

밀링가공에서의 주축 변위 측정을 통한 절삭력 예측

장훈근*, 장동영+, 한동철**

CUTTING FORCE PREDICTION USING SPINDLE DISPLACEMENT IN MILLING

HunKeun Chang*, DongYoung Jang+, DongChul Han**

Abstract

Cutting force is important to understand cutting process in milling. To measure cutting force, tool dynamometer is widely used but it is hard to apply in workshop condition. Cutting force measurement which doesn't affect cutting process is needed. Using relations between cutting force and spindle displacement, cutting force can be predicted. Cylindrical capacitive sensor was used to measure spindle displacement during cutting. And signals from tool dynamometer collected to compare with spindle displacement. The result shows spindle displacement has a linear relation with cutting force. Using this result, a simple method to predict cutting force could be applied at workshop condition.

Key Words : cutting force, spindle displacement, capacitive sensor

1. 서론

기계가공기술은 생산 제품이 정밀화, 고기능화됨에 따라 발전하여 왔다. 크게 가공기계 자체를 개발하는 방법과 기존 기계를 이용하여 최대한의 능률을 이끌어 내는 방법이 개발되어 왔다. 두 가지 방법 모두 기계 가공에 대한 이해를 바탕으로 하고 있으며, 이를 위하여 실제 가공 조건 및 현상에 대한 연구가 필요하다.

밀링에서의 가공 상태 모니터링에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.⁽¹⁾⁽²⁾ 주된 모니터링 인자로서는 절삭력, 진

동, AE 등이 사용되어 왔다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 이 중에서 절삭력이 가장 많이 연구되어 왔으며, 이는 절삭 메커니즘이 기본적으로 소성가공에 기반하기 때문이다. 절삭력을 이용하여 공구 마모 및 파손, 공작물의 잔유응력 등을 파악할 수 있다. 많은 새로운 모니터링 파라메터들의 평가를 위하여 절삭력이 기준으로 사용되어 왔다. 절삭력의 측정에 있어서는 공구동력계를 사용하여 직접적인 힘의 측정이 일반적이다. 공구동력계는 오랜 기간, 다양한 연구에 널리 사용되어 왔으며, 저 주파수 영역에서는 비교적 높은 신뢰성을 가진다.

* 장훈근, 서울대학교 기계항공공학부 (buzz@amed.snu.ac.kr)
주소: 151-744 서울시 관악구 신림9동 산56-1 정밀기계설계공동연구소 112호
+ 장동영, 서울산업대학교 산업정보시스템공학과
++ 한동철, 서울대학교 기계항공공학부

선삭에서의 공구동력계 장착은 가공 과정에 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있으나, 밀링 가공의 경우 실험실 차원이 아닌 실제 공장에서의 공구동력계 적용은 설치 환경, 가공물의 크기 및 중량 등으로 많은 제약을 받고 있다고 할 수 있다. 이를 극복하기 위하여, 다양한 가공 환경에 대하여 가공 프로세스에 영향을 미치지 않는 새로운 절삭력의 측정 방법이 필요하게 되었고, 간접적인 힘의 측정 방법으로 주축의 변위를 측정하여 절삭력을 예측하는 방법을 개발하였다.

2. 주축 변위의 측정

2.1 주축 변위 측정용 센서

일반적으로 축의 회전 정밀도를 측정하는 방법은 상용 변위 센서를 회전축에 직각으로 2개 설치하여 그 상대 변위를 측정하는 것이다. 그러나 고가의 마스터 볼이나 마스터 실린더를 사용해야 하므로 실제 가공에 있어서 측정은 곤란하다. 이를 해결하기 위하여 반전법, N점법 등이 개발되었으나, 이 경우 형상성분과 운동성분을 분리해 낼 수 있는 높은 분해능의 센서가 필요하게 되며, FFT 및 행렬 계산에 많은 시간이 소요되어 현장 적용에 어려움이 있다.

이를 극복하기 위하여 원통형 형상을 가지며 측정 원주면 전체를 감싸는 형태를 가지는 정전용량형 변위 센서가 개발되었다.⁽⁵⁾ 정전용량형 변위 센서는 기존의 변위 센서에 비하여 상대적으로 넓은 면적을 측정하여, 측정 면적 전체에 걸쳐 평균화 효과로 인하여 형상 오차 성분에는 둔감한 반면 측정 대상체의 운동 오차 성분에만 민감하여 운동 변위 측정에 유리하며 그 비용이 상대적으로 저렴하다. 또한 부품의 형태로 주축에 설치되기 때문에 기계 운전 시, 공구 및 공작물에 미치는 영향이 미비하여 실제 가공 작업 시 센서의 적용이 용이하다.

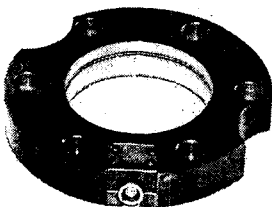


Fig. 1. Cylindrical capacitive displacement sensor

Fig.1의 센서는 ATC와의 간섭이 없도록 주축 선단에 End-Cover의 형태로 장착된다.

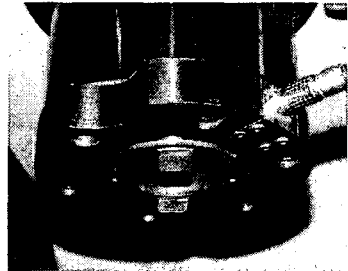


Fig. 2. Installed sensor on a vertical milling machine spindle

2.2 모니터링 시스템

원통형 정전용량형 변위 센서신호와 절삭력 측정을 위한 공구동력계 (Kistler 9255)를 이용하여 절삭력 모니터링 시스템을 구성하였다. 센서와 공구동력계 신호의 ADC처리를 위하여 DT3010 보드를 사용하였다. Fig. 3.에 모니터링 시스템의 구성도가 나와있다.

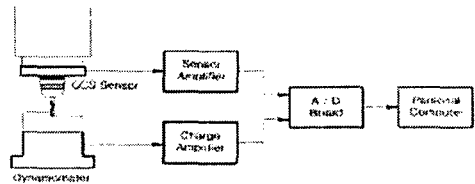


Fig. 3. Schematic view of monitoring system

2.3. 절삭력과 주축변위와의 관계

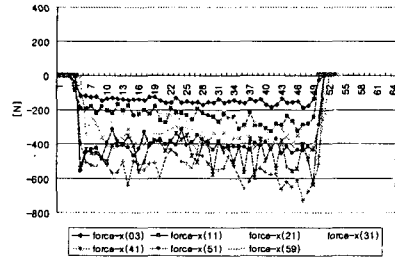
절삭력이 작용하는 공작기계 주축은 Fig. 4와 같은 단순 강체 모델로 생각할 수 있다. 주축 사양에 따라 정해진 반경 방향 강성치를 가지는 공작기계 주축의 강성은 거의 일정한 값을 가진다. 주축의 회전 속도가 낮을 때, 강성의 변화는 거의 없으며, 고속에서 누적되는 발열에 의해 미소한 양이 변하게 된다. 절삭력과 주축변위가 선형적인 관계를 갖는다고 생각할 수 있으며, 이 때, 주축 및 공구, 척은 충분한 강성을 가진다고 가정한다.



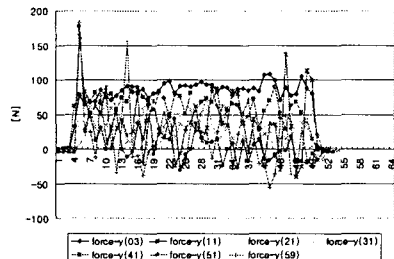
Fig. 4 Concept of displacement measurement of cutting force

4. 실험 결과

절삭 실험은 수직형 Machining center에서 수행되었다. 가공물은 플라스틱 금형강으로 폭넓게 사용되는 KP4, 사용 공구는 10mm의 2날 Ball End-mill로 HSS-Co재질을 사용하였다. 가공조건은 깊이 0.5mm, 폭 2mm의 상면 상향절삭이고 1회 가공의 길이는 120mm이다. 주축의 회전수는 3000 rpm, 이송속도는 100 mm/min, 한날당 이송 속도는 0.017mm/tooth 이다.



(c) Cutting force in X direction

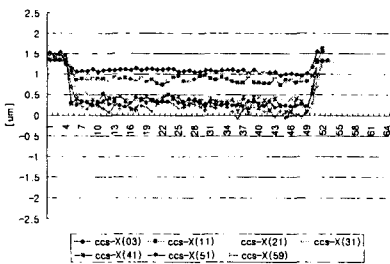


(d) Cutting force in Y direction

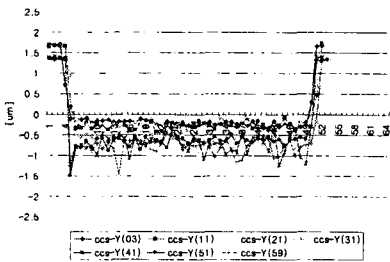
Fig. 5. Spindle displacement and cutting force

총 절삭은 60회에 걸쳐 이루어 졌으며, 절삭거리가 증가함에 따라, 주축 변위 및 절삭력의 절대적인 크기가 계속적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 신호의 변동 폭 또한 증가한다. 이는 절삭이 진행됨에 따라 유발된 공구마모에 의한 영향으로 볼 수 있다.

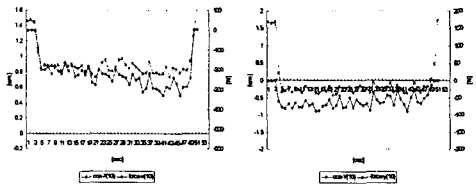
주축 변위 신호와 절삭력 신호와의 관계를 비교하기 위하여 각 절삭 신호 신호들 중 10회, 30회, 60회 절삭 후의 주축 변위신호와 절삭력신호를 같이 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.



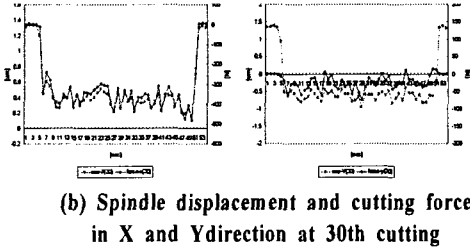
(a) Spindle displacement in X direction



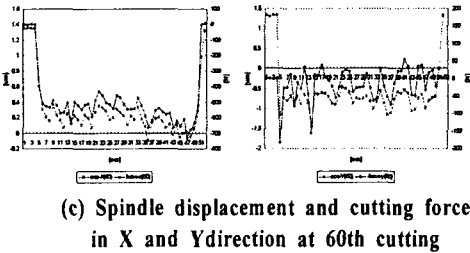
(b) Spindle displacement in Y direction



(a) Spindle displacement and cutting force in X and Y direction at 10th cutting



(b) Spindle displacement and cutting force in X and Y direction at 30th cutting



(c) Spindle displacement and cutting force in X and Y direction at 60th cutting

Fig. 6. Comparison between spindle displacement and cutting force

위의 Fig.6.을 통하여 주축 변위 신호와 절삭력 신호의 변동이 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 공작기계의 주축이 사양에 따라 정해진 반경 방향의 강성치를 가지며 그 변화는 미묘하다고 가정했을 경우, 주축변위와 절삭력이 일정한 상수의 비로 비례한다는 것을 보여준다. 주축 변위 신호와 절삭력 신호의 비교 시 그 경향이 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 그림은 경향의 비교를 위하여 원점이 아닌 변동 위치에 맞추어 절삭력과 주축변위 신호를 비교하였다.

위의 결과에 기초하여 각 방향에 대하여 절삭력과 주축변위 신호의 관계를 조사하였다. 각 횡수의 절삭에 대하여 주축 변위와 절삭력의 평균값을 이용하여 조사한 선형관계는 아래 Table 1에 나와있다.

Table 1 Relationship between spindle displacement and cutting force

X 방향	$D_x = 0.007116 + 0.00191F_x$ ($R^2 = 0.962$)
Y 방향	$D_y = 0.00129 + 0.002F_y$ ($R^2 = 0.610$)

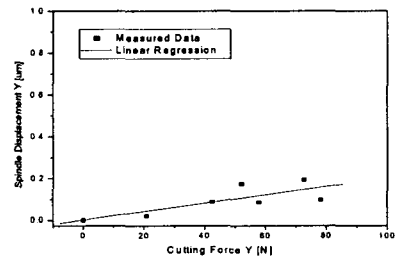
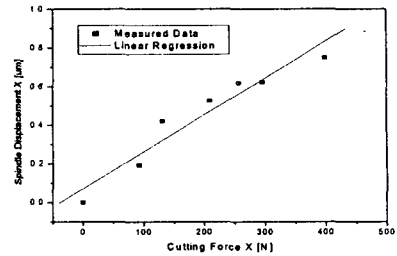


Fig. 7. Relationship between spindle displacement and cutting force

5. 결론

가공 중 절삭력 예측을 위하여 주축 변위를 측정하여 절삭력과 비교, 선형 관계를 얻을 수 있었다. 주축 변위 측정을 위하여 원통형 정전용량형 변위 센서를 이용하였다. 주축의 변위 값과 절삭력 값은 상당히 근사한 형태를 가지고 있으며 이를 이용하여 주축 변위 측정을 통하여 절삭력을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) Ehmman, K.F., Kapoor, S.G., DeVor, R.E. and Lauzoglu, I., 1997, "Machine Process Modeling: A Review", *J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 655~663.
- (2) Smith, S. and Tlustý, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process", *J. of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169~175.
- (3) Cho, D.W., Lee, S.J. and Chu, C.N., 1999, "The State of Machining Process Monitoring Research in Korea", *J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, pp.

1697~1715.

- (4) Prickett, P.W. and Johns. C., 1999, "An Overview of Approaches to End Milling Tool Monitoring", *J. of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 39, pp. 105~122.
- (5) Kim, I.H., 2001, "A Study on In-Process Measurement of Spindle Vibration and Cutting States Using a Cylindrical Capacitive Displacement Sensor", *Ph.D Thesis*, Seoul National University, pp. 7~42.