 변위는 이송테이블상의 좌우, 전후단에서 값의 차이가 생기기 때문에 각변위가 발생해 이송시 운동정밀도(진직도)에 영향을 주게 된다. 이와 함께 가공상 안내면의 기하학적 진직도가 추가되어 예상치 못한 운동정밀도가 나타난다. 한편 볼스크류를 따라 전달되던 절삭력도 다른 부위보다 강성이 약한 볼너트의 베어링 접촉부위와 볼스크류 축에서 축방향 변위를 일으켜 기계의 위치정밀도나 반복정밀도에 영향을 주게 된다. 이와 같이 이송계는 많은 상대운동을 하는 부품이 조합되어 기하학적으로 복잡한 오차운동을 하는 동시에 정강성적으로도 타부위에 비해 취약한 상태에 있다.

여기서 가공상 기하학적 오차문제는 안내면의 제작상 주위를 기울이면 개선의 여지를 많이 가지게 되지만, 기계의 요구 운동성능에 비해 이송계의 정강성이 약하게 설계된 것은 초기설계 단계에서 개선하지 않으면 차후 이송계 제어변수를 설정할 때 Overshoot 와 잔류진동 때문에 어려움이 생기고, 또한 높은 감가속과 고속운전 성능을 발휘할 수 없게 된다. 현재 공작기계의 추세중 고강성화와 고가감속 특성화는 모두 이송계에 큰 부담을 주는 결과가 되어 이송계에서 많은 변위가 발생하지 않도록 강하게 설계되어야 하고, 이에 따른 설계강성도 정확히 예측할 필요가 있다. 지금까지는 이송계의 강성을 계산할 때 축방향 강성과 비틀림 방향 강성을 각각 계산하여 이중에 작은 강성에 설계의 기준을 맞추어 각종 이송계 운동특성을 계산하였다. 그러나 본 연구결과에 따르면 볼스크류 이송계에서는 축방향과 비틀림 방향의 강성은 서로 변환이 가능하고 전체강성에 미치는 영향은 4:1 정도가 될 만큼 각 방향의 역할이 커서, 반드시 이송계의 강성을 예측할 때는 양방향을 고려한 복합강성의 계산이 필요함을 보여주었다.

2. 축과 비틀림 방향 강성의 상호변환

과거 수동식 공작기계에 사용하였던 리드 스크류에서는 마찰($\mu=0.1 \sim 0.2$)이 많아 회전방향으로 자체 locking 이 되어서 축과 비틀림방향을 분리하여 계산해도 별 문제가 없었으나, 현재 대부분의 이송계에 적용되는 볼스크류와 같이 마찰($\mu=0.002 \sim 0.004$)이 과거에 비해서 1/50 로 작아진 상황에서는 기계효율이 95 ~ 98%에 달해서 축변위와 비틀림 각변위가 거의 손실이 없이 상호변환이 가능하여 양 방향을 따로 분리해서 생각할 수 없게 되었다. 예를 들어 볼스크류가 축방향의 강제라고 가정하면 축방향으로 볼스크류를 강하게 밀 때 비틀림 방향으로 토크 T 가 작용하여 비틀림 각변위가 생기고 이로 인해 축방향의 미소변위 x 로 다시 나타나게 된다. 역으로 볼스크류가 비틀림 방향의 강제라고 가정하면 모터에서 강한 토크를 볼스크류에 가할 때 비틀림은 안생기고 축방향으로 힘 F 가 작용하여 축변위가 생기고 이로 인해 비틀림 방향의 미소 각변위가 생긴다. 이와 같은 상호변환 과정을 수학 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$P = F \cdot V = T \cdot \omega \quad (1)$$

볼스크류에 가한 모터의 Power 는 축방향과 비틀림 방향으로 동시에 작용되므로 식(1)과 같이 표시할 수 있고, 이 관계에서 T 의 식으로 정리하고 축방향의 미소변위 x 와 축강성 k_x 로 표시하면 식(2)가 된다.

$$T = \frac{F \cdot L}{2 \cdot \pi} = \frac{k_x \cdot x \cdot L}{2 \cdot \pi} \quad (2)$$

여기서 미소 축변위 x 와 미소 비틀림 각변위 ϕ 의 관계는 볼스크류의 리드 L 을 매개로 하여 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$x = \frac{L \cdot \phi}{2 \cdot \pi} \quad (3)$$

그리고 모터 토크 T 에 대해서 비틀림 강성 k_T 와 각변위의 식으로 표시하면 식(4)가 된다.

$$T = k_T \cdot \phi \quad (4)$$

식(2)와 (4)를 비틀림 강성으로 정리하면 식(5)가 된다.

$$k_T = k_x \cdot \left(\frac{L}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (5)$$

식(5)는 축방향과 비틀림 방향의 강성을 상호 자유롭게 변환시킬수 있는 식이다.

3. 축-비틀림 강성의 복합화 및 실예

이송계의 총합강성을 축방향 위주로 통합하려 하면, 우선 축방향으로 볼너트의 축방향 강성 k_N 과 볼스크류의 축방향 강성 k_{BS} , 지지베어링의 축강성 k_{BG} 을 규명해야 하고, 그리고 비틀림 방향으로는 볼스크류의 비틀림 방향 강성 $k_{BS,T}$, 동력전달 커플링의 비틀림 강성 $k_{COUP,T}$, 모터의 비틀림강성 $k_{M,T}$ 을 규명해야 한다. 이렇게 얻어진 강성은 각각 다음식으로 축방향 통합강성 식(6), 비틀림방향 통합강성 식(7)으로 간략하게 표시되고

$$\frac{1}{k_{XS}} = \frac{1}{k_N} + \frac{1}{k_{BS}} + \frac{1}{k_{BG}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{k_{TS}} = \frac{1}{k_{BS,T}} + \frac{1}{k_{COUP,T}} + \frac{1}{k_{M,T}} \quad (7)$$

k_{TS} 는 식(5)에 의해서 축방향으로 변환가능하다. 이 변환값을 $k_{TS,X}$ 라고 하면 축방향 위주 통합식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{k_{TOTAL,X}} = \frac{1}{k_{XS}} + \frac{1}{k_{TS,X}} \quad (8)$$

여기서 $k_{TOTAL,X}$ 은 이송계의 축방향 위주 복합강성이라 할 수 있다. 물론 이값도 식(5)에 의해 비틀림방향 위주 복합강성으로 변환할 수 있다.

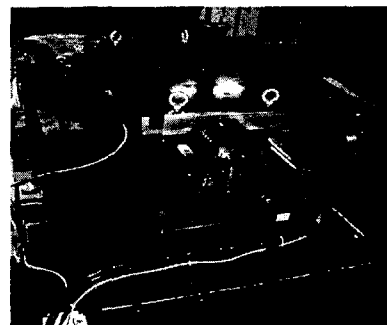


Fig. 1 Photograph of ballscrew feeding system

실예로 Fig. 1 과 같은 볼스크류 이송계에서 복합강성을 규명하였다. 실험 이송계는 한쪽의 지지

가 3 열 앵글러콘택트 볼베어링 고정지지이고 다른 쪽은 복열의 앵글러콘택트 볼베어링 미끄럼 지지로 되어있다. 볼너트는 더블 예압형이고, 모터의 동력을 전달하는 커플링은 Steel Bellows 타입으로서 편심보상이 가능하고 비틀림 강성이 비교적 크다.

Table 1. Value of Input Design Parameter

Design Parameter	Value
Diameter of Ballscrew	40 mm
Lead of Ballscrew	20 mm
Effective Length of Ballscrew for Force	564 mm
Effective Length of Ballscrew for Torque	670 mm
Axial Stiffness of Ballnut	1,499 N/ μ m
Axial Stiffness of fixed Ball Bearing	780 N/ μ m
Mass of Table	134 kg

이송계의 주요 부품에 대한 설계변수의 값은 Catalog 와 기술문헌에서 얻었고 볼스크류의 축, 비틀림 방향 강성값은 계산에 의해 얻었다.

실험대상 이송계의 볼스크류 축강성 k_{BS} 을 계산한 결과 468 N/ μ m 가 나왔고 축방향만의 통합강성 k_{XS} 는 244.7 N/ μ m 로 계산되었다. 여기서 통합강성에 볼스크류, 볼너트, 지지베어링이 각각 기여한 비율을 분석해보면 Fig. 2 와 같다. 비율이 클수록 강성이 약한 것을 의미한다.

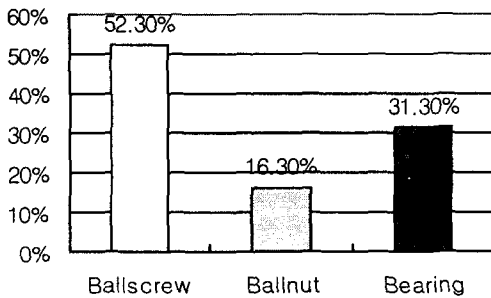


Fig. 2 Participation ratio of longitudinal stiffness

Fig. 2 에서 보는 바와 같이 반이상의 강성 취약부가 볼스크류이므로 강성을 보강해야 한다면 이곳을 개선해야하고 다음으로 지지베어링을 보강해야 한다.

한편 볼스크류의 비틀림 강성 $k_{TS,T}$ 를 계산한 결과 31134.5 Nm/rad 가 나왔고 비틀림 방향 통합강성 k_{TS} 는 11982.4 Nm/rad 로 계산되었다. 여기서 통합강성에 볼스크류, 커플링, 모터가 각각 기여한 비율을 분석해보면 Fig. 3 과 같다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 비틀림 방향에서는 커플링이 우선 개선대상이 되고 비슷한 수준으로 볼스크류의 개선이 필

요하다. 그러나 모터의 비틀림량은 비교적 작은 것을 알 수 있다.

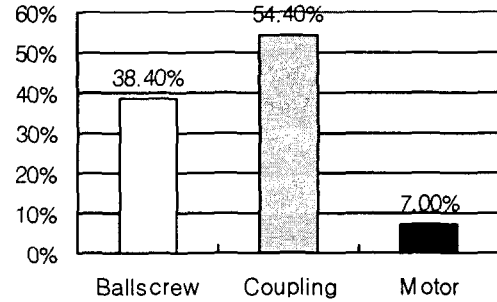


Fig. 3 Participation ratio of twist stiffness

이송계의 축방향위주 복합강성 $k_{TOTAL,X}$ 를 계산해보면 202.7 N/ μ m 가 나오고, 이것을 비틀림위주 복합강성 $k_{TOTAL,T}$ 로 표시하면 2054.3 Nm/rad 가 된다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 복합강성의 83%가 축방향에 기인하므로 이송계의 강성을 개선하기 위해서는 우선적으로 축방향 취약부를 개선해야함을 알 수 있다. 또한 과거에 고려조차도 하지 않았던 비틀림 방향의 강성이 전체 이송계 강성에 기여하는 비율이 17%정도 되어서 정밀한 이송계 모델링과 제어를 위해서는 간과해서는 안될 부분임을 알 수 있다.

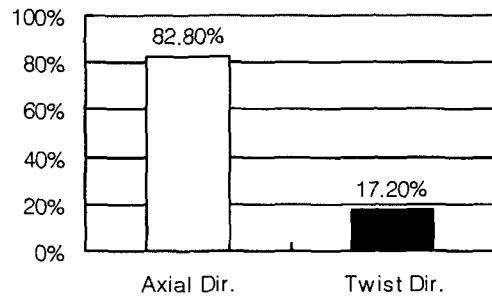


Fig. 4 The combined stiffness of feed system

4. 볼스크류 이송계의 정강성 및 고유진동수 측정

제안된 복합강성의 타당성을 검증하기 위해서 모터로부터 볼너트가 1.1m 의 위치에 정지시키고 모터부의 전원을 차단시켰다. 이렇게 함으로서 모터부에 Brake 가 작동된다. Fig. 5 에는 실험 이송계의 정강성을 측정하는 모습을 나타낸 것으로서 모터에 근접한 부위에서는 축변위가 작아 실험오차가 많으므로 모터에서 1.1m 위치에서 실험을 하였다. 또한 같

은 위치에서 Impulse Hammer 로 고유진동수를 측정하였다.

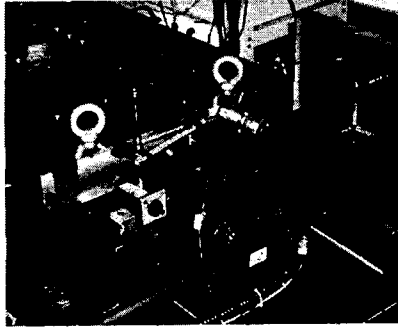


Fig. 5 Measuring setup for static stiffness

Fig. 6 에는 이송계의 복합강성을 측정하기 위해 3 번의 반복실험을 실시하였고 1 차 직선 Curve fitting 을 하였다. 축방향 위주 복합강성은 191 N/μm 로서 계산치 202.7 N/μm 와 6.1%오차를 보이는 근접한 결과를 얻었다. 오차의 원인으로서는 안내면에서의 마찰이 계산상에서는 고려가 되지 않았으므로 마찰이 예상한 것보다 큰 것으로 생각된다.

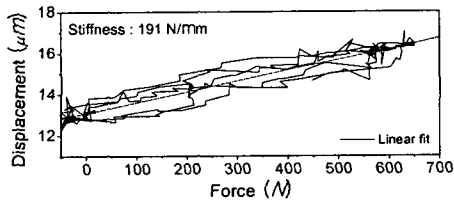


Fig. 6 Measured combined stiffness (static)

이송계의 동특성 측정결과는 Fig. 7 에 나타내었다. 그림에서 1 차 고유진동수에 해당하는 Peak 치는 185Hz 로서 계산치 195.7Hz 와 오차가 5.8%정도 밖에 되지않는 근접한 결과라 할 수 있다.

이와 같이 정강성과 동특성 측정을 통해 복합강성의 타당성을 입증할 수 있었고, 볼스크류 이송계의 모델링과 고속제어의 정밀도 향상, 그리고 감속 한계 예측에 기여를 하리라 생각한다.

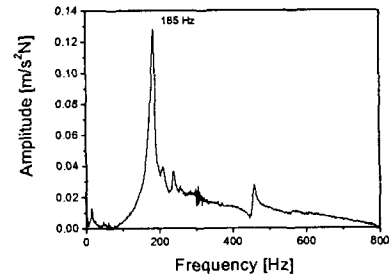


Fig. 7 Frequency response of feeding system

4. 결론

볼스크류 이송계에서는 운동 마찰이 적어 축방향과 비틀림 방향의 강성이 서로 직렬로 연결되면서 영향을 미치고 상호변환이 가능하다. 전체 이송계의 강성에 미치는 영향은 축과 비틀림 방향 강성이 4:1 정도가 되서, 반듯이 이송계의 강성을 예측할 때는 복합강성의 계산이 필요함을 나타냈다.

1. 볼스크류 이송계에서는 레이스면의 마찰이 리드스크류의 1/50 밖에 되지 않아 축방향 변위와 비틀림방향 각변위가 서로 변환이 가능해서, 축강성과 비틀림 강성이 직렬로 연결되는 복합강성 모델이 되어야 한다.

2. 축방향 강성에서는 일반적으로 볼스크류가 가장 취약하고, 비틀림 방향 강성에서는 동력전달용 Coupling 이 취약하다.

3. 일반 공작기계 이송계는 복합강성 관점에서 축방향 강성이 주된 취약점으로 나타나고, 축방향 강성은 비틀림 강성보다 4 배 정도 약하다.

4. 복합강성의 타당성을 검증하기 위해서 실험을 한 결과 정강성과 고유진동수에서 계산치와 측정치가 6%오차내에 있을 정도로 잘 일치함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, 1984
2. Mayr, "Smartflex", Catalog, p.932.01gb, 1999.
3. FANUC LTD, "Fanuc AC Servo Motor Manual", B-65142/01,1994.
4. 大塚二郎, "Present and Future Technology of Ultraprecision Positioning", 일본정밀공학회 초정밀위치결정 전문위원회, 2004.
5. Christian Schmidt, "Bewegungswandler und Lagerregelungsverfahren fuer luftgelagerte Hochpraezisions-Vorschubsysteme", VDI Nr.813, 2000.