

절삭력 간접측정을 위한 정지모터 전류의 특성 연구

정영훈*, 김성진**, 조동우***

Investigation on the Characteristics of the Stationary Feed Motor Current

Young-Hun Jeong*, Seong-Jin Kim**, Dong-Woo Cho***

ABSTRACT

Since cross-feed directional cutting force which is normal to machined surface directly influences the machined surface of the workpiece and total force loaded in cutter, it is necessary to estimate this force to control the roughness of the machined surface and total force in cutter. However, there have been difficulties in using the current existing in a stationary motor for cutting state prediction because of some unpredictable behavior of the current. Empirical approach was conducted to resolve the problem. As a result, we showed that the current and its unpredictable behavior are related to the infinitesimal rotation of the motor. Subsequently, the relationship between the current and the cutting force was identified with the error less than 50%. And, the estimation results of the two machine tools with different characteristics were compared to each other to confirm the validity of the presented estimation method and the characteristics of current of the stationary feed motor.

Key Words: Stationary feed motor (정지모터), Current sensor (전류센서), Cutting force (절삭력)

1. 서론

CNC 공작기계가 생산현장에 적용된 이후 생산 자동화에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 생산 자동화의 핵심인 무인가공을 위해 다양한 접근이 시도되고 있으며, 그 하나로 적응제어가 활발히 연구되고 있다. 적응제어는 센서를 이용하여 가공상태를 추정하고 이를 적정수준으로 유지하도록 가공조건을 조절하는 방법이다.

절삭력은 가공물의 품질, 제어 성능, 공구파손 및 마모에 큰 영향을 미치기 때문에 가공상태를 대변하는 지표로 많이 활용되고 있다. 이러한 절삭력을 측정하는 센서로 공구동력계가 있으나, 비싼 가격, 최대 부하, 스트로크, 배선의 제한과 같

은 문제점으로 현장에 적용이 곤란하다. 이에 반해 모터의 구동전류로부터 절삭력을 추정하는 방법은 비용이 저가이며, 설치에 제약이 없고, 계속적인 모터 드라이브 기술의 발전으로 인해 공구동력계를 대체할 센서로 관심이 집중되고 있다.

대표적 연구로, Stein 등은 교류 모터의 전류로부터 절삭력 유도과정을 고찰하였다⁽¹⁾. Altintas⁽²⁾와 김태용⁽³⁾ 등은 이송모터 전류로부터 절삭력을 추정하여 절삭공정 감시 및 적응제어에 적용하였다.

한 축만을 이송시켜 가공을 하는 2D 가공에서 정지상태 모터의 방향은 가공물의 가공면 방향과 일치하므로 정지상태의 모터 전류로부터 추정된 가공면 방향의 절삭력은 가공성능 및 품질에 대한 많은 정보를 줄 수 있다. 이러한 관계를 Fig. 1 에

접수 2002년 4월 3일
* 포항공과대학교 기계공학과 대학원
** 통일 중공업
*** 포항공과대학교 기계공학과

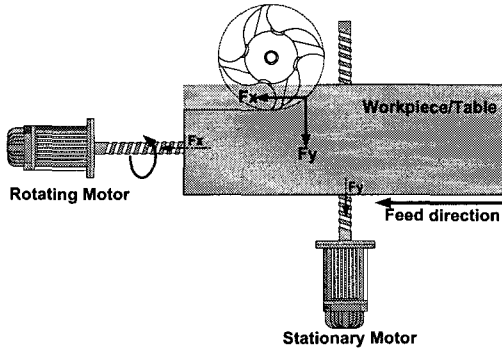


Fig. 1 Schematic diagram of the cutting force and the current in the 2D milling

나타내었다. 이때 이송방향의 모터가 받는 절삭력은 주로 절삭공구에 부하로서 작용하는 반면, 정지 방향의 모터가 받는 절삭력은 절삭공구에 뿐만 아니라 가공면(machined surface)에도 부하로 작용하게 된다. 따라서, 이송방향 뿐만 아니라 정지방향의 절삭력도 절삭 부하나 가공면 제어 측면에서 측정되어야 함을 알 수 있다. 그러나 정지모터의 전류를 이용한 절삭력 추정 연구는 전류의 특이한 거동들로 인해 기존의 연구에서는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 가공 중 정지상태인 이송모터 전류의 특성을 조사하였으며, 이들 특성을 결정짓는 요인들을 분석하였다. 이러한 과정을 거쳐 정지모터의 전류로부터 절삭력을 추정할 결과를 제시하였으며, 특성 요인의 하나인 이송계의 구조

및 성능이 서로 다른 기계로부터의 전류의 거동과 절삭력 추정하여 비교함으로써 본 연구에서 주장하는 바를 확인하였다.

2. 정지모터의 전류센서 모델

모터의 전류와 외란토크와의 관계를 파악하기 위해 본 연구에서 사용된 이송계의 블록 다이어그램을 조사하였으며⁽⁵⁾, Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2로부터 이송계의 위치제어는 P 제어이며, 속도와 전류제어기는 PI 제어와 유사한 IP 제어를 수행함을 알 수 있다. 얻어진 이송계의 전달함수는 식 (1)과 같다. 이로부터 이송량 (θ)의 이송명령 (θ_{cmd})과 외란토크(T_d)에 대한 관계를 알 수 있다.

$$\theta = \frac{K}{sH(s) + K} \theta_{cmd} - \frac{sR(s)}{sH(s) + K} T_d$$

$$H(s) = (J_m L)s^4 + J_m(R + K_{c2})s^3 + (J_m K_{c1} + K_t K_{bemf})s^2 + (K_t K_{c1} K_{v2})s + K_t K_{c1} K_{v1} \quad (1)$$

$$K = K_t K_{c1} K_{v1} K_{p1}$$

$$R(s) = Ls^2 + Rs + K_{c2}s + K_{c1}$$

또한 Fig. 2 에서 전류 및 토크관계를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다. 이로부터 모터의 구동전류는 이송계의 관성과 마찰력에 의한 토크와 외란토크에 영향을 받음을 알 수 있고, 마찰과 관성에 의한 토크 성분을 제거하면 절삭력에 의한 외란토크를 전류로부터 얻을 수 있음을 알 수 있다.

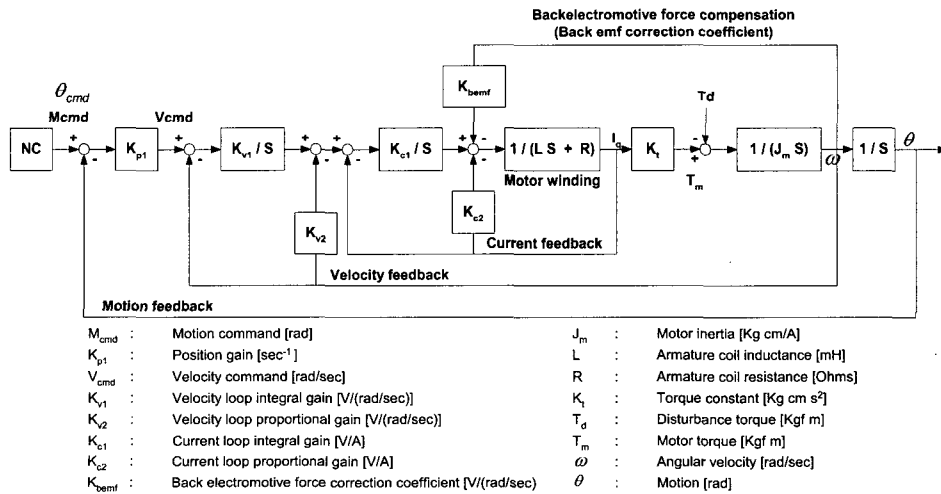


Fig. 2 Block diagram of the feed drive system

$$\begin{aligned}
 K_t I_q &= T_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + T_d \\
 &= J_m \frac{d\omega}{dt} + T_{cutting\ force} + T_{friction}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

식 (1)과 (2)의 이송계 모델에서 가속도와 속도의 영향을 무시하고, 이송명령을 '0'으로 두면 식 (3)과 같이 정지모터의 모델이 얻어진다. 이로부터, 이송계의 외란은 모터의 구동토크에 반영됨을 알 수 있으나, 실제 이송계에서는 외란이 이송계의 운동에 영향을 미치고 이를 제어하기 위해 구동토크가 발생하기 때문에 이송계의 운동이 구동토크에 실질적으로 영향을 주는 요인으로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \theta &= -\frac{sR(s)}{sH(s)+K} T_d \\
 K_t I_q &= T_m = T_d = \frac{sH(s)+K}{R(s)} \frac{1}{s} \theta
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3. 실험장치의 구성

절삭력과 전류의 관계를 구하기 위해 실험에서 이송모터의 전류, 회전각, 그리고 절삭력을 측정하였다. 사용된 공작기계는 FANUC-0MC 를 장착한 ACE-V30(DAEWOO)이며, 모터는 4 극을 가진 영구자석 동기모터이다. 회전각은 엔코더로부터 4 분주하여 10,000 ppr 로 얻었고, 절삭력과 전류의 측정은 공구동력계와 홀센서를 이용하였으며, 교류전류는 DQ 변환을 통해 직류전류로 변환하였다^(4,5).

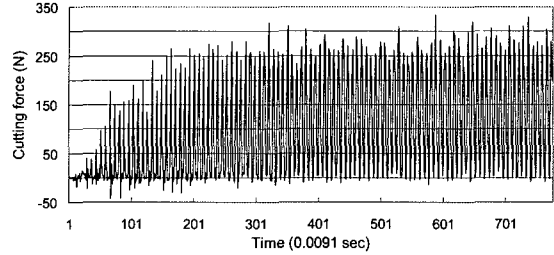
절삭력과 전류 간의 관계를 얻기 위해 다양한 주축 회전속도와 반경방향 절삭깊이에 대해 절삭할 때의 전류와 절삭력을 측정하였다. 사용된 절삭공구는 직경 20 mm 의 4 날 고속도강 평 엔드밀이었으며, 가공물의 재료는 AL 2024-T6 이었다.

4. 정지모터 전류의 거동분석

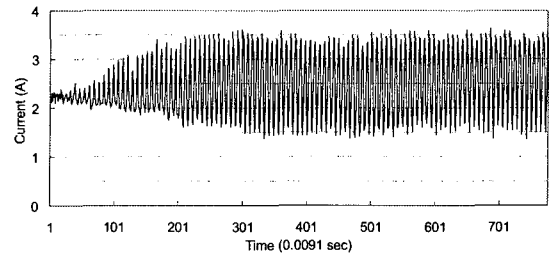
4.1 이송방향과 정지방향 모터의 전류

Fig. 3 은 축 및 반경방향 절삭 깊이가 각각 5, 4 mm 이며, 주축속도와 이송속도가 각각 225 rpm 과 120 mm/min 으로 한 축만 이송하며 가공할 때의 이송 및 정지방향의 절삭력과 모터전류를 보여준다. 이로부터 각 방향의 절삭력이 크기만 다를 뿐 비슷한 거동을 하고 있음을 볼 수 있으나, 전류를 비교해보면, 이송방향 모터의 전류는 이송계 마찰로 인한 DC offset 을 가지며 절삭력과 비슷하게

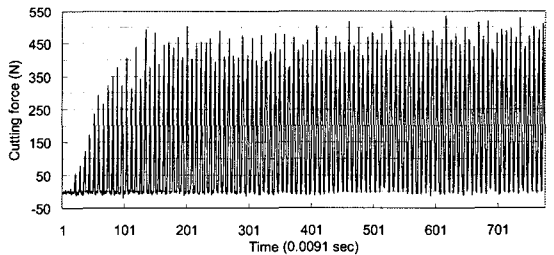
거동하고 있는 반면에, 정지방향 모터의 전류는 거동이 이와 전혀 다름을 볼 수 있다. 정지방향 모터의 전류에서는 정적인 변화가 주로 나타나며, 진동파형은 거의 보이지 않는 경우가 많았다.



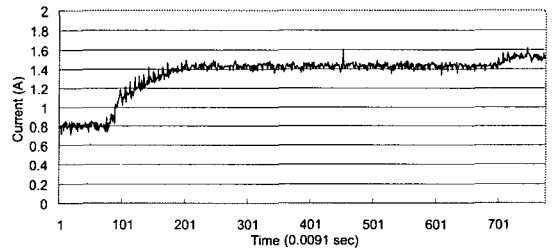
(a) Feed directional cutting force



(b) Feed directional motor current



(c) Cross-feed (stationary) directional cutting force



(d) Cross-feed (stationary) directional motor current

Fig. 3 Cutting forces and motor currents when machining along one axis. (axial depth of cut: 5 mm, radial depth of cut: 4 mm, spindle: 225 rpm, feedrate: 120 mm)

4.2 정지모터의 전류특성

정지상태의 모터가 외란을 받을 때 일어나는 전류의 특성은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 하나는 앞에서 언급한 전류의 정적 거동으로, 본 연구에서는 이를 전류레벨로 칭하였다. 다른 하나는 동적인 거동으로 이송상태 모터의 전류에서 절삭력의 영향에 의한 진동파형과 비슷한 특성을 가지고 있으나, 그 거동이 이송상태의 모터 전류와는 차이를 가지고 있었다.

정지모터의 전류레벨의 변화는, 이송속도가 '0'으로 거의 일정하게 유지되고 있음에도 불구하고 큰 범위로 변화하는 특성을 가지고 있다. 특히 이러한 변화는 절삭력이 가해질 때 발생하기 때문에 절삭력과 밀접한 관계가 있음을 추정할 수 있다. Fig. 4는 정지상태로 제어되고 있는 이송모터에 크기가 같고(약 650 N) 주파수가 각각 90Hz (Fig. 4(a))와 60Hz (Fig. 4(b))로 서로 다른 절삭력을 받을 때, 전류의 다양한 거동과 특성을 간략하게 보여 준다. Fig. 4(a)로부터 전류레벨을 특징짓는 요소는 크게 전류레벨의 초기값, 레벨 변화의 크기 및 지연시간 임을 알 수 있다. 실험으로부터 같은 가공

조건에서도 다양한 초기값을 가짐을 볼 수 있었으며, 변화 또한 다양함을 볼 수 있었다.

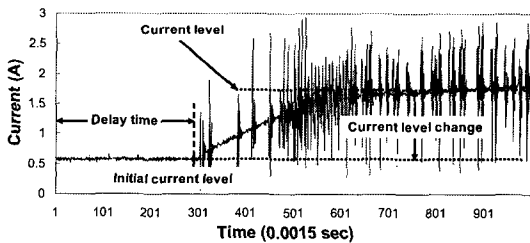
정지모터 전류의 동적인 거동은 Fig. 3(d)와 Fig. 4(a), (b)를 통하여 짐작할 수 있듯이 크게 이송중인 모터와 같이 절삭력 파형과 유사한 형태와, 갑자기 심하게 변화하는 형태로 나눌 수 있으며, 갑자기 변화하는 형태이더라도 Fig. 3(d)와 Fig. 4(a)와 같이 그 변화의 정도가 다양하였다.

4.3 정지모터의 미소회전과 전류

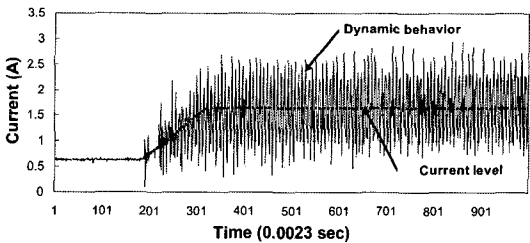
이러한 정지모터 전류의 거동 특성은 모터의 미소회전과 관련을 가지고 있음을 알 수 있었다. 정지상태의 이송모터는 정지상태에 있음에도 불구하고 절삭력을 Fig. 3에서와 같이 받기 때문에, 실제로는 미소한 회전을 하게 된다. 이러한 미소회전은 대상기계에서는 주로 이송량 1~2 μm에 해당하는 0.0001~0.0002 회전의 범위였다.

정지모터 전류의 레벨 변화가 존재하는 부분은 미소한 회전이 활발한 부분이었으며, 동시에 동적인 거동 역시 절삭력 파형과 비슷하였다. 이에 반해 미소회전이 적은 구간에서는 레벨의 변화가 거의 없고, 동적인 거동은 Fig. 4(a)와 같은 형태를 가졌다. 이러한 현상은, 절삭력이 정지상태에 있는 이송계를 거쳐 모터에 전달되어 미소한 회전이 발생하고 엔코더가 이러한 미소한 회전을 감지하여 원 상태로 복귀하도록 제어되기 때문이다.

전류와 모터의 미소회전과의 관계는 2 절의 모델로부터 확인할 수 있다. 식 (3)에서 전류와 외란이 선형관계에 있지만, 그 사이를 매개하고 있는 회전의 관계는 차수를 가짐을 알 수 있다. 특히 전류와 회전 사이의 다음의 관계를 얻을 수 있다.



(a) Current behavior when current intermittently bounces (axial depth of cut: 5 mm, radial depth of cut: 6 mm, spindle: 1,350 rpm, feedrate: 720 mm)



(b) Current behavior similar to the cutting force (axial depth of cut: 5 mm, radial depth of cut: 6 mm, spindle: 900 rpm, feedrate: 480 mm)

Fig. 4 Dynamic behavior of the stationary motor current

$$\text{Let } \frac{1}{s}\theta = l \tag{4}$$

$$T_m = K_t I_q = \frac{U(s^5, s^4, s^3, s^2, s^1)}{L(s^2, s^1)} l$$

$$= a\ddot{l} + b\dot{l} + cl + F(s^2, s^1)l$$

$$= a\alpha + b\omega + c\theta + F(s^2, s^1)l$$

식 (4)로부터 전류는 회전의 적분치, 회전, 각속도, 각가속도와 관련이 있음을 알 수 있으며, 이러한 관계는 Fig. 5로부터 확인할 수 있다. 그러나 정지상태에서 각속도와 각가속도는 필터링 등으로 인해 매우 작음을 고려할 때 대부분 회전량과 그 적분치에 영향을 받는 것으로 추정할 수 있다.

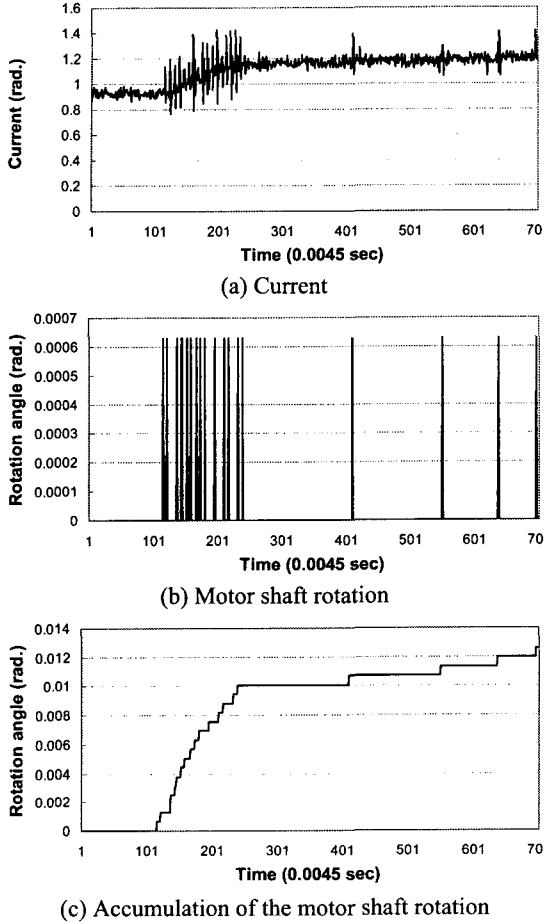


Fig. 5 Current, motor shaft rotation, and accumulation of the motor shaft rotation in stationary motor. (axial depth of cut: 5 mm, radial depth of cut: 2 mm, spindle: 450 rpm, feedrate: 240 mm)

또한 대상기계의 제어기에 대한 매뉴얼에서도 정지상태에 있는 모터의 전류거동은 회전량에 직접적으로 연관되어 있음을 보고하고 있다⁽⁵⁾. Fig. 5로부터 회전량의 적분치는 전류의 레벨변화에, 회전량은 동적 거동에 영향을 미침을 볼 수 있다. 또한 모터의 회전에 따라 전류의 동적 거동이 민감하게 반응함을 볼 수 있으며, 모터의 회전이 절삭력에 의한 것임을 고려하면 전류의 동적 거동이 절삭력과 높은 상관관계를 가진다고 볼 수 있다. 그러나 전류의 동적 거동은 Fig. 4와 같은 특성을 가지기 때문에 절삭력 추정에 이용하는 것은 곤란하였다.

4.4 정지상태의 전류특성 발생요인

앞 절에서 정지모터의 전류는 근본적으로 절삭력과 관계가 있음을 보였으나, 다음의 요인들로 인해 다소의 오차를 가지고 있었다.

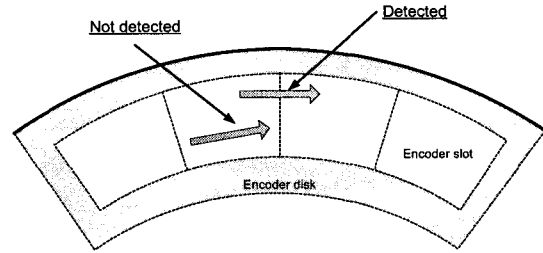


Fig. 6 Relationship between encoder resolution and detection of the infinitesimal rotation of motor

4.4.1 모터 엔코더의 분해능

엔코더의 분해능에 따라 미소회전을 검출할 수 있는 능력이 달라지기 때문에, 엔코더의 분해능은 정지모터 전류로부터의 절삭력 추정 정밀도에 영향을 준다. 고분해능의 엔코더를 사용할 경우 절삭력에 의한 각 순간의 모터의 미소회전을 검출할 수 있고, 이에 따라 절삭력에 대한 전류거동이 더욱 명확해질 수 있다. Fig. 6은 이러한 미소회전과 엔코더 분해능의 관계를 간략하게 보여준다.

4.4.2 정지상태 이송계의 정지마찰

정지마찰은 정지 시 이송계의 마찰로서 이송시에 비해 그 수준이 높은 것으로 알려져 있으며, 이에 의해 절삭력이 가해져도 회전이 일어나지 않을 수 있다. 이러한 정지마찰은 위치와 노면상태에 따라 그 값이 다르고 불안정하기 때문에 각 위치와 상태에 따라 절삭력에 의한 모터의 미소회전이 영향을 받을 수 있다⁽⁶⁾.

Fig. 7은 정지상태에 있는 이송계가 절삭력에 의해 미소회전이 발생하고 이를 제어하여 원래 위치로 돌리는 과정에서의 토크, 마찰, 이송계의 운동 등을 간략하게 보여준다. 그림에서 토크가 변화하는 구간은 전류의 동적 거동과 상통하며, 일정하게 유지되는 부분은 전류 레벨과 관련된다. 동적 거동의 토크는 절삭력과 최대 정지마찰이 포함되어 있고, 레벨과 관련된 토크는 절삭력과 미끄럼 마찰이 포함되어 있음을 알 수 있다.

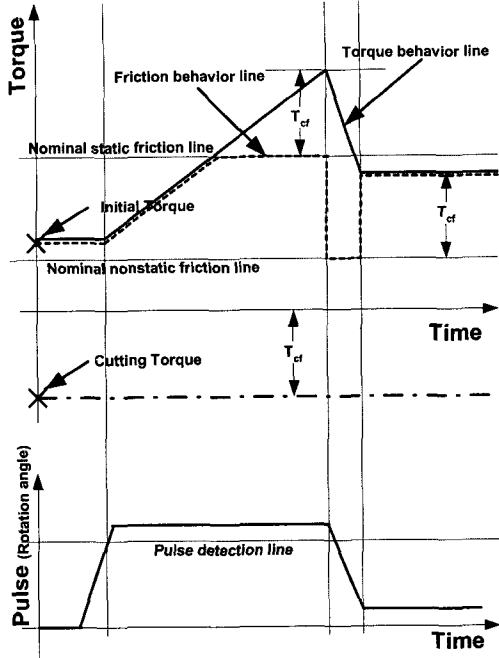


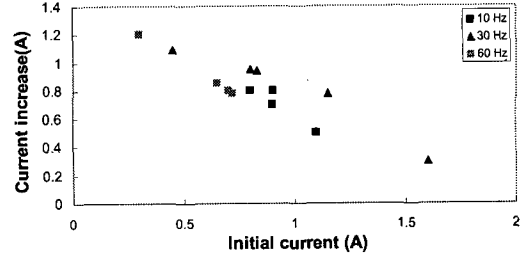
Fig. 7 Schematic diagram for relationship between friction and servo system motion

4.4.3 이송계의 초기전류와 비틀림

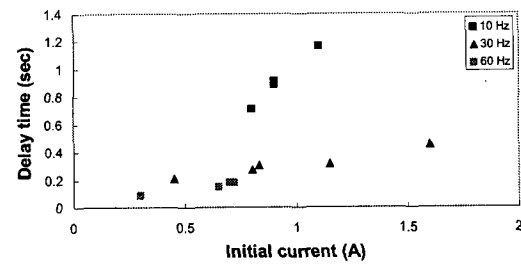
정지모터의 경우에는 절삭이 시작되더라도 일 정시간 동안은 전류가 변화하지 않는다. 모터는 외란이 없는 경우라도 정지 마찰보다는 다소 작은 수준의 토크를 이송계에 전달하고 있어 이송은 발생하지 않지만, 이러한 초기전류가 예인장(pretension)을 일으켜 외란에 대한 오차발생을 지연시키는 것을 실험결과로부터 확인하였다. Fig. 8 은 초기전류의 절삭력에 대한 전류의 변화 및 지연시간과의 관계를 보여준다. 그림으로부터 초기전류가 높을수록 전류의 변화는 적음을 볼 수 있고, 이는 최종의 전류레벨이 일정하기 때문이다. 또한, 지연시간이 길어짐을 볼 수 있는데, 이로부터 초기전류가 클 경우 지연시간만큼 큰 오차구간이 존재함을 알 수 있다. 이상으로부터 초기전류는 전류의 거동에는 영향을 미치지지만, 절삭력의 추정에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.4.4 이송계의 응답 특성

정지모터의 전류는 절삭력의 주파수와 크기에 대한 응답특성을 가지고 있었으며, 주로 동적 거동에서 나타났다. 이러한 응답특성을 조사하기 위



(a) Relationship between initial current and current increase



(b) Relationship between initial current and delay time

Fig. 8 Influence of initial current on current increase

해 절삭력의 이물림 주파수가 15 Hz, 30 Hz, 60 Hz, 그리고 90 Hz 인 경우에 대해 각각 절삭력의 크기가 300 에서 750 N 사이에 있는 서로 다른 5 가지의 절삭조건에서 실험을 수행하였다.

15 Hz 의 경우에는, 700 N 근처에서는 절삭력과 비슷한 거동(Fig. 4(b))을 보이며, 나머지 조건에서는 정적인 변화가 주로 존재하는 매우 안정적인 형태(Fig. 4(a))를 보였다. 30 Hz 와 60 Hz 에서는 각각 400 N 과 300 N 이하에서 Fig. 4(a)와 같은 형태를 가졌으며 그 이상에서는 Fig. 4(b)같은 형태를 가지고 있었다. 그러나 90 Hz 에서는 Fig. 4(a)와 같은 형태만 보였다. 이러한 응답 특성은 정지상태에 있는 이송기구의 응답특성에 크게 지배 받고 있는 것으로 추정된다.

4.5 정지모터 전류와 절삭력 추정

이상의 전류의 특성을 고려하여 전류로부터 절삭력을 추정하였다. 전류의 레벨과 동적 거동이 모두 절삭력을 반영하고 있지만, 동적 거동의 Fig. 4 와 같은 현상으로 인하여 실시간 추정에서는 잘못된 추정을 할 수 있으므로 전류 레벨만을 취하여 절삭력과의 관계를 얻었다. Fig. 9 는 절삭력의 이물림 주파수가 15 Hz 일 때 얻어진 절삭력

과 전류레벨이 선형관계에 있음을 보여준다.

그림으로부터 초기전류의 부호에 따라 전류와 절삭력의 관계가 다를 수 있다. 직선의 y 절편은 Fig. 7 에서 언급한 미끄럼 마찰에 해당하는 것임을 알 수 있으며, 관계의 큰 차이가 y 절편 값을 고려한다면 초기전류에 따라 마찰의 특성이 변한다는 것을 알 수 있다.

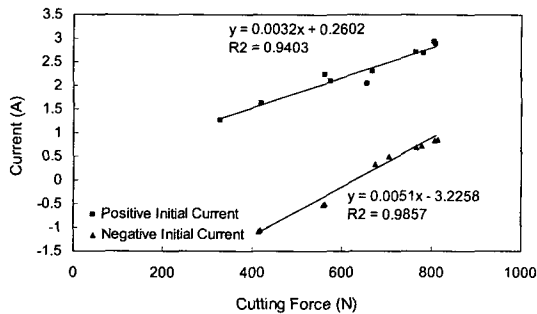


Fig. 9 Relationship between stationary feed motor current and cutting force with 30 Hz of tooth passing frequency

기울기가 다른 것은 초기전류의 부호가 음이면서 절삭력이 400 N 이하인 경우에는 미소한 전류의 변화만으로 제어가 이뤄지기 때문이다. 이는 이송계의 초기전류에서 전류의 크기를 감소시킴에 따라 볼 스크류의 비틀림이 풀어져 모터가 회전한 것이 볼 스크류가 회전한 것과 같은 효과를 내기 때문으로 추정된다. 그러나 600 N 이상의 데이터만을 고려하는 경우에는 기울기가 0.003 으로 거의 같은 값을 가짐을 볼 수 있었다. 추정오차는 20 % 이내임을 볼 수 있다.

5. 저 강성 공작기계의 정지모터 전류

앞 절의 절삭력 추정결과는, 이송하중이 커서 마찰에 의해 변위가 매우 작은, 고 강성의 공작기계에 대한 것으로, 큰 추정오차를 가지고 있었다. 오차의 원인으로는 엔코더의 분해능, 정지마찰, 초기전류, 전류의 응답특성 등이 있었다. 이때 초기전류는 마찰에 영향을 받으므로 근본적인 원인은 엔코더의 분해능과 기계의 강성으로 볼 수 있다.

따라서 이러한 원인이 제거되었다고 볼 수 있는 고분해능의 엔코더가 장착된 저 강성의 공작기계를 대상으로 정지모터 전류를 이용한 절삭력 추정을 수행하여 그 추정성능의 향상과 5.4 절에서

정지모터 전류의 특성을 지배하는 것으로 추정된 인자들이 합당함을 확인하였다. 사용된 공작기계는 시대중공업에서 제작한 소형 탭밀센터 (TapMill center)인 SPT-30T 의 프레임에 서보모터 및 엔코더를 설치하고, 터보테크의 HX 제어기를 장착시킨, 개조된 기계이다. 이송계의 모터 엔코더는 4 분주하여 24,000 ppr 로 얻었다. 앞 절의 대상 공작기계는 x, y, z 축이 쌓여져서 칼럼이 3 축 방향으로 움직이는 타입으로 하중이 매우 큰 반면에, 이 기계는 x, y 축 이송은 소형의 팔레트가 하게 되고 z 축만 칼럼이 움직이기 때문에 x, y 축의 이송하중이 매우 작고 이에 따라 마찰이 작아 강성이 낮다.

Fig. 10 은 얻어진 결과를 보여준다. 강성이 떨어지는 기계이므로 절삭력의 크기는 앞 절들에서 보다 다소 작게 하였다. 모터의 전류는 절삭력의 거동을 매우 잘 반영하는 Fig. 4(b)와 같은 형태를 지님을 볼 수 있다. 이는 Fig. 10(c)에서의 모터의 미소한 회전이 매우 활발하게 일어나는 것에 기인한 것임을 알 수 있다. Fig. 10(d)에서의 모터의 미소한 회전이 전류에 거의 반영되지 않은 것처럼 보이는 것은 이송계의 튜닝 시 이송계가 저 강성인 것으로 인해 적분이득이 매우 높게 되었기 때문이다.

Fig. 11 은 동적 거동이 고려된 정지방향 모터의 전류와 절삭력 간의 관계를 보여준다. 강성이 높은 기계에서 절삭력을 추정한 방법과 같이 평균을 취한 것과 동적 거동을 고려하여 최대값을 고려한 것 모두 절삭력을 추정이 가능함을 볼 수 있다. 또한 이상으로부터 강성이 낮은 공작기계에 대해서는 정지방향의 전류가 절삭력의 거동을 매우 잘 반영함을 확인할 수 있으며, 기계의 강성과 모터의 엔코더에 좌우됨을 추정할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 이송계의 제어모델과 실험적인 접근을 통해 공작기계가 2D 가공 시 정지되어 있는 이송계의 이송모터 전류의 거동과 그 원인을 파악하였다. 정지상태에 있는 모터의 전류특성을 결정짓는 요인들이 엔코더의 분해능, 이송계의 정지마찰, 초기전류, 전류의 응답특성 등임을 보였으며, 이러한 과정을 거쳐 정지모터의 전류로부터 절삭력을 추정한 결과를 제시하였다. 또한 엔코더의 분해능과 기계의 강성이 서로 다른 기계로부터의 전류의 거동과 절삭력 추정결과를 비교함으로써 본 연구에서 제시한 정지모터 전류특성 및 그

요인의 타당성을 확인하였다.

본 연구의 결과는 정지상태의 이송계가 존재하는 가공에서 최대 절삭력을 일정하게 유지하거나 가공면을 제어하는데 활용될 것으로 기대한다.

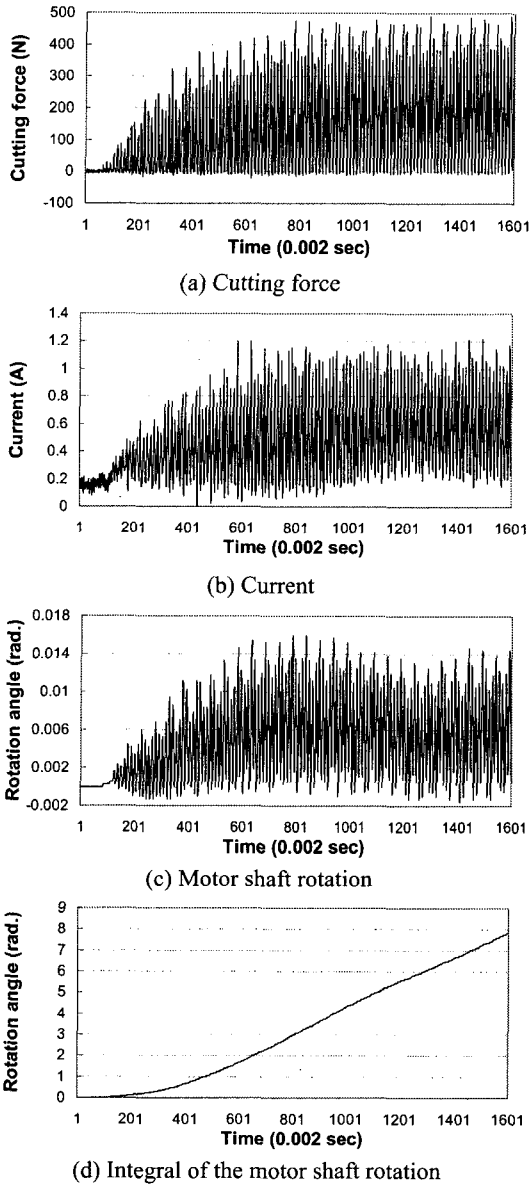


Fig. 10 Current, motor shaft rotation, and integral of the motor shaft rotation in the stationary feed motor of the machine tool with low stiffness. (axial depth of cut: 5 mm, radial depth of cut: 10 mm, spindle: 600 rpm, feedrate: 200 mm)

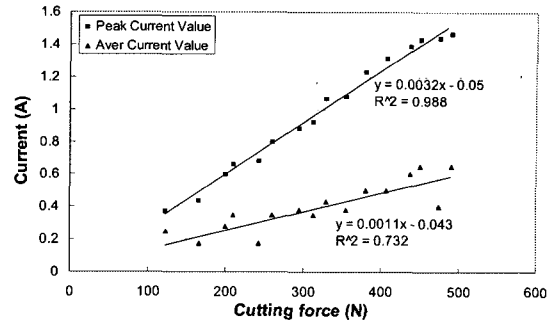


Fig. 11 Relationship between current and cutting force with 40 Hz of tooth passing frequency

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구과제 (1999-2-31500-002-3)의 연구비 지원에 의한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- Stein, J. L., and Wang, C. H., "Analysis of Power Monitoring in AC Induction Drive Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 239-248, 1990.
- altintas, Y., "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, *Journal of Engineering for Industry*," Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
- 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류감시를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용," *한국정밀공학회지*, 제 13 권, 제 2 호, pp. 133-145, 1996
- 정영훈, 윤승현, 조동우, "일반적 상황에서 2 차원 절삭력 추정을 위한 이송모터 전류의 거동 분석," *한국정밀공학회지*, 제 19 권, 제 4 호, pp. 93-100, 2002
- Fanuc AC Servo Amplifier Maintenance Manual.
- Cheok, K. C., Hu, H., and Loh, N. K., "Modeling and Identification of a Class of Servomechanism Systems with Stick-Slip Friction," *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 110, pp. 324- 328, 1988.