

## 밀링공정에서 구동 액츄에이터에 의해 발생하는 외란 억제를 위한 제어 ( Controller Design for Disturbance Rejection Created By Driving Actuator in Milling Process )

양우석(숭실대학교 대학원), 심영복(숭실대학교 대학원), 이진복(숭실대학교)

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

### Abstract

This work describes reduction of disturbance created by driving actuator in milling process. To the end, controller includes disturbance dynamics. Experimently it is shown that steady disturbance can be rejected to a certain degree.

**Key Words** : filter, cutting force control, disturbance

### 1. 서 론

산업화의 진전과 더불어 기계가공에 있어서도 정밀도의 향상과 고속 가공의 필요성이 증대되어 지고 있다. 기계가공에 있어 주를 이루는 밀링머신을 이용한 가공에 있어서도 이러한 필요에 부각하기 위해 절삭에 관한 활발한 연구가 진행되고 있으며 그 추세도 좀 더 정밀한 제어기 설계를 필요로 하고 있다. 하드웨어 및 소프트웨어를 통하여 가공오차를 줄이며 가공조건의 결정 및 가공상태에 따른 진단 및 모니터링을 위하여 많은 정밀한 제어기 설계요구가 따르고 있다.

이런 목적을 달성하기 위하여 절삭과정의 다이나믹스에 대한 모델링을 이루려는 시도가 이루어졌으며 절삭과정의 모델링을 통해 제어기 설계가 이루어지고 있다. CNC 밀링 가공에 있어서 모델링의 주요 인자는 주축 회전 속도와 공구 이송속도이다<sup>(1)</sup>. 이 두 인자를 제어하기 위해서 먼저 관

심 있는 인자를 변수로 두고 각 인자의 변화에 따른 시스템 선형제어기 설계가 이루어졌다. 주축회전속도를 일정하게 하거나 공구 이송속도를 일정하게 놓고 절삭공정을 모델링 하여 제어기를 설계해 왔다.<sup>(2)</sup> 그러나 공작기계에 있어서 특히 밀링공정의 경우 가진 주파수에 의해 주요 절삭조건들이 결정되어 진다고 할 수 있다.

본 연구에서는 먼저 절삭이 일어나는 과정의 동특성 구조를 모델링하고 단위계단입력에 대한 응답을 주파수 스펙트럼 분석을 통하여 해석하고 절삭시 발생하는 진동항을 플랜트 내부에 포함시켜 모델링을 수행한다. 이후 모델링된 플랜트의 고차항을 소거하기 위해 필터를 설계하고 필터의 안정성을 검토하고 필터를 포함한 폐루프 제어 시스템을 구성하여 내부 진동항의 영향을 억제할 수 있음을 보이겠다.

### 2. 본 론

#### 2.1 절삭공정의 동적 모델링

본 연구에서 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 한다. 절삭시 공구 이송과 절삭에 의해 가공물을 절삭할 때 구동 액츄에이터에 의해 발생하는 외란이 절삭 동력학에 영향을 줄 수 있다는 것이다. 기존 선행 연구에서는 이러한 진동항들을 외란의 영향으로 간주하고 모델링을 수행하여 제어

기를 설계하였으나 본 연구에서는 이러한 항들이 절삭 동력학에 변화를 야기한다고 가정하고 실험을 수행한다.

### 1) 스텝입력에 대한 플랜트 응답 분석 및 모델링

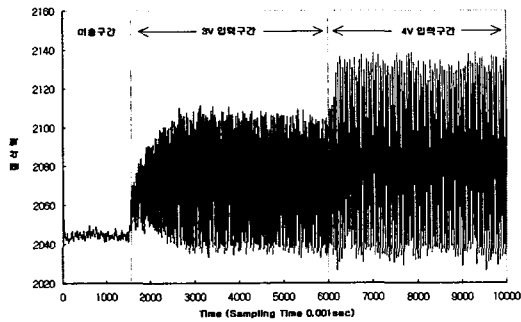


Fig. 2.1 Step Response of Cutting Dynamics

이송속도를 일정하게 하고 주축회전속도를 스텝입력을 주었을 경우 플랜트의 응답은 Fig 2. 1과 같고, 플랜트의 동특성은 1차로 간주할 수 있다. 1차 시스템의 기본적인 전달함수는 식 ( 2. 1 ) 과 같다.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

$\tau$  는 플랜트의 시정수이고  $K_p$ 는 플랜트의 게인이다.

데이터 분석을 통해  $\tau$ 와  $K_p$ 값을 얻을 수 있으며 그 값은 아래와 같다.

$$\tau = 0.315$$

$$K_p = 2$$

또한 데이터의 진동성분은 절삭공정시 주축입력의 회전에 의한 가진성분과 또한 절삭시 발생하는 공구 채터링이나 모터의 진동 등으로 야기되는 외란성분 이라고 가정할 수 있다.

## 2.2 주파수 스펙트럼 분석

### 1) 주파수 스펙트럼 분석

플랜트의 스텝응답을 Fourier Transform하여 주파수 스펙트럼을 분석해 보면 아래의 그림과 같다.

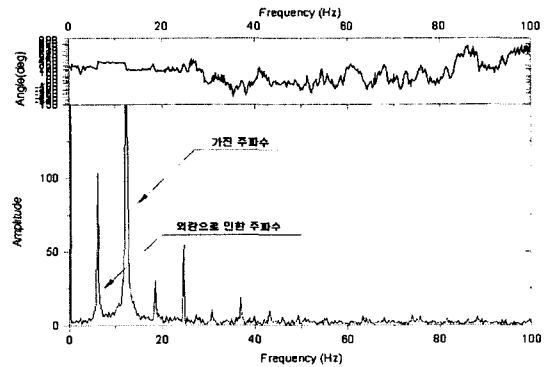


Fig. 2.2 FFT plot (720 rpm , 12Hz) reference input 밀링머신의 공구가 2날이기 때문에 공구형상으로 인하여 절삭시 가진 주파수는 주축회전속도에 의한 주파수 12Hz와 공구날에 의한 24Hz 성분이 나타난다.

또한 5.4Hz 부근에서 주파수 성분이 나타나는데 이는 공구절삭시 나타나는 채터링 및 모터 진동 등으로 야기되는 외란의 효과이다.

이 외란 등으로 인한 성분이 감쇠비  $\zeta$ 를 변화시킨 진동항으로 작용한다고 가정한다. 이러한 플랜트의 진동성분을 포함한 모델링은 아래의 식과 같다.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\tau s + 1} * \frac{\omega_p^2}{s^2 + 2\zeta\omega_p s + \omega_p^2} \quad (2.2)$$

### 2) 필터 설계

본 연구에서는 필터설계를 바탕으로 저주파 대역에서 검출되는 가진을 억제하고 제어 성능을 원활하게 구현할 수 있도록 제어기를 설계하는 것이다. 따라서 저주파 외란성분을 소거할 수 있

는 필터를 필요로 하며 필터 설계는 다음과 같이 한다.

$$G_{th}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_p s + \omega_p^2}{s^2 + 2\omega_p s + \omega_p^2} \quad (2.3)$$

분자항은 플랜트의 진동을 억제하는 성분이고 분모항은 필터 구현을 위해 첨가된 항이다.

진동성분의 변화는 질삭시 발생하는 질삭저항 등의 변화에 의해 플랜트의 감쇠비  $\zeta$  값이 변화하는데서 오는 것으로 모델링 하였다.

이후 실험을 통하여 이 가정의 타당성을 보일 것이다.

필터를 통과한 신호가 플랜트로 들어가는 액추에이터의 입력으로 작용하기 때문에 필터 출력신호의 안정성을 검토해 볼 필요가 있다.

### 3) 필터 응답 해석

필터 출력이 액추에이터 허용 입력값을 초과하거나 발산하게 되면 시스템은 불안정해 지게 된다. 따라서 필터 설계이후 그 응답을 시뮬레이션을 통해 고찰해 보았다.

필터응답은 1 Hz 저주파 성분과 18Hz성분의 구형파에 대한 출력을 시뮬레이션 하여 분석했다.

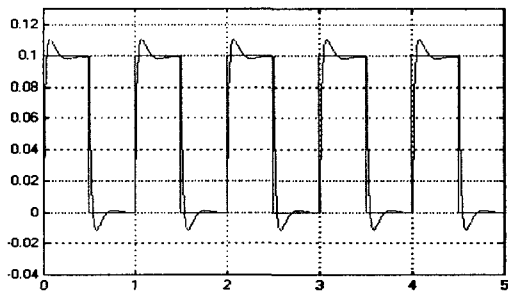


Fig. 2.3 Response of 1Hz Pulse Signal

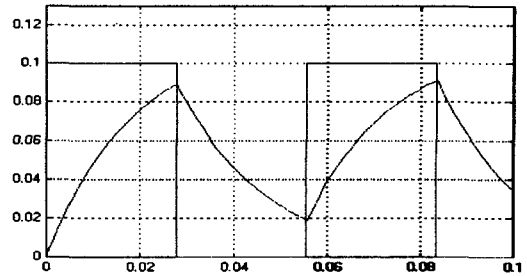


Fig. 2.4 Response of 18Hz Pulse Signal

## 2.3 제어기 설계

실험은 다음과 같은 단계로 수행한다.

- 1) 노치필터를 포함한 플랜트의 응답
- 2) 노치필터를 포함한 시스템의 제어기 설계

노치필터를 통과한 신호를 플랜트에 넣어 주어 그 결과를 분석하고, 필터설계의 적절성을 검토한다. 노치필터를 포함한 시스템의 블록선도는 Fig. 2.5와 같다.

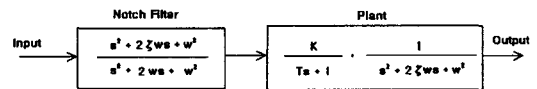


Fig. 2.5 System Block Diagram with Filter

다음으로 노치필터를 포함하여 시스템 전체에 폐루프를 구성하여 비례제어를 수행 비례제어 개인을 튜닝하여 준다.

제어 시스템의 블록선도는 Fig. 2.6과 같다.

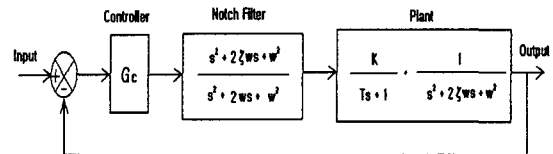


Fig. 2.6 System Block Diagram with Filter and Controller

위 시스템은 오프라인 상에서 스텝입력에 대한 응답의 주파수 분석을 통해 플랜트의 진동 주파수를 측정하고 계인을 기본 설계사양 값인 0.7로 가정하고 필터를 설계하여 계인값을 통해 제어를 수행한 시스템이다.

### 3. 실험 장치

Fig. 3.1 은 실험방법에 대한 개략도 이다. 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 공구동력계로부터 출력되는 신호가 많은 고주파 성분을 포함하고 있어 컴퓨터로 받아들이기 전에 Cut-off Frequency 80Hz인 Analog Low-pass 필터를 사용하여 데이터를 Filtering 하였으며, 이후 Filtering된 데이터를 스트레인 증폭기와 Op-Amp를 이용하여 증폭후 A/D변환기(Analog to Digital Converter)로 받아들였다.

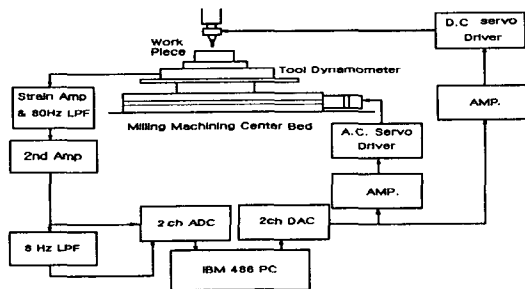


Fig. 3.1 Schematic Diagram of Control Configuration for Data Acquisition and Control System

### 4. 실험결과 및 시물레이션

다음 그림은 시스템에 필터만을 설계하여 스텝 응답을 한 경우이다.

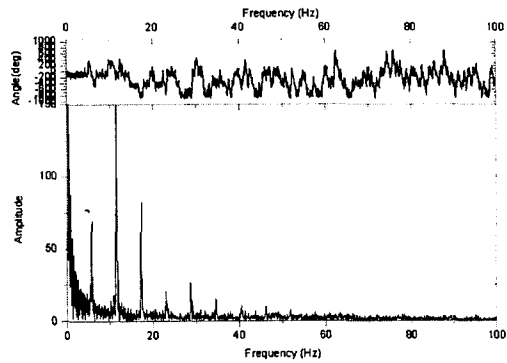


Fig. 4.1 FFT Plot Through Filter

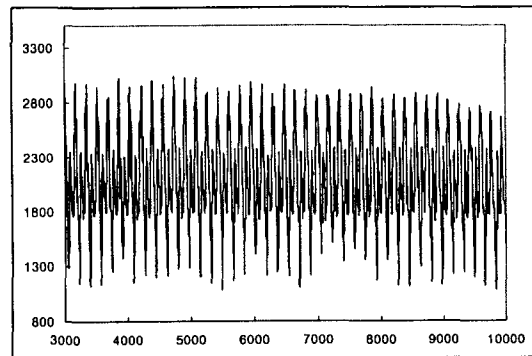


Fig. 4.2 Cutting Force Data Through Filter

5.73Hz대의 외란 주파수 성분의 계인이 대폭 줄어들었음을 알 수 있다. 이를 통해 필터의 구조가 비교적 적합하게 설정되었음을 알 수 있다.

Fig. 4.1은 필터설계이후 페루프를 구성하여 제어시스템을 구성한 경우의 스텝응답의 주파수 스펙트럼이다.

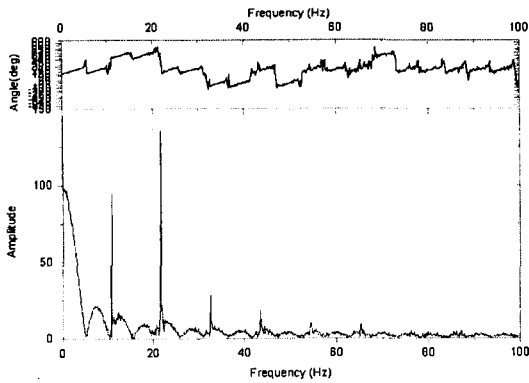


Fig. 4.3 FFT Plot Through Controller

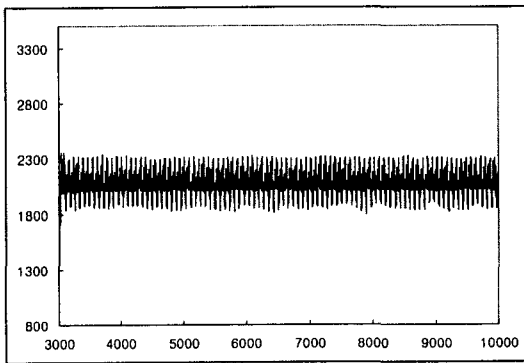


Fig. 4.4 Cutting Force Data Through Controller

5.73Hz대의 주파수 성분이 거의 사라졌음을 알 수 있다.

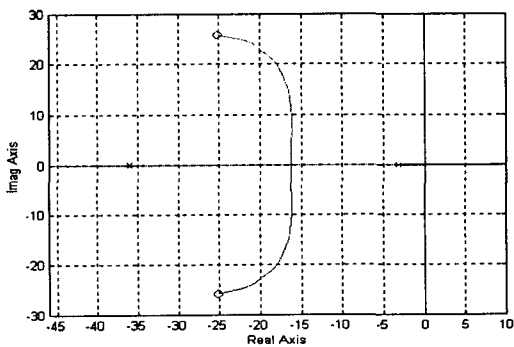


Fig. 4.5 Root Locus of Filter and Controller

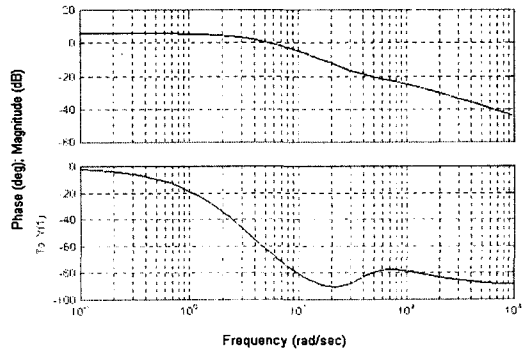


Fig. 4.6 Bode Diagram of Filter and Controller

Fig. 4.5과 4.6는 노치필터를 포함한 제어기의 근궤적선도와 보드선도이다. 이를 바탕으로 안정된 제어기가 설계되었음을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 연구방향

절삭공정에서 절삭과정중 발생하는 진동항을 플랜트에 포함시켜 이를 억제하는 필터를 제어기에 포함시켜 절삭시 발생하는 주파수 성분중 원하는 대역을 소거시킨 제어 응답을 얻어 낼 수 있다. 가정에 기반하여 플랜트의 진동항의 일부분을 구동 액추에이터에 의해 발생하는 외란으로 간주 할 수 있고 이를 모델링하여 억제할 수 있음을 보였으며 이를 통해 필터설계를 포함한 강인한 제어기를 설계할 수 있다.

향후 연구는 다음과 같이 진행될 것이다. 시스템의 상태방정식을 유도하여 이산시간 제어기를 설계한다. 외란의 진동항의 파라미터  $\zeta$  값이 시간에 따라 변하는 값으로 간주하고 이를 인식하는 적응알고리즘을 구현한다. 이후 파라미터 인식을 통해 절삭시 발생하는 외란을 파라미터 인식을 통해 억제할 수 있고 이를 통해 절삭시 원치 않는 외란변화로 인한 가공오차를 줄일 수 있음을 보이겠다.

## 6. 참고 문헌

- (1) 손대홍, 이진복, “밀링 공정에서 주축속도 가변에 의한 절삭력 적응제어”,  
한국정밀공학회 춘계논문집( I ), 1995, 5.
- (2) 양우석, 이진복, 2001, “앤드밀 공정에서의 신호처리에 따른 제어모델에 관한 연구”,  
한국공작기계학회 춘계 논문집, 2001, 4.
- (3) 이기용 외, “절삭력 신호에 의한 공구 런아웃의 온라인 감시”,  
한국정밀공학회 추계 논문집 ( I ), 1998 , 11.
- (4) Katsuhiko Ogata, “Discrete-Time Control System”, Prentice Hall, Second Edition