

## 이송계에 부착시킨 로드셀을 이용한 절삭력 측정시스템에 관한 연구

강은구\*(연세대), 이상조(연세대 교수)

### Research of the cutting force measuring system using feed drive system built in load cell

E. G. Kang(Mech. Eng. Dept., YSU), S. J. Lee(Mech. Eng. Dept., YSU)

#### ABSTRACT

This paper presents new cutting force measuring system for milling process. Usually, tool dynamometer is the most appropriate measuring tool in an analysis of cutting mechanism. High price and limited space, however, make it difficult to be in-situ system for controllable milling process. Although an alternative using AC current of servomotor has been suggested, it is unsuitable for cutting force control because of low bandwidth and noise. We suggest new cutting force measuring system, using two load cell placed between moving table and nut of ballscrew, and modelled on the system statically and dynamically. And to verify the accuracy of the proposed system, a series of carefully conducted experiments were carried out. Experiment results show that models are in reasonably good agreement with the experiment data.

**Key Words** : cutting force (절삭력), measuring system (측정시스템), milling process

#### 1. 서 론

최근 컴퓨터를 이용한 CNC 공작기계의 급속한 발전과 보급이 이루어졌으며 이로 인한 제품의 생산 시간을 절감하고 제품의 품질과 가공반복성(repeatability)을 높이기 위한 목적으로 많은 연구가 진행중이다. 이러한 CAM(Computer Aided Manufacturing) 분야에서 대부분의 문제로서 제시되고 있는 부분은 NC프로그램에 주어질 공작 기계가 가진 최고의 성능을 발휘할 수 있는 가공조건인 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수 등의 선정이 매우 불확실하며 이로 인해 너무나 많은 시행착오를 겪고 있는 현실이다. 또한 NC 프로그램에 의한 공구경로나 가공조건은 공작 기계 및 가공중의 오차요인을 배제한 상황에서 프로그램을 작성하게 되며 이 또한 실제로 공작기계 본래의 오차 및 절삭력에 의한 공구 처짐,

열변형, 공구마모 등의 오차요인에 의한 정밀도의 저하를 수반하게 된다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 방법으로 절삭력을 이용한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.

절삭력은 가공 중의 프로세서와 직접적인 연관성을 가진 요소이며, 절삭력에 영향을 주는 인자 또한 가공조건 선정에 필요한 이송속도, 반경방향 절삭폭, 축방향 절삭깊이, 절삭속도, 공구형상, 공작물 재질 등의 인자들이 복합적으로 작용한다.

따라서 가공중의 절삭력은 가공프로세서를 알게 해주는 매개체 역할로서 공구변형(tool deflection), 공구파손(tool breakage), 공구마모(tool wear)등을 예측하는 수단으로서 많은 연구가 진행중에 있다.

또한 생산성 향상과 정밀도 향상을 목적으로 정해진 절삭력을 유지하는 범위에서 절삭이송을 극대화하여 생산성을 극대화시키는 방법이 연구중이며,

형상오차를 발생시키는 요소로서 큰 비중을 차지하는 공구변형을 줄이기 위한 방법으로 공구 변형량을 절삭력으로 예측하여 그 변형량을 보정해주는 방안 또한 연구 중에 있다.

이와 같은 절삭력의 필요성으로 인한 절삭력 측정의 새로운 방법을 제시한다.

## 2. 관련 연구 동향

절삭력 측정에 있어서는 일반적으로 공구 동력계를 들 수 있다. 그러나 공구 동력계는 고가이며 설치 및 가공범위의 제약, 절삭유 급유문제, 배선문제등 실용화 측면에서의 여러 가지 한계성을 내포하고 있다. 따라서 이를 대체할 센서들에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 대표적으로 AE 센서, 가속도계, 전류 센서 등을 이용한 여러 가지 절삭력 간접측정들이 제시되고 있으나 이러한 센서들 중에서 저가이면서도 사용이 편리한 전류센서가 실용화 측면에서 많은 장점을 가진 것으로 알려지고 있다.

절삭력 측정시스템이 갖추어야 할 조건으로는 측정값의 정확도 및 밀링 공정의 절삭력 신호가 이물림 주파수를 갖은 정현파의 형태를 띄는 신호임을 감안했을 때 측정시스템의 대역폭에 대한 고려 또한 필요하다. 그러나 전류센서는 공구동력계나 AE센서 만큼 민감하지 못하며 주축의 경우에는 5Hz 이송모터의 경우에는 10Hz 정도의 대역폭을 가진다[1]. 그리고 심한 노이즈 특성 때문에 신호처리 기법 및 관련 알고리즘 개발에 대한 연구가 이루어지고 있다.

그리고 많은 실험결과 전류로부터 예측한 절삭력 또한 공구 동력계와 비교해 볼 때 황삭시의 큰 절삭력(약 1kN)의 경우에는 10%의 오차를 보이나 정삭시의 절삭력(약 100N)의 경우에는 노이즈 성분의 크기가 절삭력의 신호를 파악하기가 상당히 어려운 정도의 단점을 내포하고 있음을 알 수 있다[1].

절삭력 예측방법의 하나인 모델을 기반으로 한 많은 절삭력 예측방법은 가공 프로세서에서 발생하는 공구파손이나 공구마모를 반영하기가 어려우며 아직도 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

지금까지 언급한 것처럼 절삭력 측정을 목적으로 많은 방법이 시도되고 있으나 만족할만한 연구 결과가 제시되지 않고 있다.

## 3. 연구 내용

절삭력 측정을 위해 개발되어온 장비들이 갖추어야 할 조건이라면, 절삭력의 신뢰성, 센서로서의 재현성, 저렴한 가격 등을 생각해 볼 수 있다.

정밀 볼스크류는 CNC 공작기계 등 자동화 기계의 대부분의 정밀 위치결정 장비에 필수적으로 사용

되는 정밀 부품으로 3축 머시닝 센터의 경우 각 축이 독립된 직각의 3축으로 이루어져 있다. 볼스크류는 각각 구동 모터에 의해 구동되며 테이블에 동력을 전달하는 기구로, 구동중 이송테이블의 이너서를 극복해야 하며 또한 이송테이블이 구동하면서 발생하는 마찰력등을 극복해야 한다(Fig.3.1참조).

절삭 공정중에 발생하는 절삭력은 볼스크류와 이송 테이블과의 직렬 시스템 하에서 이루어져 있으며, 절삭력을 측정하기 위해서 이송테이블이 받는 모든 하중은 절삭력과 이송하면서 생기는 이송 테이블의 이너서 그리고 테이블면에서 발생하는 마찰을 합한 하중을 받게되고 실제 절삭력은 이러한 이송중에 발생하는 하중을 정량적으로 제거함으로써 구할 수 있다.

이 방법의 개선점은 볼스크류에 부착된 센서의 경우 각 축에 대한 좌표를 자연적으로 가지고 있기 마련이다. 그러나 공구 동력계의 경우는 설치시에 충분히 각 축에 맞게 좌표를 맞추어야 하는 오차 요인을 가지고 있다. 또한 공구 동력계의 경우 크기가 어느 정도 결정되어 있기 때문에 측정 영역이 어느 정도 결정되며 이 영역 또한 대부분 만족할만한 크기는 되지 못한다. 그러나 볼스크류 부착형 시스템의 경우는 기계 전체 가공영역에서 이를 사용할 수 있다.

그리고 정밀도 또한 정밀도를 인정받은 압전소자를 이용한 로드셀을 사용하여 확보 할 수 있으며 따라서 낮은 절삭력의 경우에도 충분히 신뢰성 있는 값을 측정할 수 있다. 또한 측정 대역폭도 전류처럼 고정되어진 시스템이 아니며, 측정 시스템의 구조상 변수의 변화에 따라 대역폭의 변화가 가능 할 수 있다.

가격 또한 압전소자용 센서가 비교적 저가이며 이 또한 실용화에 상당한 이점이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 것처럼 이송시스템을 이용한 절삭력 측정 시스템이 가지는 오차를 분석하고 상용 공구 동력계와의 비교 실험을 통해 충분한 오차 범위를 가지도록 한다.

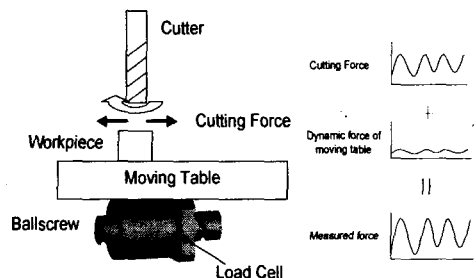


Fig. 3.1 Principle of Cutting Force Measuring System

## 4 이론

### 4.1 측정 시스템의 정적 모델

정적 절삭력이라 함은 볼스크류 부착형 절삭력 측정 시스템에서 테이블의 이동이 없는 정지 상태에서 즉, 테이블의 이송중의 발생하는 테이블의 이너서에 의한 하중 및 마찰력등의 하중을 배제한 상황에서의 측정 절삭력을 말한다. Fig.4.1에서도 볼 수 있듯이 실제 가공 절삭력은 모든 힘이 로드셀에 전달되는 것이 아니기 때문에 이중 센서에 전달되는 하중의 비를 알아야 될 필요가 있다. 따라서 이 전달되는 하중에 의한 측정값은 실제 절삭력의 측정을 어느 정도 정확히 측정 할 수 있는 가를 가늠해 볼 수 있는 모델이기도 하다.

Fig.4.1를 보면 예압과정에서 볼트 부위에는 인장력을 로드셀 부위는 압축력을 가진다. 이를 도시화 하면 Fig.4.3과 같이 나타낼 수 있다.

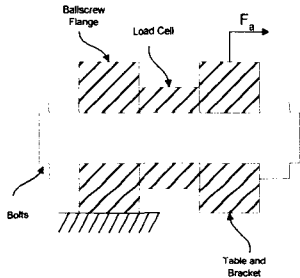


Fig.4.1 layout of cutting force measuring system

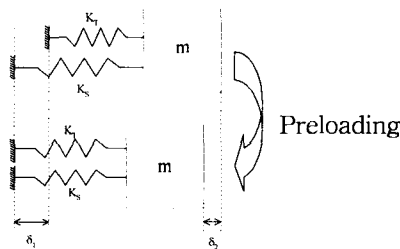


Fig.4.2 1DOF model of cutting force measuring system

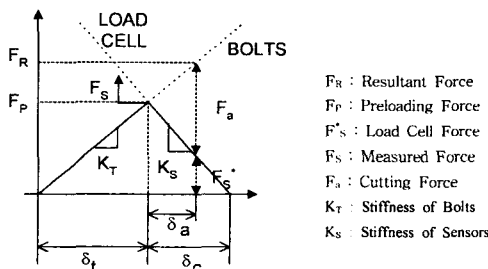


Fig.4.3 Diagram of measuring system

Fig.4.3를 수식화 하면 식(4.1)을 얻을 수 있으며

$$F_a = \left(1 + \frac{K_T}{K_s}\right)(-F_s) \quad (4.1)$$

여기서  $F_a$  : Cutting Force  
 $F_s$  : Measured Force 이다.

결국 절삭력  $F_a$ 를 구하기 위해서는 강성비만을 구하면 측정로드셀에서 구한 값만을 이용해 절삭력을 계산해 낼 수 있게 된다.

### 4.2 측정 시스템의 동적 모델

절삭력 측정시스템이 갖추어야 할 조건으로는 측정값의 정확도와 변동하는 절삭력을 신속히 감지할 수 있는 민감도를 들 수 있다. 밀링공정의 절삭력 신호가 이물림 주파수를 갖은 정현파의 형태를 띄는 신호임을 감안했을 때 측정시스템의 대역폭에 대한 고려 또한 필요하다.

측정 대역폭은 전류의 경우 더 이상 변화 시킬 수 없는 시스템이다. 그러나 볼스크류 부착형 측정 시스템의 구조상의 강성의 변화에 따라 변화가 가능할 수 있다.

압전소자용 로드셀은 구조상 예압을 가해야만이 측정영역을 확보할 수 있다. 그렇기 때문에 이를 고려해서 동적 모델링이 제시된다.

우선 동적 모델을 볼스크류를 강체 시스템으로 가정할 경우는 Fig.4.1과 같은 대략적인 그림으로 나타낼 수 있고 이를 비감쇠 시스템으로 할 경우 Fig.4.2와 같은 모델링을 얻을 수 있다. 그러나 실제 전체 이송계 시스템에서 볼스크류를 강체 시스템으로 볼수 없으며 감쇠 또한 고려해야만 한다. 그래서 전체 측정 시스템은 Fig. 4.4 와 같이 모델링을 할 수 있다.

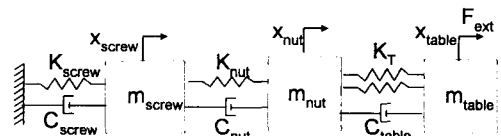


Fig.4.4 3DOF model of cutting force measuring system

## 5. 실험

### 5.1 정적 실험

전체 정적 절삭력 측정 실험의 구성은 Fig.5.1과 같이 외력을 가하며 스트레인 게이지를 통해 외력을

측정하고, 테이블에 부착된 로드셀을 이용하여 동시에 측정한다. 즉, 스트레인 게이지의 측정값은 식 (4.1)의  $F_a$ 를 나타낸다.

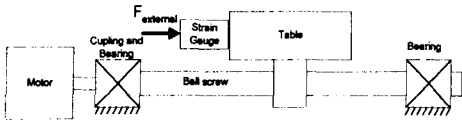


Fig.5.1 experimental setup of static cutting force measuring system

로드셀과 볼트의 강성비  $K_T/K_S$ 는 대략 0.5이며, 이때의 실험 결과를 Fig.5.2에 제시하였다. 결과에서 보듯이 오차가 대부분 5N이하를 가진다.

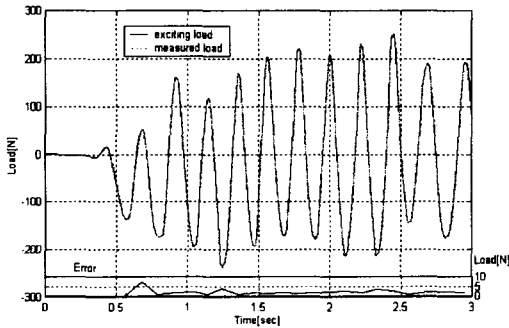


Fig.5.2 results of static cutting force

### 5.2 동적 실험

동특성 실험 방법은 대상 이송테이블을 임팩트 해머로 축방향으로 가진하고, 부착된 로드셀에 대한 응답을 측정한다. 임팩트 해머와 로드셀 각각의 신호는 파워 앰프와 차이지 앰프로 전달되며 2ch 다이 나믹 시그널 애널라이저(dynamic signal analyzer)로 입력된다. Dynamic signal analyzer에서 생성된 데이터를 통해 측정 시스템의 대역폭을 알아낼 수 있다.

실험을 통해 임팩트 해머의 PSD를 평가하여 1kHz 이상의 높은 대역폭을 가진 것을 확인할 수 있었고, 부착된 로드셀 또한 1KHz 이상의 대역폭을 확인할 수 있었다.

다음과 같은 전달함수를 가지는 동특성 실험 결과가 Fig. 5.3에 나타나 있다.

$$\frac{\text{Load Cell}}{\text{Impact Hammer}} = \frac{F_{\text{load cell}}}{F_{\text{impt hammer}}}$$

Fig. 5.3의 결과로서 측정 대역폭은 70Hz 정도의

신뢰성을 확보하였다.

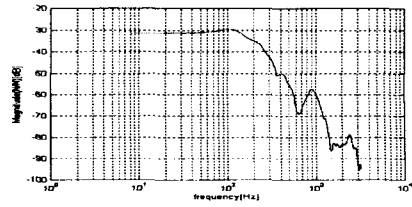


Fig.5.3 experimental result of dynamic characteristics

## 6. 결론

정적 절삭력 측정 시스템의 모델을 제시하였고, 이 모델을 통한 실험 결과, 비교적 작은 절삭력 구간에서 작은 오차를 보인다. 이는 이보다 큰 구간에서의 절삭력은 상대적으로 더 작은 오차량을 가지게 되며, 실제 절삭력 측정의 가능성을 보인 실험이다.

동특성 실험을 통해 절삭력 측정 대역폭을 알 수 있었고, Fig.4.4에 의한 3 D.O.F. 모델등에 의한 계속적 연구결과로 측정 대역폭의 변화가 더 수행되어 질 수 있다.

## 참고문헌

1. Y. S. Lee, " Cutting Force Regulation in Milling Process using Sliding Mode Control", thesis of Yonsei University ,1999.
2. S. Wonbo, I. Ro Paul, "Compensation of nonlinear friction for high precision positioning in the ballscrew driven slide system",A.S.P.E, Vol. 18, pp. 303-306, 1998.