

엔드밀 공정에서 최대 절삭력 제어 (Peak force control in the milling process)

김홍겸(숭실대학원), 이건복(숭실대학교)

Hong Gyum Kim(Graduate School, Soongsil Univ), Gun Bok Lee(Soongsil University)

Key Words : Cutting Force(절삭력), Cutting Speed(절삭속도), FeedRate(이송속도), Depth of Cut(절삭깊이), VCVS(voltage controlled voltage source)

ABSTRACT

Generally, main factors of tool damage are cutting speed, feed rate and depth of cut. The increase of those factors can cause tool breakage or worsen product quality such as machining accuracy deterioration. Those three factors are concerned with cutting force. Cutting force reaches at its maximum value when cutter blade cuts away the object directly, and it is the time when tool damages are at high probability. In this study, we detect the maximum cutting force affecting tool damage and control the maximum cutting force based on the measured peak force.

1. 서론

공작기계에서 공구의 수명은 생산성과 경제성의 문제에 크게 연관된다. 또한 고속화, 정밀화 과정에서 공구의 수명 및 상태는 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 가공 조건을 변경하여 공구의 수명을 연장시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[1]

일반적으로 공구손상에 영향을 미치는 절삭조건은 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이 순서로 커지게 되고, 위 세 가지 요소가 증가하면 증가할수록 공구의 손상은 커지고, 이는 생산성, 경제성, 정밀성에 커다란 영향을 미치게 된다.

또한 공구의 마모 및 손상은 절삭력이 최대일 때 가장 심하므로 공구의 최대 절삭력을 능동적

으로 제어함으로써, 공구의 수명 및 가공의 정도 등을 개선할 수 있다.

본 연구는 엔드밀의 절삭 공정 시 발생하는 절삭력의 피크치를 실시간으로 측정하는 알고리즘을 개발하고, 이를 토대로 제어기를 설계함으로써 공구의 손상에 가장 큰 영향을 주는 절삭력 피크치를 능동적으로 제어하여 공구의 수명을 향상한다.

2. 동적 절삭 모델링

2. 1 실험 장비

Fig 1은 데이터를 얻고, 제어할 수 있도록 구성된시스템이다

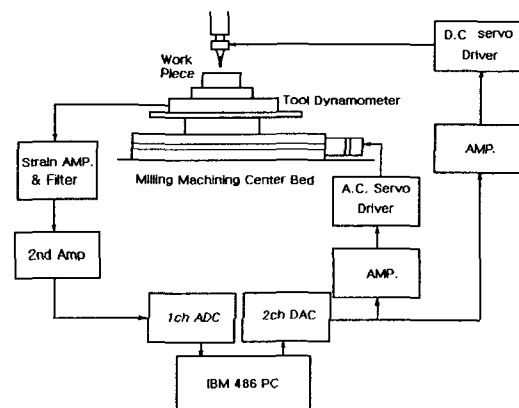


Fig. 1 Schematic Diagram of Control Configuration for Data Acquisition and Control System

절삭력은 다이내모 미터에서 측정이 되고, 측정된 절삭력은 스트레인 앰프에서 증폭이 됨과 동시에 필요 없는 주파수 성분을 제거하기 위하여 300Hz의 차단주파수로 필터링을 하게 된다. 또한 증폭된 신호를 A/D 컨버터의 측정 범위에 맞게 조정하기 위하여 OP-Amp를 이용한 2차 증폭 회로를 구성하여 A/D 컨버터의 측정 전압 범위에 맞도록 증폭을 실시한다. 입력으로 들어갈 이송 속도는 D/A 컨버터를 사용하여 아날로그 전압으로 변환한다. 변환된 신호는 AC서보 드라이버의 제어 입력 범위에 맞추기 위하여 증폭을 한다. 증폭된 신호는 AC서보 드라이버를 통하여 주축을 구동하게 된다. 고속 제어를 위하여 절삭력 측정, 제어신호 갱신 및 출력은 1ms의 샘플링 시간으로 설정하였다. 절삭력은 12bit의 해상도를 가지고 있는 A/D 컨버터에서 측정된 값을 그대로 사용하였고, 실제 절삭력과 비례적인 값이다.

2. 2 실험 및 모델링

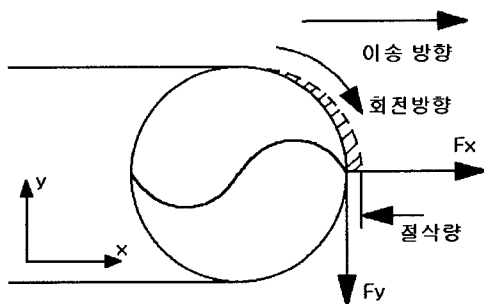


Fig. 2 Schematic diagram of the cutting geometry model

Fig 2는 엔드밀 절삭을 단순화한 그림이다.

그림과 같이 엔드밀 절삭 가공에서 발생하는 절삭력은 공구날의 회전에 의한 절삭 성분과, 이송에 의한 성분, 그림 상에서 지면 방향의 절삭 깊이에 따른 성분이다.

이러한 각각의 요소는 각 축에 대한 분력 F_x , F_y , 지면의 윗 방향으로 발생하는 F_z 의 성분으로 나타나게 된다. 이러한 X, Y, Z축의 분력의 합력이 공구에 실제로 가해지는 절삭력이고, 이러한

절삭력에 의하여 공구는 마모가 된다.

이중 플랫 엔드밀의 경우 X축, Y축, Z축의 절삭력 중 Y축의 절삭력인 F_y 가 가장 크다. 따라서 이송속도 입력에 대한 절삭력 출력의 시스템 모델링을 위하여 신호대 잡음비가 가장 좋은 Y축의 절삭력을 측정하고, 그 신호의 피크값을 절삭 공정 시 최대 절삭력의 시간 영역 모델링을 하기 위하여 시간 영역에서 절삭과, 절삭후 신호 처리 부분을 통합한 데이터를 얻고 그 응답을 기준으로 모델링을 하였다.

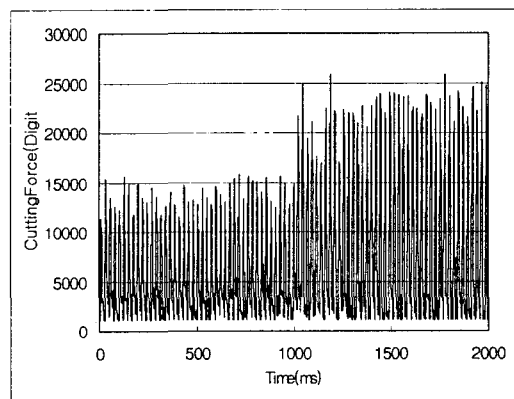


Fig. 3 Y-axis Cutting Force Signal in Milling Process(Step Response)

Fig. 3은 단위 계단 입력을 주었을 때 측정된 절삭력이다. 이송속도를 1000ms에서 0.9mm/s에서 2.8mm/s로 갑자기 변화시킬 때의 절삭력을 측정하는 것이다. 절삭력은 주축의 회전 속도에 따라, 무수히 많은 최대 절삭력이 발생을 하게 된다.

측정된 데이터의 절삭력이 최고인 값을 연결하여 모델링을 하였다. 모델링한 결과 (1)과 같은 전달 함수를 유도하였다.

$$G_p(s) = \frac{1.2e^{-0.036s}}{0.09s+1} \quad (1)$$

Fig. 4는 8Hz의 저역 통과 필터를 구성하여 절삭력을 측정하는 결과이다. 필터에 의하여 응답의 동특성이 변화하였으므로 1ms의 짧은 샘플링 타임으로는 수집해야 할 데이터가 너무 많아지므로

5ms의 샘플링 타임으로 설정을 하고 5000ms에서 이송 속도를 0.9mm/s에서 2.9mm/s로 갑자기 변화시키고, 절삭력을 측정하였다.

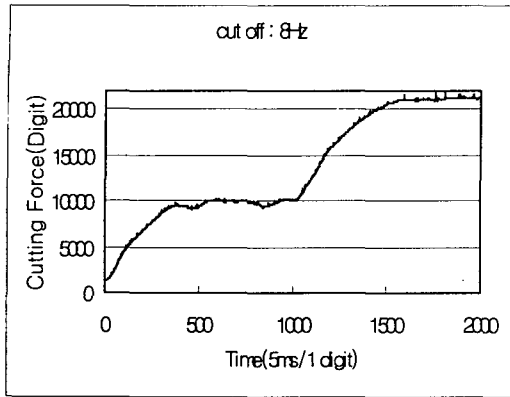


fig. 4 Y-axis Average Force Signal by 8Hz 2nd Order Butterworth VCVS Low-Pass-Filter

이 시스템의 전달함수는 다음과 같이 유도하였다.

$$G_p(s) = \frac{2.09 e^{-0.171s}}{1.538s + 1} \quad (2)$$

이상과 같이 피크치와 평균치의 신호의 전달함수를 유도하여 비교해 본 결과, 최대 절삭력에 의한 시스템 모델링이 평균치에 비하여 필터 동특성의 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 제어기 설계 및 실험

제어기 설계는 Ziegler-Nichols가 제안한 PID 튜닝 룰을 사용하여 PI 제어를 실시하였다.

Fig. 5는 PI 제어기의 블록 선도이다. 출력은 절

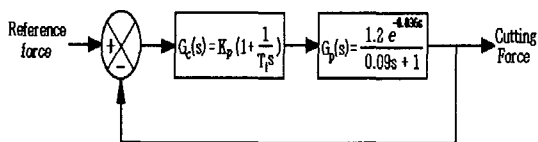


Fig. 5 Block Diagram of Closed-Loop Control System

삭력이고 기준 입력은 재료에 따른 안전율을 고려한 적절한 권장 절삭력이다. 이 실험에서는 임의의 기준 입력을 주고 기준 입력에 추종을 하는 것을 확인한다.

실시간으로 측정하게 되는 피크 절삭력을 제어하기 위하여 Ziegler-Nichols가 제안한 PID 튜닝 룰을 사용하였다. $K_p = 2.25$ 이고, $T_i = 0.12$ 로 설정을 하였다.

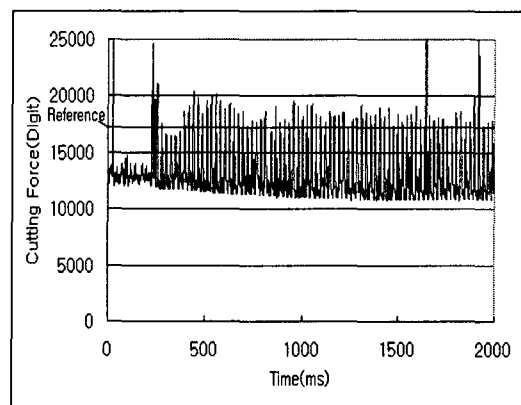


fig. 6 Raw Controlled Cutting Force Signal (Reference = 17000)

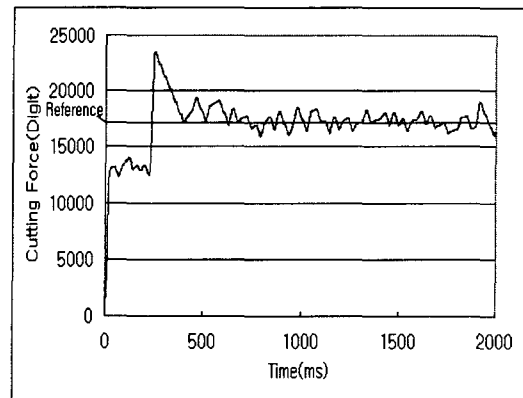


fig. 7 Signal Processed Peak Cutting Force (Reference = 17000)

Fig. 6은 PI 제어기로 제어된 실제 데이터이다. 실제 절삭한 데이터는 절삭의 환경에 따라서 짧은 순간에 급격하게 증가하였다 사라지는 값이 나타나는데, 이는 피크 절삭력의 관점으로 보면 잡음으로 볼 수 있으므로 소프트웨어 상에서 이

러한 신호는 제거를 한다. Fig. 7은 Fig. 6에서 측정된 데이터를 실시간으로 신호처리를 한 결과로서 절삭이 없이 진행하다가 갑작스러운 절삭에 의하여 절삭량이 기준 입력 이상으로 증가하나 매우 짧은 시간에 절삭 피크치가 기준 입력에 추종하는 것을 볼수가 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 기준 입력을 다르게 하여 제어 수행한 결과로 마찬가지로 기준 입력에 대하여 절삭력의 최대치를 일정한 수준으로 유지시킴을 알수 있다

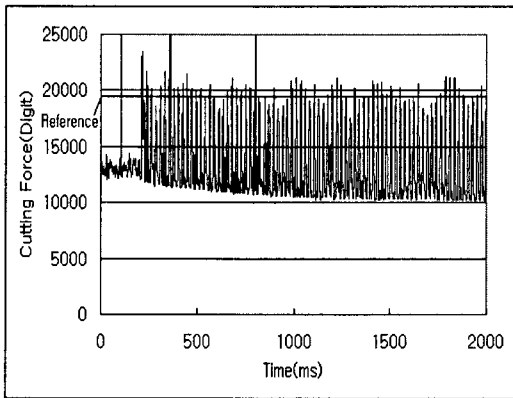


fig. 8 Raw Controlled Cutting Force Signal
(Reference = 19000)

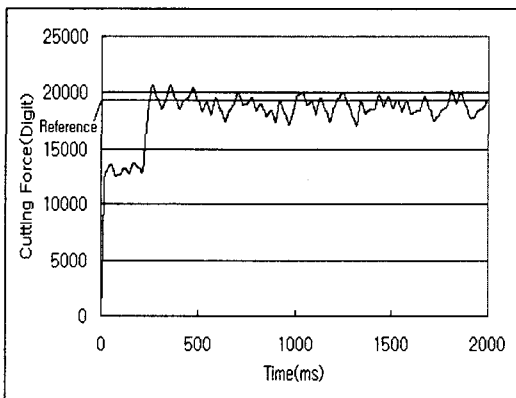


fig. 9 Signal Processed Peak Cutting Force
(Reference = 19000)

3. 결론

기존의 필터를 사용하거나, 이동 평균치를 사용한 제어 방법을 사용하지 않고 최대 절삭력을 실

시간 측정하여 피드백 제어를 실시한 연구를 통하여 다음과 같은 결론은 제시할 수 있다.

1. 최대 절삭력을 이용한 모델링을 수행함으로써, 공구의 마멸 및 파손에 큰 영향을 주는 최대 절삭력을 효율적으로 제어할 수 있었다.
2. 최대 절삭력을 이용한 모델링으로 필터나 알고리즘에 의한 모델의 성능 저하를 배제하여 PI 제어기만으로 동역학적 특성이 복잡한 CNC 머신에서 설정된 기준 절삭력을 효율적으로 추종함을 확인할 수 있었다.
3. 최대 절삭력으로 유도된 모델은 평균치에 의하여 유도된 모델에 비하여 응답이 매우 빠르므로 공구에 걸리는 과도 절삭력을 신속하게 제거함으로써 공구가 손상을 입을 수 있는 요인을 줄인다.

5. 참고문헌

[1] 박희범 외, “볼랜드밀 가공에서 형상 정밀도에 미치는 공구마멸의 영향”, 한국 공작기계학회 춘계 논문집 2000. 4.

[2] 허건수, 김재욱, “추정된 절삭력 신호를 이용한 절삭력 제어”, 한국정밀공학회 춘계 논문집 (I), 1999. 5.

[3] 손대홍, 이진복, “밀링 공정에서 주축속도가변에 의한 절삭력 적응제어”, 한국정밀공학회 춘계 논문집 (I), 1998. 11.

[4] 이기용 외, “절삭력 신호에 의한 공구 런아웃의 온라인 감시”, 한국정밀공학회 춘계 논문집 (I), 1998. 11.

[5] 김성청, 이응석, 김형근, “엔드밀 가공에서의 절삭력 모델링에 관한 연구”, 한국 공작기계학회 춘계 논문집 2000. 4.

[6] Katsuhiko Ogata, “Modern Control Engineering”, Prentice-Hall International, Inc, pp669-678, pp317-400