

일반적 상황에서 2차원 절삭력 추정을 위한 이송모터 전류의 거동분석

정영훈*, 윤승현**, 조동우***

Analysis of the Characteristics of the Feed motor Current for the Estimation of the Cutting Force in General Cutting Environment

Young Hun Jeong*, Seong Hyun Yun** and Dong Woo Cho***

ABSTRACT

The current from the feed motor of a machine tool contains substantial information about the machining state. There have been many researches that investigated the current as a measure for the cutting forces. However it has been reported that this indirect measurement of the cutting forces from the feed motor current is only feasible in low frequency. In this research, it was presented that the bandwidth of the current monitoring can be expanded to 130 Hz. And the unusual behavior of the current was examined in this bandwidth. The cross-feed directional cutting force influences the machined surface of the workpiece, which makes it necessary to estimate this force to control the roughness of the machined surface. The current exists in the stationary feed motor, and it can give the useful information on the quality of the machined surface. But the unpredictable behavior of the current prevents applying the current to prediction of the cutting state. Empirical approach was conducted to resolve the problem. As a result, the current was shown to be related to the accumulation of the infinitesimal rotation of the motor. Subsequently the relationship between the current and the cutting force was identified.

Key Words : AC Servo Motor (교류 서보 모터), Current (전류), Cutting Force (절삭력), Feed Drive System (이송계), Pulse Accumulation (회전량 적분치)

1. 서론

1950년대 수치제어가 공작기계에 도입된 후 CNC (Computer Numerical Control)는 생산시스템의 전 영역에 빠르게 적용되어왔다. 그러나 숙련자의 경험적 지식에 의한 절삭조건 설정이나 작동은 생산의 가속화나 무인 자동화에는 문제점으로 지적되어 왔다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 지능 생산 시스템(Intelligent Manufacturing System)의 개념을 도입하고자 많은 연구가 진행되고 있다.

절삭력은 가공물의 질, 공작기계의 제어 성능, 공구파손 등 가공에 있어 가공성능의 가장 중요한 지표로 볼 수 있다. 이러한 절삭력을 측정하는 센서로 공구동력계가 많이 활용되고 있다. 그러나 공구동력계는 고가이며, 최대 부하 및 스트로크의 제한, 배선 등의 문제로 현장에서의 활용에 많은 제한을 가지고 있다. 이러한 공구동력계의 단점에 비해 모터의 구동전류를 이용하여 절삭력을 추정하는 방법은 비용이 저가이며, 설치의 제약이 없고, 계속적인 모터 및 드라이브 기술의 발전으로 인해 공구

†† 2001년 2월 8일 접수

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** (주)한라공조

*** 포항공과대학교 기계공학과

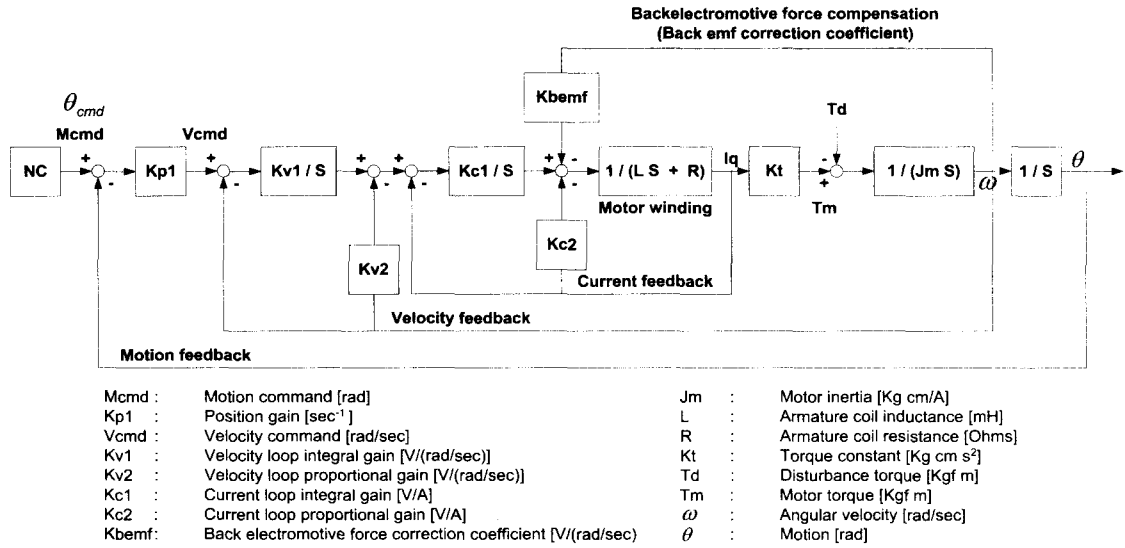


Fig. 1 Block diagram of the feed drive system

동력계를 대체할 센서로 그 관심이 집중되고 있다.

대표적인 연구로, Stein 등은 직류 및 교류 서보 모터전류로부터 절삭력 유도과정을 고찰하였다^(1,2). Altintas⁽³⁾와 J. M. Lee⁽⁴⁾ 등은 공구파손 검출을 위해 이송모터전류로부터 절삭력을 추정하였다. 김태용 등은 전류로부터 추정된 절삭력을 공정감시 및 적응제어에 적용하였으며⁽⁵⁾, 2차원 가공에 전류센서를 적용하기 위하여 칼만 필터와 신경망 회로를 이용하였다⁽⁶⁾. G. D. Kim 등은 이송모터전류로부터 마찰을 고려하여 절삭력을 추정하였다⁽⁷⁾.

본 연구는 이송모터의 전류로부터 절삭력 추정 에 있어서 문제점으로 지적되어온 간접측정대역 범위 및 단축이송 가공 시 정지모터의 전류 거동 분석에 초점을 맞추었다. 기존의 연구에서는 전류를 통한 절삭력 간접측정은 현장에서 적용하기에 곤란할 정도로 낮은 간접측정대역 범위를 가지고 있다고 보고되었으나^(3,7), 본 연구에서는 다양한 실험데이터에 기초하여 대역폭 범위를 확대하고자 하였다. 그리고 특이한 거동을 보여 전류 측정을 통한 절삭력 추정에서 배제되어 왔던 정지상태 모터의 전류와 가공상태간의 관계를 분석하였다. 특히, 정지모터는 가공면 방향의 가공정보를 가지고 있을 뿐만 아니라, 전류를 통한 다축 가공의 감시 제어에서 특이거동으로 인한 감시 실패 등 문제를 가질 수 있기 때문에 반드시 규명되어야 할 부분이다.

2. 이송계와 모터전류의 모델링

서보 이송계의 인자들 간의 관계를 조사하기 위해, 본 연구에서 사용된 동작기계 서보 이송계의 블록 다이어그램을 Fig. 1에 나타내었다. 전체적인 구조는 위치명령이 P 제어에 의해 속도명령으로 변환되며, 이는 PI 제어를 통해 전류명령이 생성되고 마찬가지로 PI 제어를 통해 제어된 전류가 모터에 공급되어 이송계로 토크가 전달된다. 이때 이송계에 전달된 토크는 관성 및 외란토크와 작용하여 이송계를 이송시키고, 이 운동들이 피드백 된다. 이러한 관계를 블록 다이어그램으로부터 얻으면 다음의 식 (1)과 같고 이로부터 이송계의 운동은 위치명령과 외란에 의해 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$\theta = \frac{K}{sH(s) + K} \theta_{cmd} - \frac{sR(s)}{sH(s) + K} T_d \quad (1)$$

$$H(s) = (J_m L)s^4 + J_m(R + K_{e2})s^3 + (J_m K_{c1} + K_t K_{bemf})s^2 + (K_t K_{c1} K_{e2})s + K_t K_{c1} K_{v1}$$

$$K = K_t K_{c1} K_{v1} K_{p1}, \quad R(s) = Ls^2 + Rs + K_{e2}s + K_d$$

블록 다이어그램에서 이송계의 토크의 관계는 다음의 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$T_m = J_m \frac{d\omega}{dt} + T_d \quad (2)$$

$$= J_m \frac{d\omega}{dt} + T_{cutting\ force} + T_{friction}$$

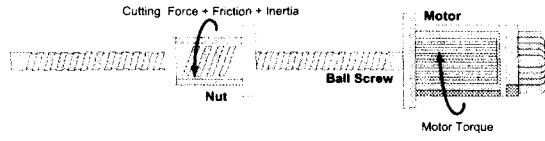


Fig. 2 Simple model of the feed drive system

블록 다이어그램에서 모터의 구동 토크는 외란 토크와 이송계의 관성을 이기고 이송계를 이송하게 됨을 알 수 있고, 이 중 외란 토크 T_d 는 공작기계의 경우에는 절삭력에 의해 이송계에 전달되는 전삭토크 $T_{cutting\ force}$ 와 이송계의 마찰력에 의한 토크 $T_{friction}$ 로 나누어 생각할 수 있다. 따라서, 모터의 구동 토크로부터 관성에 의한 영향과 마찰토크를 제외시키게 되면 절삭시의 절삭력을 추정해 낼 수 있음을 알 수 있다. 이상의 관계는 Fig. 2와 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

본 연구에서 사용된 공작기계에 장착된 모터는 120도의 위상차를 가지는 3상의 교류전류가 인가되는 영구자석 동기모터(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)이며, 이의 3상 전류는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^(5, 6, 8).

$$\begin{aligned} i_u &= I_m \cos(\omega_i t) \\ i_v &= I_m \cos(\omega_i t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_w &= I_m \cos(\omega_i t - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (3)$$

이때, i_u , i_v , 그리고 i_w 는 각각 u, v, w상 교류전류이며, I_m 는 교류전류의 크기를 나타낸다. 또한 ω_i 는 3상 전류의 주파수이다.

측정된 3상 전류를 모터의 회전자에 고정된 가상적인 D-Q 이동 좌표계의 값으로 식 (4)와 같이 좌표

변환하면, 식 (5)과 같이 구동토크에 비례하는 I_d 전류를 구할 수 있다^(5, 6, 8).

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(n_p \theta) & \sin(n_p \theta) \\ \cos(n_p \theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(n_p \theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(n_p \theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(n_p \theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_m = K_t I_d \quad (5)$$

여기서, $\omega_i t = n_p \theta$ 의 관계를 가진다. 이때 n_p 는 모터 회전자의 극수이며, θ 는 D-Q 좌표계 Q축의 u 축 권선에 대한 상대 각위치를 나타낸다. 또한, K_t 는 모터의 토크 상수이다. 또한, PMSM의 일반적인 작동영역에서는 $I_d = 0$ 로 유지된다.

3. 실험장치의 구성

절삭 시 전류의 거동을 얻기 위해 실험장치를 구성하였다. 실험을 통해 얻은 신호는 X, Y축 방향의 모터전류, 엔코더 신호, 그리고 절삭력이다.

실험에 사용된 머시닝센터는 FANUC-0MC를 장착한 DAEWOO의 ACE-V30이며, X, Y축 이송모터는 4극의 PMSM이다. 모터의 엔코더는 2,500 ppr 사양이며, 카운터 보드(Advantech, PCL-833)에서 10,000 ppr로 분주하여 회전각을 측정하였다. Fig. 3는 실험장치의 구성을 보여준다.

절삭력과 전류는 각각 공구 동력계(KISTLER, 9257A)와 홀센서(LEM, LA55-P)를 이용하여 측정하였으며, AD 보드(Advantech, PCL-718)에서 디지털로 변환하였다. 실험에 사용된 절삭공구는 직경 20 mm의 4날 고속도강 평 엔드밀이었으며, 가공물의 재료는 AL 2024-T6이었다. 본 연구에서 가공물의

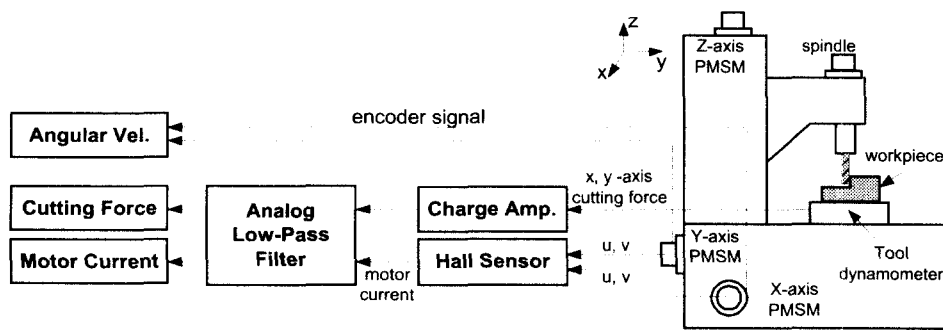


Fig. 3 Experimental setup

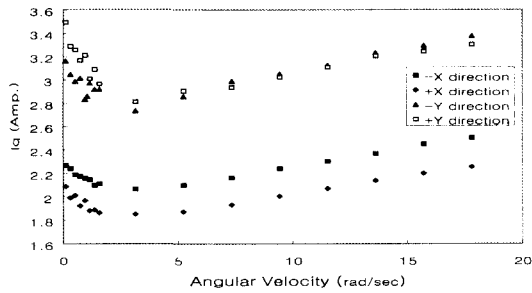
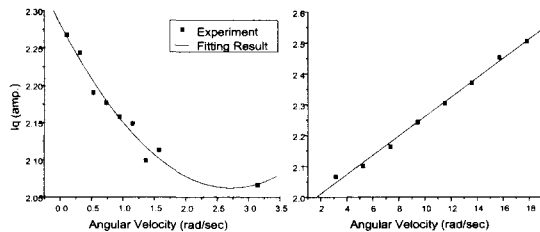


Fig. 4 Relationship between the angular velocity and the motor current; friction effect



(a) $I_q = 2.282 - 0.162\omega + 0.030\omega^2$ ($\omega < 3.14$ rad/sec)
 (b) $I_q = 1.948 - 0.031\omega$ ($\omega \geq 3.14$ rad/sec)

Fig. 5 Relationship between the angular velocity and the motor current in -X direction

절삭폭(Width of Cut)은 10 mm이었으며, 절삭깊이(Depth of Cut)는 5 mm로 하였다.

전류로부터 절삭력을 추정하기 위한 실험에서 신호의 AD변환 조건은 절삭력 이물질주파수의 약 3.5배로 아날로그 저주파 필터링을 하고, 7.3배로 샘플링하였다. 이는 절삭력의 이물질주파수의 3배 까지에 절삭 특성이 주로 존재하기 때문이다⁽⁹⁾.

4. 이송 중인 모터전류로부터의 절삭력 추정

4.1 이송 중 전류의 외란특성 제거

식 (2)에서 볼 수 있듯이 모터의 전류에는 관성과 마찰 그리고 절삭에 의한 외란이 모두 포함되어 있다. 따라서 모터의 전류로부터 절삭력을 추정하기 위해서는 관성 및 마찰특성을 제거하여야 한다.

전류에서 관성의 영향은 이송계의 가속 시에 가속도에 비례하여 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이송속도를 일정하게 하여 모터의 전류에 관성특성이 영향을 미치지 않도록 하였다.

이송중인 이송계의 마찰 특성은 점성마찰과 쿨롱마찰이 지배적이다⁽⁷⁾. 본 연구에서는 이송 시 전

류에 영향을 주는 이러한 마찰특성을 수식화하여 적용함으로써 다양한 절삭조건에서 마찰에 의한 영향을 배제하고자 하였다. 또한 테이블의 위치에 따른 마찰력의 변화를 무시하고 이송속도에 따른 영향만을 고려하여 적용이 유리하도록 하였다.

이송 시의 마찰특성을 파악하기 위하여 X, Y축에 대하여 이송방향과 이송속도에 따른 모터전류의 변화를 측정하였다. 샘플링 주파수는 1 kHz이고, 20 Hz로 아날로그 저주파 통과 필터링하여 잡음을 제거하였다. Fig. 4는 얻어진 결과를 보여주며, 쿨롱마찰 및 점성마찰의 영향이 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 4에서 X, Y축의 전류의 크기가 다른 이유는 실험에 사용된 공작기계의 Y축의 구조적인 불균형이 X축에 비해 크기 때문으로 추정된다. 그러나 팔레트가 이송테이블과 떨어져 있으므로 가공물과 지그의 하중이 마찰에 영향을 미치지 않아 마찰에 영향을 미치는 하중은 일정하게 유지된다.

Fig. 4에서 마찰에 의한 전류의 거동이 약 300 mm/min(3.14 rad/sec)을 기준으로 차이를 보이므로 300 mm/min이하부분은 2차 식으로, 이상부분은 1차 식으로 근사하였다. Fig. 5는 수식화된 -X 방향의 마찰력 특성을 보여준다.

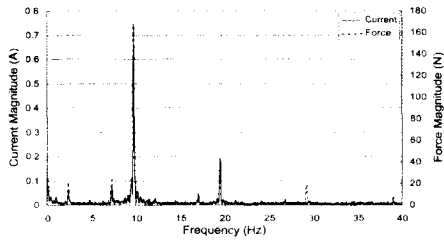
4.2 절삭력 간접측정대역

절삭력 간접측정대역을 조사하기 위해 절삭력의 이물질주파수를 5 Hz씩 200Hz까지 변화시키며 실험을 수행하였다. 얻어진 신호에 대해 지배적인 주파수를 비교하기 위해 주파수 분석을 하고 시간 지연 조사를 위해 시간영역의 파형을 비교하였다.

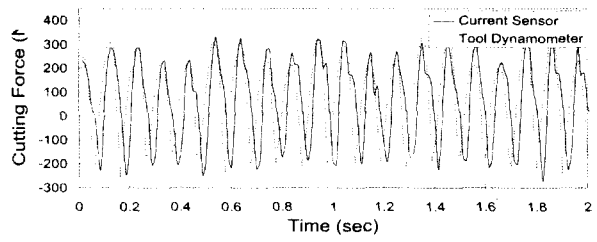
Fig. 6은 절삭력의 이물질 주파수가 각각 10, 100 Hz일 경우의 절삭력과 전류의 주파수 분석결과와 파형을 보여준다. 절삭력의 이물질 주파수가 10과 100 Hz인 경우는 전류로부터 절삭력을 추정할 수 있고, 절삭력에 대한 전류응답의 시간지연은 약 18 msec임을 알 수 있었다. 그러나 130 Hz 이상에서는 주파수 분석 결과 이물질 주파수 근처에선 많은 잡음이 동반되어 절삭력 추정이 불가능하였다. 이를 통해 본 연구에서 사용한 공작기계의 간접측정대역은 125 Hz이내임을 알 수 있었다.

4.3 전류신호의 특이응답

실험결과로부터 절삭력 간접측정대역인 125 Hz 이내에서 전류의 주파수 특성이 구별되는 특이구간이 존재함을 알 수 있었다. 전류신호의 지배적인

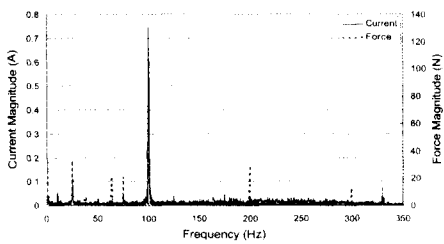


Spectral analysis for the current

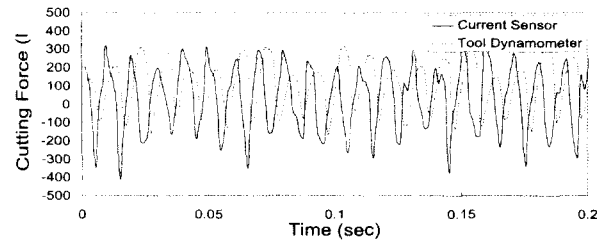


Profiles of the cutting force and the current

(a) 10 Hz



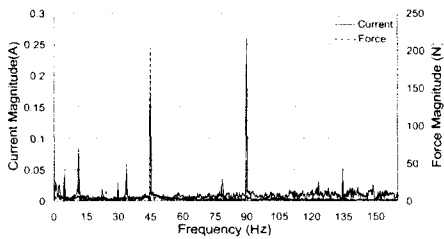
Spectral analysis for the current



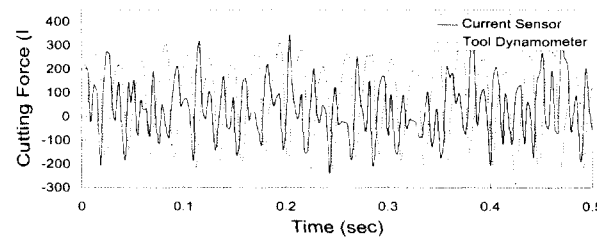
Profiles of the cutting force and the current

(b) 100 Hz

Fig. 6 Comparison between the current and the cutting force at 10 and 100 Hz of the tooth passing frequency



Spectral analysis for the current



Profiles of the cutting force and the current

Fig. 7 Comparison between the current and the cutting force at 45 Hz of the tooth passing frequency

주파수가 절삭력의 이물림 주파수와 같은 타구간과 달리, 이 구간의 전류신호는 절삭력의 이물림 주파수의 2배 주파수가 지배적이었다. 또한 이물림 주파수의 3/4배 주파수의 신호가 런아웃 주파수의 신호와 대등한 크기를 가졌다. Fig. 7은 절삭력의 이물림 주파수가 45 Hz일 때 절삭력과 전류의 주파수와 파형 분석결과이며, 이러한 특이구간은 본 실험장치에서는 45부터 75 Hz까지였다.

절삭력 간접측정대역 범위 내에서 각 주파수의 작용을 확인한 결과, 이물림 주파수의 3/4배의 주파수는 이물림 주파수와 작용하여 맥놀이 현상을 유

발하며, 2배 주파수는 이물림 주파수의 전류신호가 적을 때에만 지배적으로 드러남을 볼 수 있었다. 그러나 특이구간 내의 전류특성이 일관성을 가지고 있었기 때문에 절삭력의 이물림주파수가 특이구간 내에 있는 경우에도 전류로부터 절삭력의 크기를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

4.4 이송방향의 주파수 응답곡선

실험장치의 간접측정대역인 125 Hz이내에서 전류의 최대값 평균 대 절삭력 최대값 평균의 비를 구하였다. 이를 이용하여 절삭력의 크기를 추정할

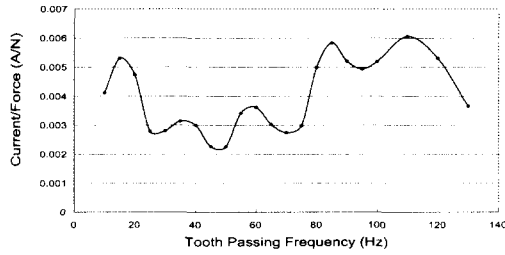


Fig. 8 Relationship between the current and the cutting force in the frequency domain

경우 오차는 10 % 이내에 있었다. Fig. 8은 얻어진 주파수 응답곡선으로 절삭력의 이물림 주파수에 대해 전류 대 절삭력의 비를 보여준다.

(3)의 연구에는 20 Hz의 대역폭을 가졌으며, (7)의 연구에서는 대역폭이 62 Hz이었으나, 본 연구에서 얻은 간접측정대역 범위는 실험에 사용된 공작기계가 구 모델임에도 불구하고, 125 Hz의 대역폭을 가졌다. 국내공구업체의 4날의 초경공구 T-ORS의 경우 다른 강재에 비해 빠른 절삭속도로 가공이 가능한 스테인레스강의 추천절삭조건은 직경 10 mm인 공구의 경우 절삭속도가 1600 rpm, 이송속도 200 mm/min이며, 직경 20 mm인 공구는 절삭속도가 800 rpm, 이송속도 240 mm/min이다⁽¹⁰⁾. 본 연구에서 얻은 간접측정대역을 4날 공구의 절삭속도로 환산하면 1875 rpm으로 현장 사용범위를 증가하는 것으로 현장적용이 충분히 가능하다 할 수 있다.

5. 정지모터전류로부터의 절삭력 추정

5.1 정지모터전류의 패턴분석

정지상태에 있는 모터는 운동이 없도록 명령받고 있는 상태이므로 외란에 의한 운동이 없을 경우라면, 전류는 '영'이어야 한다. 그러나 외란에 의한 회전이 존재함에 따라 위치를 '영'으로 유지하려는 제어를 수행하게 되고, 이에 따라 전류도 변화되기 때문에 전류는 모터의 회전과 직접적인 관련을 가진다. 그러나 이송 시와는 달리 모터가 정지하고 있는 상태에서 외란을 받기 때문에 모터의 미소한 회전은 일정하지 않으며, 마찬가지로 전류 또한 다양한 패턴을 가지게 된다.

가공면에 일정한 크기의 절삭력을 받을 때 나타나는 전류 레벨의 패턴을 결정짓는 요소는 절삭전의 초기전류와 절삭시의 전류레벨 변화이다. 이로

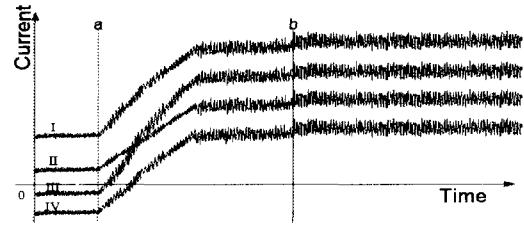
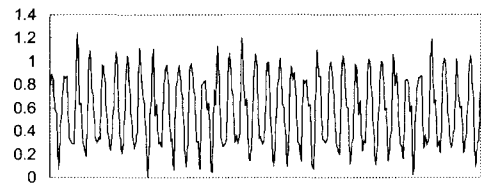
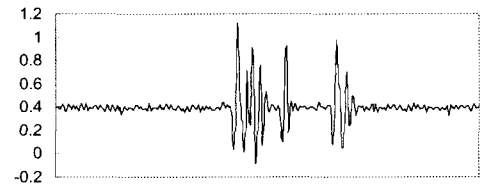


Fig. 9 Patterns of the current level in the cross-feed direction

a : The moment when cutter engages
b : The moment when cutting state is stabilized



(a) Case I : The current is similar in behavior to the cutting force



(b) Case II : The current intermittently shoots

Fig. 10 Current behaviors from the stationary motor the steady cut.

인하여 발생하는 패턴은 총 네 가지로 그 경우는 Fig. 9에 개략적으로 나타내었다. a 시점 이전의 전류는 0으로 유지되어 있지 않고 -1.5부터 1.5A 사이에 임의로 존재하였으며, 절삭 시에는 이 값을 기준으로 변화하였다. 따라서 같은 절삭조건에 대해 이송계가 같은 운동을 하더라도 초기전류의 위치에 따라 절삭시의 전류 레벨이 다르게 나타났다. 이로 인하여 매 순간의 전류가 시간지연만큼 이전의 절삭력을 반영하는 이송모터의 경우와는 달리 정지모터의 경우에는 초기전류를 고려해야 하며, 따라서 절삭 직전부터의 신호를 모두 필요로 하게 된다.

정지모터의 전류는 레벨뿐만 아니라 동적인 거동에서도 두 가지의 패턴을 가졌다. Fig. 10는 정상상태 절삭에서의 전류 거동을 보여준다. (a)는 전류의 거동이 절삭력과 같은 형태를 가지는 경우이며

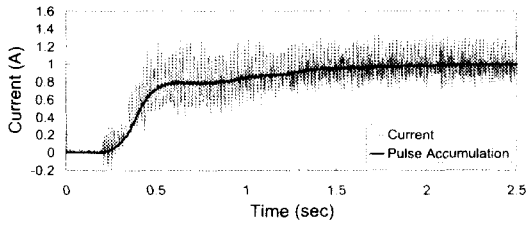


Fig. 11 Current behavior of the stationary motor and the pulse accumulation of the motor encoder

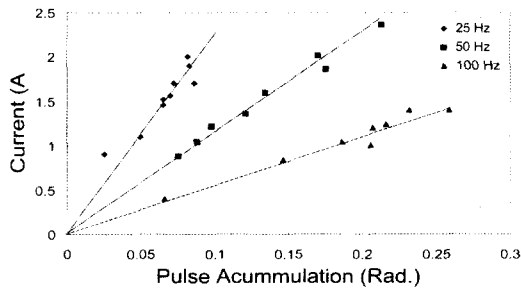


Fig. 12 Relationship b/w the current and the pulse accumulation for the cutting forces with the same magnitude (750 N) and the different frequencies

이물림 주파수가 50 Hz인 750 N의 절삭력을 받을 때이다. (b)는 75 Hz의 이물림 주파수를 가진 같은 힘으로 절삭할 경우이며, 간헐적으로 전류 변화가 크게 발생하였다. 이러한 패턴이 생기는 원인은 엔코더 신호로부터 확인할 수 있었다. 모터의 미소회전이 활발한 경우에는 (a)의 형태를 가졌으며, 그렇지 않고 간헐적으로 회전하는 경우는 (b)의 형태를 가졌다. 이와 같은 전류의 동적 거동은 평균값으로 처리하여 추정오차는 다소 커지지만 일관성을 확보하고자 하였다.

5.2 정지모터의 전류와 모터의 미소회전

정지상태로 제어되고 있는 모터의 거동을 살펴 보면, 외란으로 인하여 모터가 회전하게 될 경우 이를 원위치로 제어하며 그때의 토크는 다음의 모터회전이 있을 때까지 유지되는 것을 볼 수 있다. 이는 모터 회전량의 적분치로부터 적분구간동안의 토크의 변화량을 알 수 있음을 의미하고, 또한 토크와 전류의 선형관계를 고려하면 회전량의 적분치와 전류변화량이 관계를 가질 수 있음을 의미한다.

이러한 관계는 식 (1)에서 위치명령 (θ_{cmd})을 '0'으로 두었을 때의 결과와 관성특성을 무시했을 때의 식 (2)에서 다음의 과정을 통해 유도될 수 있다.

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

$$\frac{1}{s} \theta = -\frac{R(s)}{sH(s)+K} T_m = -\frac{R(s)}{sH(s)+K} K_t I_q \quad (6)$$

Fig. 11은 정지상태 모터의 전류와 회전자 위치의 적분치를 나타낸 것으로, 0.2초부터 절삭이 시작되며 초기전류가 0이 되도록 신호를 읊셋하고 회전량의 적분치는 5.6배하였다. Fig. 12은 750 N으로 크기가 일정한 절삭력에 대해 주파수를 변화시키면서 얻은 결과이다. 이로부터 전류와 모터 회전량의 적분치 사이에 선형관계가 성립하며 주파수 응답특성을 지닌 것을 알 수 있다.

5.3 정지모터전류와 절삭력의 관계

식 (6)으로부터 회전량의 적분치와 전류의 관계와 함께 정지 시의 외란과 회전의 관계를 알 수 있다. 따라서 이들을 통해 정지 시에도 전류와 외란과의 관계가 유지되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이송 시와는 달리 회전량의 적분치가 매개되어야 하는 것은 정지 모터의 특성임을 알 수 있다.

정지상태로 제어되고 있는 모터가 외란에 반응하는 것은 외란에 의해서 위치에 오차가 발생했을 때이다. 따라서 외란에 의해 위치가 변하고 이로 인하여 위치를 복귀하기 위해 외란의 크기만큼 구동 토크가 발생하게 된다.

정지상태의 외란은 절삭력과 함께 정지 마찰이 있다. 정지마찰은 접촉면 사이의 움직임에 대한 저항으로 표현할 수 있으며 일정 크기 이상의 구동력이 들어와 정지 상태가 무너지면 정지마찰력도 급격히 줄어든다. 정지 시의 전류가 절삭력과 정지마찰을 반영하고 있으므로, 전류에서 정지마찰의 영향이 일정하다고 가정하면 전류로부터 절삭력을 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주파수와 절삭력의 크기를 변화시켜가며 전류를 측정하였다. Fig. 13은 30 Hz에서 얻어진 결과를 보여준다.

Fig. 13에서 절삭전의 초기전류가 양인 경우와 음인 경우 양상이 서로 다름을 볼 수 있다. 이는 초기 전류에 의한 토크로 인해 이송계가 정지상태에서 비틀림이 걸려있고, 이 중 초기전류가 음의 값인 경우에는 비틀림 양만큼의 회전은 구동토크에 영향을 미치지 않기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 13

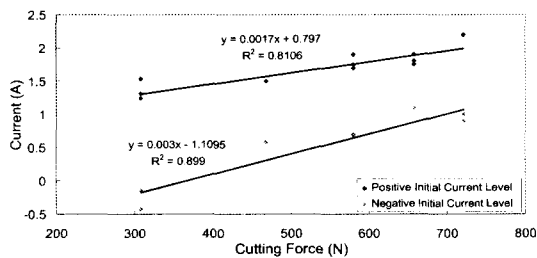


Fig. 13 Relationship between the standstill motor current and cutting force at 30 Hz of the tooth passing frequency

으로부터 정지모터의 전류로부터의 절삭력 추정오차는 약 150 N이내임을 알 수 있다. 이러한 오차는 정지모터의 거동이 접촉면의 상태에 따라 변화가 심하고 미소회전에 대한 엔코더의 분해능과 관련이 있음을 분석을 통해 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 이송모터 전류로부터 절삭력을 추정할 수 있는 주파수 대역폭이 기존의 연구에서 제시한 수준보다 확대될 수 있음을 실험을 통하여 제시하였다. 또한 본 연구에서 제시한 간접측정대역의 수준은 현장 적용이 충분히 가능한 범위에 있었다. 이와 함께 이송모터 전류에서 나타나는 특이 거동을 조사하였으며, 이러한 거동 또한 절삭력과 관계에서 일관성을 가지고 있었기 때문에 절삭력 간접측정이 가능함을 알았다.

한편 현재까지 모터 전류를 통한 절삭력 추정에서 배제되어왔던 정지모터의 전류에 대한 연구를 수행하였다. 이로부터 정지모터의 전류의 다양한 거동을 조사하였으며, 이들과 모터 회전과의 관계를 규명하였다. 또한 절삭력과 관계를 조사한 결과 절삭력의 주파수 및 크기에 따라 정지모터의 전류 거동이 다름을 실험결과로부터 제시하였다. 정지모터 전류로부터 어느 정도의 오차를 가지지만 절삭력의 추정가능성을 확인하였고, 최근의 고분해능의 엔코더를 활용하면 오차수준이 상당부분 줄어들 것으로 예상할 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구과제

(1999-2-31500-002-3)의 연구비 지원에 의한 연구결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. L. Stein, D. Colvin, G. Clever, C. -H. Wang, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, pp. 279-288, 1986.
2. J. L. Stein, C. -H. Wang, "Analysis of Power Monitoring on AC Induction Drive Systems," J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 239-248, 1990.
3. Y. Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements," J. Engineering for Industry, Vol. 114, pp. 386-392, 1992.
4. J. M. Lee, D. K. Choi, J. Kim, C. N. Chu, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," Annals of the CIRP, Vol. 44/1, pp. 59-62, 1995.
5. 김태용, 최덕기, 주종남, 김종원, "이송모터 전류 감시를 통한 절삭력의 간접측정과 절삭공정 감시 및 제어에의 응용," 한국정밀공학회지, 제 13 권 제 2호, pp. 133-145, 1996.
6. T. Kim, J. Woo, D. Shin, J. Kim, "Indirect cutting force measurement in multi-axis simultaneous NC milling processes," Inter. J. Machine Tools & Manufacturing Vol. 39, pp. 1717-1731, 1999.
7. G. D. Kim, C. N. Chu, "Indirect Cutting Force Measurement Considering Frictional Behaviour in a Machining Centre Using Feed Motor Current," I. J. Advanced Manufacturing Technology, Vol. 15, pp. 478-484, 1999.
8. 윤승현, "절삭력 간접측정을 이용한 엔드밀링의 절삭력 적응제어," 포항공과대학교 기계공학과 석사학위논문, 1999.
9. Tae Jo Ko, Dong Woo Cho, "Adaptive Optimization of Face Milling Operations Using Neural Networks," J. Manufacturing Science and Engineering, Vol. 120, pp. 443-451, 1998.
10. Y.G-I 종합 Catalogue, 주식회사 양지원 공구.