

엔드밀 공정에서의 신호처리에 따른 제어모델에 관한 연구 (Study on Control Model Based on Signal Processing In End-Milling Process)

양우석(숭실대학교 대학원), 이건복(숭실대학교)

Woo Seok Yang(Graduate School, Soongsil Univ), Gun Bok Lee(Soongsil University)

Abstract

This work describes the modeling of cutting process for feedback control based on signal processing in end-milling. Here, cutting force is used to design control model by a variety of schemes which are moving average, ensemble average, peak value, root mean square and analog low-pass filtering. It is expected that each model offers its own peculiar advantage in following cutting force control.

Key Words : cutting process, signal processing, cutting force control

1. 서 론

산업에 사용되고 있는 가장 일반적인 금속절삭 공정의 하나가 엔드밀링 공정이다. 특히 금형이나 항공부품 제작에 있어서는 그 정밀도가 중요하기 때문에 엔드밀을 통한 고정도 가공을 이루어야 한다. 엔드밀 가공에 있어서 가공표면 거칠기에 영향을 미치는 인자는 공구가 직접 공작물을 절삭하는데 관계하는 절삭력과 공구가 경로를 따라 이송되어 나갈 때 발생하는 이송에 의한 절삭력에 의해서 좌우되며, 이외에 일회 절입량에 따른 절삭깊이 등이 영향을 미치게 된다. 절삭력은 주축의 회전속도와 이송모터의 회전속도에 의해서 발생하는 토크에 관계되며, 이를 모델링하여 절삭력을 제어하고자 하는 시도가 이루어져 왔다. 선행연구자로서 이기용 등에 의해 절삭력 신호의 감지를 통해 공구 런아웃의 온라인 감시를 시행하여 절삭력과 표면 거칠기와의 관계를 규명한 바 있다. 또한 하건호 등에 의해 고속가공시

동적모델에 의한 표면형상의 예측이 수행된 바 있으며 손대홍이 주축속도와 이송속도를 각각 변화시켜 가면서 이에 따른 절삭력의 변화를 모델링하여 적응제어기법을 도입하여 절삭력 제어를 시행한 바 있고, Lee는 드릴의 기하학적 형상을 고려하여 드릴공정의 모델을 개발하고 드릴의 위치에 따라 변화하는 기준절삭력을 추종하도록 하는 선형모델 추종제어(Linear Model Following Control)를 수행하였다.

엔드밀에서의 절삭력이 표면조도에 미치는 영향에 관하여 이와 같은 많은 연구가 진행중이며 그 중 절삭과정의 다이내믹스를 모델링하는 많은 방법들이 제시되어지고 있고, 이를 통해 절삭력을 제어하려는 시도들이 이루어지고 있다. 그래서 본 논문에서는 이 중 주축속도가 일정한 상황에서 이송속도의 변화가 절삭력에 미치는 영향을 다양한 방법으로 모델링 하여 이후 절삭력제어기 설계를 위한 기초연구로 삼고자 한다. 이 논문에서는 절삭력의 신호를 수집하여 이 중 피크치(Peak Cutting Force)와 RMS, Ensemble average 등을 디지털 필터링, 아날로그 필터링을 통하여 신호처리한 이후 동적 모델링을 수행할 것이다.

2. 실험 장치

Fig. 1 은 실험방법에 대한 개략도이다. 실험을 위해 CNC 밀링 머시닝센터(Machining Center)를 사용하였으며, 머시닝 센터 베드 위에 구입한 X-Y테이블을 장착하였으며 테이블 위에 공구동력계를 장착하여 절삭력을 측정하였다. 공작물의 이송은 공작물을 X-Y테이블에 올려진 공구동력계에 장착하여 D/A변환기(Digital to Analog Converter)와 X-Y테이블의 구동드라이버 입력단자를 연결하여 이송하였다. 절삭력은 공구동력계

로부터 출력되는 신호가 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 컴퓨터로 받아들이기 전에 Cut-off Frequency 150Hz인 Analog Low-pass필터를 사용하여 데이터를 Filtering 하였으며, 이후 Filtering된 데이터를 스트레인 증폭기와 Op-Amp를 이용하여 증폭후 A/D변환기(Analog to Digital Converter)로 받아들였다.

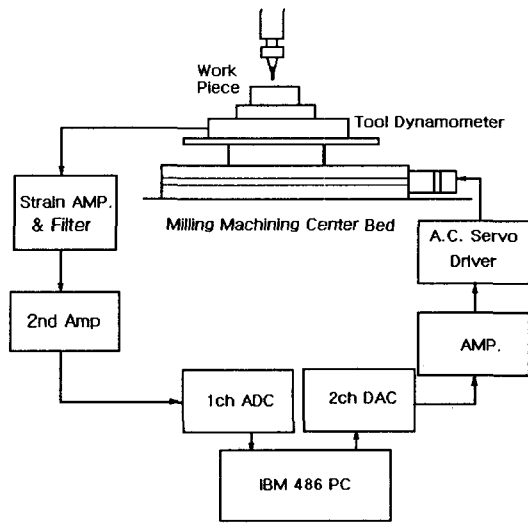


Fig. 1 Schematic diagram of CNC machine for data acquisition and control system

3. 실험

실험은 주축속도를 일정하게 (2500 RPM)고정한 상태에서 머시닝 센터의 X축 방향으로 X-Y 테이블을 이송시키며 반복 수행했다. 이 반복 수행된 RAW 데이터는 다음과 같은 신호처리와 필터링 과정을 통해 가공한다.

- ① RAW Data의 Moving Average 검출 (Fig. 4)
- ② Moving Average에서의 Peak Cutting Force 검출 (Fig. 5)
- ③ Analog Filter를 통과한 데이터 검출 (Fig. 6)
- ④ RAW 데이터의 Ensemble Average 검출 (Fig. 7)
- ⑤ RAW 데이터의 RMS(Root Mean Square) 검출 (Fig. 8)

Fig. 2는 주축속도를 2500RPM으로 고정하고 이송속도를 계단입력으로 주어 그에 대한 응답을 공구동력계로부터 얻은 실제 절삭력 데이터이며 Sampling 주기는 1msec로 설정하였다.

절삭에 사용한 공구는 2날짜리 Flat-end mill을 사용하였으며 공구의 기하학적 형상에 의해 자체적으로 발생한 주파수 스펙트럼은 Fig.3에서 보여지는 바와 같이 42Hz 와 84Hz 근처에서 스펙트럼을 형성한다. Peak치들을 검출하기 위하여 Fig. 2에서 보여지는 랜덤 노이즈의 영향들을 억제하기 위하여 Moving Average(이동평균)를 취하여 Fig. 4에서 보여지는 형태의 데이터들을 추출하였다.

Moving Average를 통하여 추출된 데이터를 Peak치 검출 algorithm을 통하여 신호처리를 수행하였고, 그 결과는 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 나타내어진다.

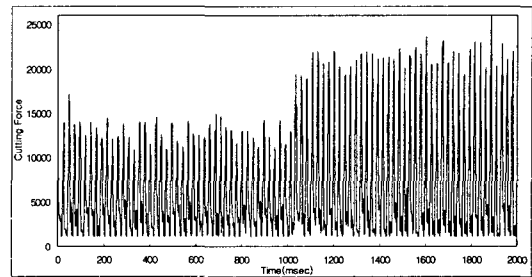


Fig. 2 Raw Cutting Force Signal in Milling

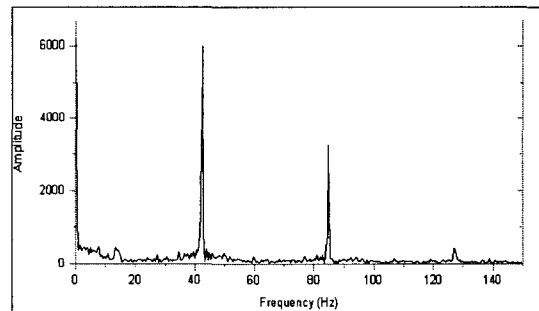


Fig. 3 Cutting Force FFT

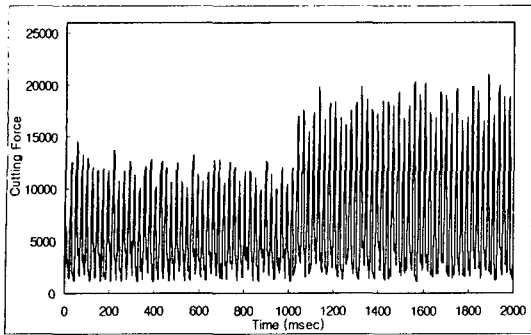


Fig. 4 Moving Averaged Cutting Force Signal in Flat-end Milling Process

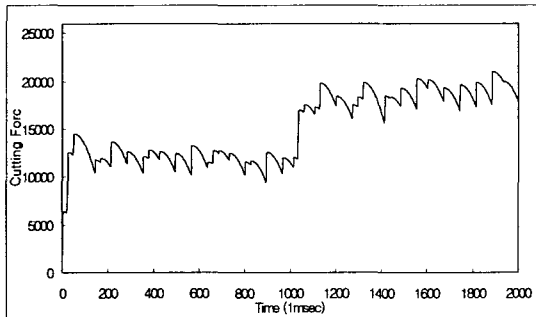


Fig. 5 Peak Cutting Force Signal in Flat-end Milling Process

검출된 피크치의 평균데이터를 얻기 위하여 8Hz의 Cut-off Frequency를 갖는 2nd Order Butterworth VCVS Low-Pass-Filter를 통과시켜 고주파성분을 억제하고, Sampling 주기는 5msec로 설정하여 데이터를 추출한 결과가 Fig. 6과 같다.

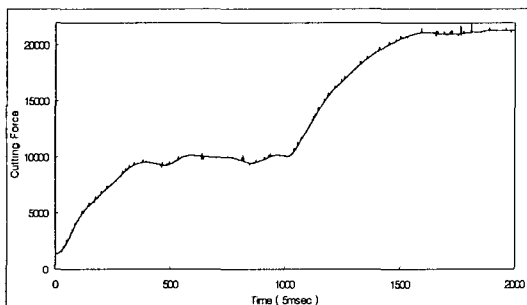


Fig. 6 Averaged Cutting Force by 8Hz 2nd Order Butterworth VCVS Low-Pass-Filter

Ensemble Average 데이터를 얻기 위하여 데이터를 200개씩 Averaging하였고 Sampling 주기는 1msec로 설정하여 얻은 데이터가 Fig. 7에서 보는 바와 같다.

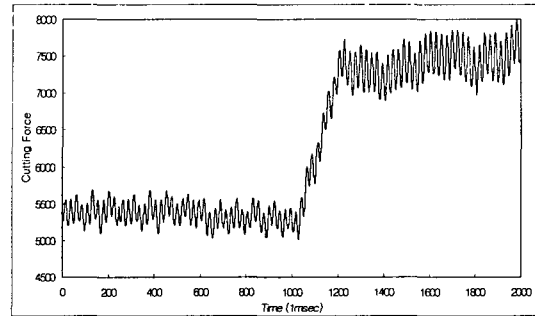


Fig. 7 Ensemble Averaged Cutting Force Signal

RMS평균을 얻기 위하여 50개씩의 데이터를 RMS방법에 따라 Averaging하였고 Sampling 주기는 1msec로 설정하였다.

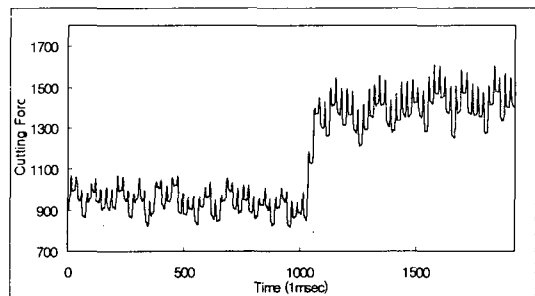


Fig. 8 Cutting Force Signal by Root Mean Square

4. 모델링

절삭공정에 관해서는 다양한 모델링작업이 이루어져 왔다. 이송력에 따른 절삭력의 변화를 제어하고자 할 때 그 모델링은 제어 목적에 따라 다양하게 제시될 수 있으며 여기서는 다음과 같은 4개의 모델링 방법을 제시한다.

- ① Peak Cutting Force검출에 따른 모델링 (Fig.5)
- ② Analog Filter에 의한 평균치 모델링 (Fig. 6)

③ Ensemble Average 검출에 의한 모델링
(Fig. 7)

$$K_s = 2.09 \quad \tau_k = 0.169 \quad \tau_s = 1.54$$

④ RMS 검출에 의한 모델링
(Fig. 8)

첫 번째 모델은 절삭과정에서 절삭력 데이터 중 피크치를 제어하고자 하는 경우에 적용되는 모델이다. 피크치 제어가 수행되는 경우는 절삭날이 공작물과 접촉하는 순간 발생하는 가장 큰 절삭력을 제어하는 모델로서 과도한 절삭력의 분포를 억제하고 절삭력의 경향 자체를 이 피크치를 통해 제어하고자 할 때 적용된다.

이 모델은 Analog Filter에 의해서 신호처리를 실시하여 데이터를 가공한 이후 절삭력의 경향을 컨트롤하기 위한 모델링작업을 수행하여 얻어낸 모델이다. 이 모델에서는 필터의 노이즈와 필터 자체의 동적 다이내믹스가 함께 포함되어 들어감에도 그 데이터들이 일차 시스템으로 근사화 될 수 있음을 Fig. 6.를 통해 확인할 수 있다.

두 번째 모델은 랜덤 노이즈 등을 포함한 절삭력 데이터의 분포를 아날로그 필터를 통해 신호처리 하여 절삭력의 분포 경향을 제어하고자 하는 경우 수행될 수 있는 모델링이다.

③ Ensemble Average 검출에 의한 모델링

$$K_s = 1.39 \quad \tau_k = 0.315 \quad \tau_s = 0.17$$

세 번째 모델은 절삭력 데이터들을 소프트웨어적인 방법으로 산술평균을 내어 그 평균치의 경향을 제어하는 모델이다.

이 모델은 직접적으로 데이터 자체의 변화에 소프트웨어적으로 접근한 것이다. 나타내어지는 데이터들을 산술평균을 내어 그 Moving Average 값을 이용하는 제어기의 플랜트 인식을 위해 쓰일 수 있다. 이 모델은 이 논문에서 수행되는 다른 어떤 모델보다도 계산속도가 빠르고 알고리즘이 간단하여 구현하기도 간편하며 응답지연시간도 다른 모델에 비해 가장 적다. 이 논문에서는 다른 모델링은 50개의 데이터를 평균치를 구하기 위해 사용되었다면, Ensemble Average는 200개의 데이터를 평균을 내어 적용하였고, 이에 τ_k 값이 0.315로 다른 모델에 비해 많이 커졌음을 알 수 있다.

네 번째 모델은 평균치중 RMS값을 통해 데이터를 신호처리 하여 이 RMS값을 제어할 때 적용될 수 있는 모델이다.

위의 4가지 모델의 경우 공통적으로 1차 시스템의 거동을 보이고 있고, 모두 Time Delay성분을 포함하고 있다. 일반적으로 1차 시스템인 경우 다음과 같은 형태의 모델을 한다.

$$P_s(s) = \frac{K_s e^{-\tau s}}{\tau_s s + 1}$$

① Peak Cutting Force검출에 따른 모델링

④ RMS 검출에 의한 모델링

$$K_s = 1.51 \quad \tau_k = 0.17 \quad \tau_s = 0.054$$

$$K_s = 1.2 \quad \tau_k = 0.036 \quad \tau_s = 0.09$$

이 모델은 절삭 공정에 있어서 공구가 절삭에 관계하는 중에서 가장 큰 Cutting Force를 제어하기 위한 모델이다. 이 피크치는 1회전당 2번의 최대 피크점을 갖게 만드는데 이는 고려하고자 하는 시스템의 자체 주파수 성분에 의한 것이다. 피크치만을 제어하고자 하는 컨트롤러를 설계할 경우 이와 같은 모델링을 통하여 시스템을 컨트롤러에 인식시킬 수 있다.

이 모델은 절삭력분포중 RMS값을 제어하기 위해 모델링 된 것이다.

② Analog Filter에 의한 평균치 모델링

위의 모델들은 모두 $e^{-\tau s}$ 의 응답지연항을 포함하고 있는데, 이는 Digital Filter는 연산과정중의 Delay, Analog Filter는 동적특성이 포함되어 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 이 $e^{-\tau s}$ 항에 의한 응답지연은 시스템의 딜레이 타임보다 훨씬 작은 값으로 무시 할 수 있는 수치이지만 보다 정확한 모델을 위해 고려의 대상으로 포함시켰다.

5. 결 론 & 향후연구목표

이 논문에서는 4가지의 모델에 관하여 모델링 하였다.

- Peak Cutting Force 모델
- Analog Filter에 의한 평균치 모델
- Ensemble Average에 의한 평균치 모델
- RMS 검출에 의한 평균치 모델

이 중에서 Peak Cutting Force검출은 절삭에 직접 관여하는 절삭날과 공작물의 Dynamics를 제어하는 경우에 유용하게 사용할 수 있을 것이며 Analog , Digital Filter에 의한 평균치 모델들은 절삭날과 공작물의 관계보다는 일정한 절삭력을 원하는 제어를 할 경우에 유용하게 사용할 수 있을 것이다. 이 중 RMS검출 모델이 가장 시정수가 작고 Analog Filter를 사용한 경우가 시정수가 가장 크게 나왔다. 이 중 Peak치 모델이 Time Delay가 가장 작은 값으로 나타났다.

RMS검출은 Ensemble Average에 비하여 적은 데이터의 평균을 가지고도 비슷한 평균효과를 보여주고 있다.

절삭력을 모델링하기 위한 다양한 시도 중에서 이 논문에서는 절삭력을 제어하기 위한 모델링의 방법을 제시하였다. 절삭력은 자체 주파수 성분과 함께 채터링 등의 영향 등에 의해서 그 데이터가 경향적인 분포를 나타내고 있으며, 이를 효과적으로 제어하기 위해 소프트웨어적인 방법을 이용한 통계적인 신호처리와 아날로그 필터 등을 통하여 신호처리과정을 수행한 방법 등을 통해 절삭력을 모델링 할 수 있고 제어 할 수 있다.

향후 연구목표로는 이 논문에서 제시한 각각의 모델에 대하여 제어를 구성하고 제어시스템의 성능을 분석하여 모델링의 적합성을 검토하고 이 모델을 컨트롤러에 인식시켜 절삭과정중 발생하는 다양한 제어목표에 대해 유연한 제어입력을 발생시킬 수 있는 컨트롤러를 구현하는 연구를 진행하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] 손대홍, 이건복, “밀링 공정에서 주축속도 가변에 의한 절삭력 적응제어”, 한국정밀공학회 춘계 논문집 (I), 1995, 5.

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

[3] 하건호 외, “고속가공시 동적모델에 의한 표면형상 예측”, 한국정밀공학회 추계 논문집 (I), 1998, 11.

[4] Katsuhiko Ogata, “Modern Control Engineering”, Prentice-Hall, pp137, pp150-154