

고속 밀링 가공 시 주축 변위 측정을 통한 절삭력의 실시간 감시

김종혁*, 김진현(서울대 대학원 기계항공공학부), 김일해(주CAMSYS), 안형준(숭실대 기계공학과),
장동영(서울산업대 산업정보시스템공학과), 한동철(서울대 기계항공공학부)

On-line Cutting Force Estimation by Measuring Spindle Displacement in High-Speed Milling Process

J. H. Kim, J. H. Kim(School of Mech. & Aero. Eng., SNU), I. H Kim(CAMSYS Co.), H. J. Ahn(Mechanical Eng Dept., SSU), D. Y. Jang(Ind. & Info. Sys. Eng. Dept., SNUT), D. C. Han(School of Mech. & Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

A cylindrical capacitive displacement sensor (CCS) was developed and applied for monitoring end milling processes. Dynamic characteristics of a spindle-assembly were measured using the CCS and a designed magnetic exciter. The technique to extract the spindle displacement component caused only by cutting from the measured signals using the CCS was proposed in the paper. Using CCS signals and FRF (Frequency Response Function) derived from dynamics of the spindle tool system, dynamic cutting forces are estimated quantitatively.

Key Words : Cylindrical capacitive displacement sensor (원통형 정전용량 변위센서), Magnetic exciter (마그네틱 가진기), Cutting force (절삭력), On-line monitoring (실시간 감시)

1. 서론

절삭 가공 상태 감시를 위한 센서로 널리 사용되고 있는 것은 피에조 방식의 공구동력계를 이용한 절삭력 직접 측정이 유일하다고 할 수 있다. 가공 상태 감시를 위한 많은 여타 센서들의 타당성 평가에 관한 연구 논문들에서도 결국엔 공구동력계 측정결과가 그 평가의 기준이다. 이러한 공구동력계는 센싱 유닛이 절삭점과 가까워 절삭상태에 매우 민감하지만, 그 가격이 매우 비싸며, 절삭 칩과 절삭유 등에 항상 노출되어 있고 공작물의 탈착이 빈번하게 이루어지는 실제 작업 현장에서는 적용되지 않고 있는 실정이다. 또한 공구동력계 또는 공구동력계-공작물 시스템의 동력학적 특성으로 인하여 측정된 절삭력의 왜곡이 발생하며, 이러한 특징은 특히 고속 절삭과 같은 고주파 성분의 절삭력에 대해서 심한 왜곡이 발생한다. 이러한 절삭력의 왜곡 현상을 해결하기 위하여 가진 및 절삭 실험을 통한 보정 방법이 제시되었으나[1][2], 공작물의 크기나 질량이 바뀌면 동력학적 특성이 변화하여 매번 보정을 위한 식별 시험을 수행해야 하므로 현실적으로 적용 불가능하다. 그러므로, 센서 적용에 따른 소요 비용이 작으면서도 필요 충분한 성능을 제공하는 센서 시스템이 요구된다.

본 논문에서는 공작기계 주축의 변위 측정을 통하여 절삭력을 측정하는 새로운 방법을 제시한다.

이 연구에서 주축 변위 측정에 사용된 센서는 원통형 정전용량 변위센서(Cylindrical Capacitive displacement Sensor: CCS)이다. 이러한 원통형 정전용량 변위센서는 대역폭이 약 10kHz 에 이르며 수십 나노 미터에 이르는 고분해능을 가지고 있다. 또한 센서의 측정 면의 면적이 넓어서 평균화 효과로 인한 주축 표면의 표면 거칠기 등을 별도의 신호 처리 없이 제거 할 수 있다[3]. 그 밖에 원통형 정전용량 변위센서는 측정 신호가 공작물의 동력학적 특성에 영향을 받지 않고 절삭 과정에 영향을 미치지 않으며 공작기계 주축의 하나의 부품으로서 설치가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 절삭 중 주축 변위신호에는 런아웃 성분과 원심력에 의한 변위 성분이 포함되어 있기 때문에 이들 변위성분을 제거하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 비접촉 마그네틱 가진기를 이용하여 주축의 동특성을 측정하여 절삭력의 주파수 성분에 따른 주축의 응답을 구하였다. 최종적으로 절삭실험을 통하여 주축의 변위 신호로부터 절삭력을 추정하여 공구동력계 측정값과 비교하였다.

2. 원통형 정전용량 변위센서

원통형 정전용량 변위센서(cylindrical capacitive sensor; CCS)는 센서면이 회전체의 원주면을 따라 모두 4 조각 또는 8 조각으로 이루어져 있어, 센서

면이 넓기 때문에 평균화 효과로 인하여 표면 형상 오차를 효과적으로 제거할 수 있다.

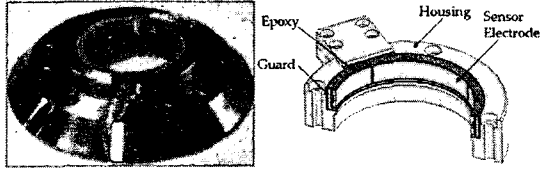


Fig. 1 The picture and schematics of cylindrical capacitive displacement sensor

3. 마그네틱 가진기

본 연구는 금형가공용 고속 주축에 초점이 맞추어져 있다. 일반적으로 고속 가공 시에는 절삭력이 일반 가공 시 발생하는 절삭력의 30%까지 감소된다고 알려져 있다. 그러므로 고속 주축에 실제 가공이 이루어질 때와 유사한 수준의 가진이 이루어지기 위해서 마그네틱 가진기의 설계 사양을 다음과 같이 결정하였다.

- 가진력의 최대 진폭(RMS) : 300 N
- 가진력의 최대 가진 주파수 : 2 kHz

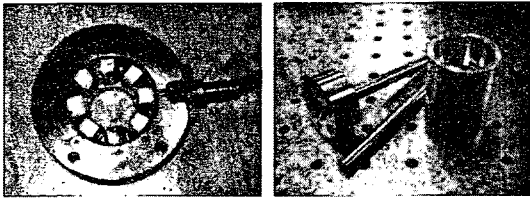


Fig. 2 Magnetic actuator and rotor for spindle excitation

3. 주축의 주파수 응답 측정

본 연구에서는 가진력의 각 주파수 성분의 진폭을 증가시키기 위하여 단일 주파수 정현파 가진(single frequency sine excitation)을 수행하였으며, 입력 신호는 마그네틱 가진기에 설치된 공구동력계를 이용하여 측정하였으며 출력으로는 주축 공구단에 설치된 원통형 정전용량 변위센서를 이용하여 변위 응답을 측정하였다. Fig. 3 은 회전수에 따른 주축의 주파수 응답을 나타낸 것이다. 주축의 회전수를 정지상태에서부터 15000 rpm 까지 2500 rpm 간격으로 증가시켜가며 2.1 kHz 까지 가진 실험을 수행하였다.

4. 절삭력의 측정

원통형 정전용량 변위센서의 절삭력 측정에서의 적용 가능성 및 앞장에서 설명한 주축 주파수 응답 함수의 유효성을 검증하기 위하여 절삭실험을 수행하였다. 공작물의 재질은 구조용강 S45C 이며 2 개의 절삭날을 가진 지름 10mm 의 플랫 엔드밀을 사

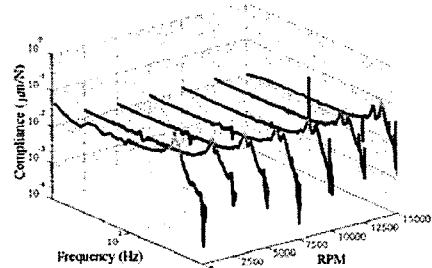


Fig. 3 Compliances of M/C spindle

용하여 측면 절삭을 수행하였다. 절삭조건은 주축 회전속도 10,000 rpm, 반경방향 절입량 0.3mm, 축방향 절입량 10mm, 이송속도는 1,000 mm/min 이다. Datatranslation 사의 A/D 보드를 이용하여 신호를 획득하였으며, 주축 2 회전 동안의 절삭력을 측정하여 아래 그림에 나타내었다.

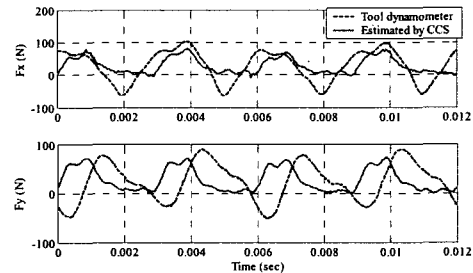


Fig. 4 Measured and estimated cutting forces.

5. 결론

본 연구에서는 고속 절삭가공 시 동적 절삭력 변화를 원통형 정전용량 변위센서를 이용하여 정량적으로 측정하였으며, 고속 가공시에도 절삭력의 크기 및 위상의 왜곡없이 절삭력 측정이 가능함을 확인하였다. 고속 절삭가공에서의 절삭력 감시시스템으로서 원통형 정전용량 변위센서의 유효성을 확인하였다.

참고문헌

1. S. A. Spiewak, "Acceleration Based Indirect Force Measurement in Metal Cutting Processes", Int. J. Tools Manufact. Vol. 35, No. 1. pp. 1~17, 1995
2. Y. L. Chung, S. A. Spiewak, "A Model of High Performance Dynamometer", Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME, Vol. 116, pp.279~288, August 1994,
3. H.J. Ahn, S. Jeon and D.C. Han, "Error Analysis of the Cylindrical Capacitive Sensor for Active Magnetic Bearing Spindles", J. of Dynamics Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME, Vol. 122, pp. 102-107, 2000