

이송모터 전류 신호를 이용한 공작기계 이송계의 기울어짐 각도 추정에 관한 연구

정영훈*(포항공대 기계공학과), 민병권(연세대 기계공학부), 조동우(포항공대 기계공학과)

Estimation of Feed Drive Inclination Angle Using Feed Motor Current

Y. H. Jeong* (Dept. of Mech. Eng., POSTECH), B.-K. Min (School of Mech. Eng., Yonsei Univ.),
D.-W. Cho (Dept. of Mech. Eng., POSTECH)

ABSTRACT

The feed drive inclination significantly influences product quality, machine tool accuracy and life time. However, the accurate measurement of the inclination needs the skilled engineers and the accurate leveling instruments such as spirits or electric levels. In this study a novel methodology for the estimation of inclination angle of machine tool feed drive is proposed. The proposed methodology utilizes the motor current signals and a new mathematical model of machine tool feed drive considering inclination. The experiment results showed that the proposed method successfully estimates the inclination angle, as well as newly proposed model also enhances the accuracy of the machine tool feed drive model by introducing the inclination effects.

Key Words : Machine tool (공작기계), Motor current (모터 전류), Feed drive simulation model (이송계 모델), Inclination angle (기울어짐 각도)

1. 서론

공작기계의 고정밀화는 제어기술, 운동부의 정밀도, 구조물 기하 오차 등 다양한 요인에 영향을 받는다. 이러한 공작기계의 고정밀화에 영향을 미칠 수 있는 요인의 하나인 이송계의 기울어짐은 공작기계 구조물의 처짐을 유발시켜 기하 오차를 일으킬 수 있으며, 운동부에 비정상적인 하중 분포를 일으켜 운동부 마모의 진행을 가속시킨다[1].

기존의 이송계의 기울어짐의 측정은 주로 수준계(spirit)나 전자식 수준계(electronic level)를 이용하여 왔다[2]. 그러나 일반적인 수준계는 각도를 수치로 제시하기 힘들고, 전자 수준계는 고가의 장비로 사용에 제한이 있다. 또한 이러한 수준계는 각 방향에 대한 기울기를 알기 위해 이송계 테이블 위에 위치시키는데 상당한 경험적 기술과 주의를 요구한다. 따라서 기존의 이송계의 기울어짐 측정 방식은 숙련된 기술자와 고가의 장비를 필요로 한다. 또한 앞으로의 가공 시스템에 있어서 다양한 기능의 자동화를 만족시키기 힘들다는 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 이와 같은 기존의 기울어짐 각도 측정기술의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 기

울어짐 각도 측정 기술을 제안하였다. 이 기술은 이송계의 기울어짐에 의해 중력 방향 하중이 이송 방향의 운동에 영향을 미치게 되는 점을 이용하는 것으로서, 전류로부터 이 영향을 측정하고 이송계 모델로부터 측정된 결과를 만족하는 기울어짐 각도를 추정하는 것을 주요 내용으로 하고 있다.

이를 위해 이송모터 전류와 이송계의 기울어짐 각도 간의 상관 관계를 수학적으로 규명하였으며, 기울어짐 각도의 변정이 용이한 소형 태핑 센터를 이용한 실험을 통해 검증하였다. 그리고 소형의 상용 머시닝 센터에 제안된 기술을 적용하여 3% 이내의 추정 오차를 가지고 이송계의 기울어짐 각도를 추정하는 것이 가능함을 보였다. 또한 이송계의 기울어짐이 고려된 이송계의 동적 해석 모델을 구성하였으며, 이로부터 다양한 이송속도 조건에서 정확한 이송 모터 전류의 예측이 가능함을 보였다.

2. 수학적 모델링

2.1 이송계 모델링

일반적으로 공작기계의 이송 모터에는 AC 서보 모터가 이용되며, 식 (1), (2), (3)과 같이 잘 알려

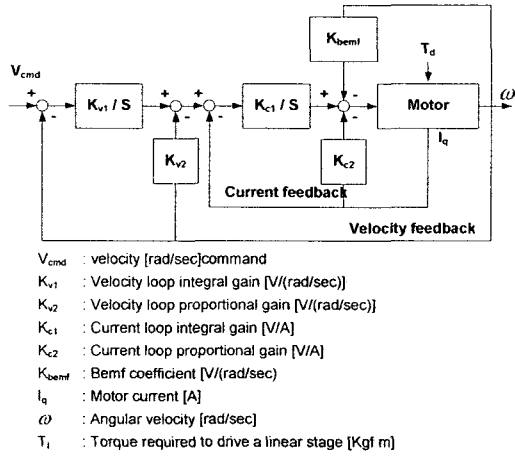


Fig. 1 Block diagram of motor drive (FANUC) including velocity and torque control modes

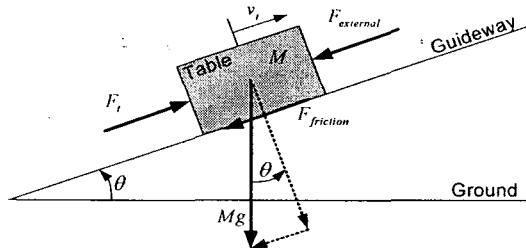


Fig. 2 Simplified model of the inclined table and guideway

진 등가의 DC 모터 모델을 이용하여 모델링 할 수 있다.

$$e_i = i_q R + L \frac{di_q}{dt} + K_v \omega_m \quad (1)$$

$$T_m = K_t i_q \quad (2)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + T_l = T_m \quad (3)$$

여기서 e_i , i_q , ω_m , T_m , T_l 는 각각 모터의 아마추어 회로의 전압(V), 전류(A), 모터의 각속도 (rad/sec) 및 구동 토크(N톳), 그리고 직선 이송기구를 구동 시키는데 요구되는 토크(N톳)이다. 그리고 L , R , K_v , K_t , T_l , J_m 는 각각 모터의 인덕턴스(V톳c/A), 저항(Ohm), 역기전력 계수 (V톳c/rad), 토크 상수 (N톳/A), 모터의 관성 모우멘트(Kg톳²)이다.

모터 드라이브는 일반적으로 모터의 전류와 속도루프를 모두 제어한다. 본 연구에서 사용된 공작 기계의 모터 드라이브는 FANUC사의 제품으로서 Fig.1과 같은 구조로 모델링 될 수 있다.

모터 및 볼스크류를 주요 부품으로 하는 일반적인 직선 이송 스테이지는 모터, 커플링(coupling), 볼스크류(ball screw), 안내면(guideway), 그리고 테이블(table)로 구성된다. 그러나 본 연구에서는 커플링에 대해서 관성 모우멘트만을 가지는 부품으로 가정하였으므로 식 (4)와 같이 모델링 할 수 있다.

$$T_l = J_c \frac{d\omega_m}{dt} + T_{lc} \quad (4)$$

여기서 J_c 와 T_{lc} 는 각각 커플링의 관성 모우멘트와 볼스크류를 회전시키는데 요구되는 토크 (N톳)이다.

볼스크류에 예압이 가해져 사용될 경우, 예압에 의해 발생하는 토크는 식 (5)와 같으며 쿨롱 마찰과 유사한 특성을 가지게 된다.

$$T_p = 0.05(\tan \beta)^{-0.5} \frac{F_p P}{2\pi} \quad (5)$$

여기서 T_p , β , P , F_p 는 각각 예압에 의한 토크 (N톳), 볼스크류의 리드각(rad), 피치(m), 예압력(N)이다.

대부분의 볼스크류 업체는 마찰계수 대신 기계적 효율을 제공하고 있다. 기계적 효율에 의해 볼스크류의 축에서의 토크와 너트에서의 이송방향 힘간의 관계는 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_t = \frac{P}{2\pi\eta} F_t \quad (6)$$

여기서 F_t , η , T_t 는 각각 너트에 주어진 축방향 힘 (N), 볼스크류의 기계적 효율(-), 볼스크류 축방향의 토크(N톳)이다. 따라서 볼스크류에 예압이 가해져 있고 테이블에서 축방향 힘이 주어졌을 때, 볼스크류가 회전하기 위해서는 식 (7)과 같은 토크가 필요하다.

$$T_b = J_b \frac{d\omega_m}{dt} + T_p + T_t \quad (7)$$

여기서 J_b 는 볼스크류 관성 모우멘트(Kg톳²)이다.

공작기계의 직선 이송 스테이지에 장착되는 테이블과 안내면은 이송계의 기울어짐을 고려하여 Fig. 2와 같이 모델링 할 수 있다. Fig. 2로부터 테이블의 운동을 식 (8)과 (9)로 모델링 할 수 있다.

$$F_t = M_t \cdot \frac{dv}{dt} + F_{friction} + M_t \cdot g \cdot \sin \theta + F_{external} \quad (8)$$

$$v_t = \frac{P}{2\pi} \omega_m \quad (9)$$

여기서 M_t , $F_{friction}$, v_t , θ , $F_{external}$ 는 각각 테이블의 질량(kg), 안내면의 마찰력(N)[3], 이송속도 (m/sec), 이송계의 기울어짐 각도(rad), 테이블에 가해지는 외부 힘(N) 등이다.

이상의 식들로부터 이송계의 매커니즘이 이송 모터의 전류에 미치는 영향은 식 (10)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_q = J_{eq} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + T_p + \frac{P}{2\pi \cdot \eta} \{F_{friction} + M_t \cdot g \cdot \sin \theta + F_{external}\} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } J_{eq} = J_m + J_b + \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta} \cdot M_t$$

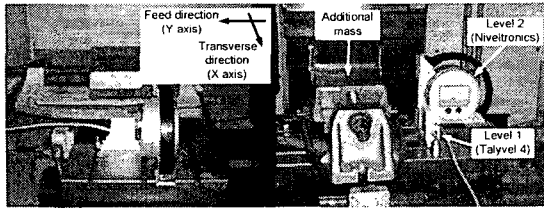


Fig. 3 Arrangement of the levels on the table of a CNC tapping center

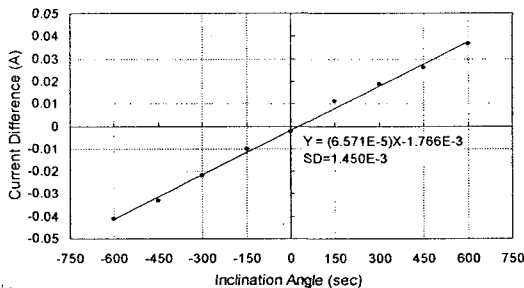


Fig. 4 Measured current differences with respect to various feed drive inclination angles

2.2 이송계 기울어짐 각도의 추정 모델

이송계가 일정한 속도로 움직이며, 외란 힘이 없는 경우를 가정하면 식 (10)은 식 (11)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$i_q = \frac{T_p}{K_t} + \frac{P}{2\pi \cdot \eta \cdot K_t} \{F_{friction} + M_t \cdot g \cdot \sin \theta\} \quad (11)$$

이송계가 양과 음의 방향을 같은 속도로 이송할 경우 전류의 절대값의 차는 식 (12)와 같다.

$$|i_{q+} - i_{q-}| = \frac{P}{K_t \cdot \pi \cdot \eta} M_t \cdot g \cdot \sin \theta \approx \frac{P}{K_t \cdot \pi \cdot \eta} M_t \cdot g \cdot \theta \quad (12)$$

이로부터 이송방향에 따른 전류의 절대값의 차이(이후 전류차)가 이송계의 기울어짐과 직접적으로 관련되어 있음을 알 수 있다. 특히 이송계가 미소하게 기울어져 있으며 기계적 효율이 일정하다고 가정하면, 전류차는 이송계의 기울어짐 각도와 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

3. 기울어짐 각도 추정 모델의 검증

3.1 실험 장치의 구성

식 (11)의 전류차와 이송계의 기울어짐 각도의 관계를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 공작기계는 소형 CNC 태핑 센터로서, 각 이송계는 서보 모터에 의해 구동되며, 볼스크류를 장착하고 있다.

모터의 교류 전류는 Hall 센서를 이용하여 측정하였으며, RMS (Root Mean Square) 값으로 변환하여 등가의 직류 전류값을 얻었다. 전류차는 이송계가 양의 방향과 음의 방향으로 이송 이송할 때 측정된, 방향에 따른 전류의 평균값을 계산하고 두

Table 1 Parameter values for the estimation of the inclination angle of X-axis feed drive of the CNC machining center

Parameter	Value (unit)
Current difference ($ i_{q+} - i_{q-} $)	0.234 (A)
Pitch (P)	0.01 (m)
Torque constant (K_t)	1.01 (N토크/A)
Mass of table (M_t)	1050.0 (kg)
Mechanical efficiency (η)	0.5434

값의 절대값의 차를 계산하여 얻었다. 이송계의 기울어짐 각도는 디지털 디스플레이 타입(Talyvel 4, Taylor Hobson)과 다이얼 디스플레이 타입(Niveltronic, TESA)의 정밀한 두 가지 전자식 수준계를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3은 태핑 센터를 이용하여 구성된 실험장치를 보여준다. Fig. 3의 실험장치에서는 Y 축을 이송방향으로 설정하였으며, 레벨링 볼트(leveling bolt)를 이용하여 기울어짐 각도를 조절하였다.

실험에서 X 축으로의 횡방향 기울어짐 각도를 0°로 유지시키면서, 이송방향(Y축) 기울어짐 각도를 600 sec에서 600 sec까지 150 sec씩 변화시키면서 전류차를 측정하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

Fig. 4는 실험을 통해 얻어진 전류차와 이송방향의 기울어짐 각도 간의 관계를 보여준다. Fig. 4로부터 실제 이송계에서 기울어짐 각도와 전류차가 선형관계에 있음을 확인할 수 있다. 그러나 선형관계가 원점을 통과하지 않고 있음을 확인할 수 있으나, 이 값이 0에 근접해 있는 점으로부터, 전류 센서의 오차, 테이블 면이 완벽한 수평이 아닐 수 있는 것으로부터 왔다고 추정할 수 있다.

Fig. 4에서 피팅(fitting)한 결과와 실제 값의 최대오차가 약 0.0035 A이며, 이로부터 최대 각도 추정 오차는 0.0148°임을 알 수 있었다. 또한 측정된 기울어짐 각도, 제조업체로부터 제공받은 테이블의 무게, 볼스크류 피치 정보로부터 추정된 볼스크류의 기계적 효율은 0.5468 이었다.

4. 머시닝 센터의 기울어짐 각도 추정

실험을 통해 검증된 전류차 측정을 통한 기울어짐 각도 추정 기술을 상용의 CNC 머시닝 센터에 적용하였다. 대상 공작기계는 소형 태핑 센터와 마찬가지로 AC 서보 모터와 볼스크류를 장착하고 있다. 기울어짐 각도 추정을 위해 식 (11)에서 필요한 파라미터를 수집하였으며, 수집된 파라미터들은 Table 1에 제시되었다.

이로부터 추정된 X축 이송계의 기울어짐 각도는 0.225°이었으며, 전자식 수준계를 이용하여 머시닝 센터 X축 이송계의 LM 가이드 레일면에서

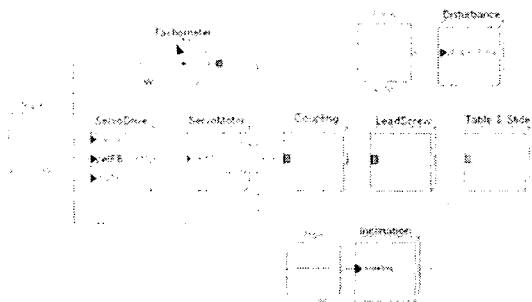
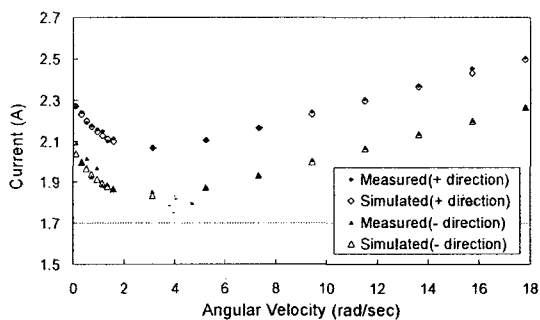
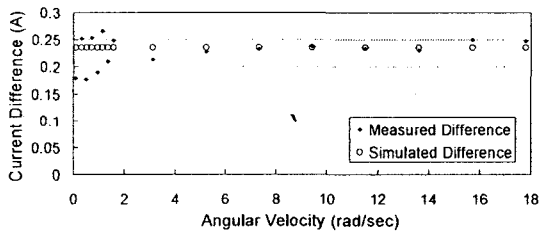


Fig. 5 The simulation model of a machine tool feed drive developed in Dymola environment



(a) Measured and simulated current behaviors



(b) Measured and simulated current differences

Fig. 6 Measured and simulated current behaviors and differences according to the direction of movement and velocity when machine is inclined

측정한 기울어짐 크기는 0.232 도 이었다. 이로부터 추정오차는 3% 정도임을 확인할 수 있다.

식 (1) ~ (10)에서 제시한 이송계의 기울어짐을 고려한 수학적 모델을 이용하여 동적 시뮬레이션 모델을 Modelica 언어 기반의 시뮬레이션 소프트웨어인 Dymola를 이용하여 Fig. 5와 같이 구성하였다. 구성된 시뮬레이션 모델을 이용하여 다양한 이송속도에 대해 이송 모터의 전류를 예측 및 측정하여 비교한 결과는 Fig. 6(a)와 같으며, 이 때 예측 오차는 4% 미만이었다. 이로부터 본 연구를 통해 개발한 시뮬레이션 모델이 실제 이송계의 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이와 함께 Fig. 6(a)로부터 계산된 전류차를 비교한 결과는 Fig. 6(b)와 같다. Fig. 6(b)에서 저속 영역에서의 오차가 크게 나타난 것은 이 영역이 윤활 조건 뿐만 아니라 마찰면의 조건에 영향을 크게 받는 경계 윤활 영역[4]으로

마찰면의 특성에 의해 마찰력이 다소 불안정한 특성을 가지고 있기 때문인 것으로 추정하였다. 특히 Fig. 6에서 얻어진 결과는 기존의 연구에서 이송방향에 따라 전류의 크기가 다르게 나타나는 점을 마찰력의 방향성으로 추정할 점[5]을 개선시킬 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 이송 모터로부터 얻을 수 있는 구동 전류를 측정함으로써 이송계의 기울어짐 각도를 추정할 수 있는 기술을 제안하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 이송계의 기울어짐 각도와 이송모터 전류의 이송방향에 따른 절대값의 차(전류차)는 선형적으로 비례함을 수학적 모델을 통해 제시하고 실험을 통해 검증하였다.
- 2) 상용화된 머시닝 센터에서 이송모터의 전류차를 이용하여 이송계의 기울어짐 각도를 3%의 오차를 가지고 추정할 수 있음을 보였다.
- 3) 기울어짐을 고려한 이송계 모델을 이용하여 이송 모터의 전류 거동을 4% 이내의 오차를 가지고 예측할 수 있음을 보였다.
- 4) 이송방향에 따른 전류차가 마찰력의 방향성보다는 이송계의 기울어짐으로부터 크게 영향을 받음을 확인하였다.

후기

이 연구는 학술진흥재단의 우수연구지원사업 R05-2004-000-11712-0)과 산업자원부 산업기술개발사업인 "마이크로 전기 화학 복합형상 제거 시스템 개발"의 부분적인 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Koenigsberger, F. and Tlustý, J., Machine Tool Structure, Vol. 1, First Edition, Pergamon Press, 1970
2. Schlesinger, G., Testing Machine Tools Eighth Edition, Pergamon Press, Oxford, 1978.
3. Jeong, Y. H. and Cho, D.-W., "Estimating Cutting Force from Rotating and Stationary Feed Motor Currents on a Milling Machine," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42 pp. 1559-1566, 2002.
4. Armstrong-Helouvry, B., Dupont, P., and Canudas de Wit, C., "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction," Automatica Vol. 30, pp. 1083-1138, 1994.
5. Erkorkmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed CNC System Design. Part II: Modeling and Identification of Feed Drives." International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 41 pp. 1487-1509, 2001