

원통형 주축 변위 센서를 이용한 고속 밀링 가공 상태 감시

김일해*, 장동영⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 8)

A Cylindrical Spindle Displacement Sensor and its Application on High Speed Milling Machine

Il Hae Kim*, Dong Young Jang⁺

Abstract

A new cutting force estimating approach and machining state monitoring examples are presented which uses a cylindrical displacement sensor built into the spindle. To identify the tool-spindle system dynamics with frequency up to 2 kHz, a home-built electro-magnetic exciter is used. The result is used to build an algorithm to extract the dynamic cutting force signal from the spindle error motion; because the built-in spindle sensor signal contains both spindle-tool dynamics and tool-workpiece interactions. This sensor is very sensitive and can measure broadband signal without affecting the system dynamics. The main characteristic is that it is designed so that the measurement is irrelevant to the geometric errors by covering the entire circumferential area between the target and sensor. It is also very simple to be installed. Usually the spindle front cover part is copied and replaced with a new one with this sensor added. It gives valuable information about the operating condition of the spindle at any time. It can be used to monitor cutting force and chatter vibration, to predict roughness and to compensate the form error by overriding spindle speed or feed rate. This approach is particularly useful in monitoring a high speed machining process.

Key Words : Spindle(주축), Displacement sensor(변위 센서), Machining condition(가공 상태), High speed(고속 가공), Chatter(채터), Roughness(표면조도)

1. 서론

생산성과 가공 품질의 향상을 위한 고속 가공 기술 분야

는 최근 공작기계 분야의 주된 관심사 중의 하나이다. 주축의 회전수가 높아지고 밀링 공구에 의해 발생하는 절삭력의 주파수가 높기 때문에, 공구동력계로 대표되는 일반적인

* (주)캠시스 (chyarlie@gmail.com)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172 서울산업대학교 창업보육센터 202호

+ 서울산업대 산업정보시스템공학과

방식은 고속 가공 상태의 감시 및 제어에 적합하지 않으며, 다른 대안이 필요하다. 공구동력계의 왜곡을 보정하거나, 공구동력계 대신 다른 센서를 이용하고 실험적 혹은 해석적 모델을 이용하여 절삭력을 간접적으로 측정하는 등의 연구가 많이 이루어졌다. Spiewak⁽¹⁾은 공구동력계의 모델링을 통해 절삭력 작용 위치에 따른 공구동력계의 전달함수를 구하여 공구동력계의 동력학적 왜곡을 보상하는 방법을 제안하였다. Tounsi⁽²⁾는 가속도계를 추가하여 이를 통한 보정으로 측정 가능한 주파수 대역을 높였다. 이러한 접근 방식들은 공구동력계 위의 공작물 질량의 영향을 고려해 동력학 모델을 매년 수정해야 된다.

공구동력계를 대체하여 절삭력을 간접 측정하고자 제안된 센서로는 가속도계⁽³⁾, 이송계 모터의 전류^(4,5), 자기베어링 주축에서의 제어 전류⁽⁶⁾ 등이 있다. 가속도계는 고주파 영역의 측정에 유리한 반면 정적인 성분에 측정이 어렵고, 절삭이외의 요인에 의한 진동에도 영향을 받는다. 이송계 모터를 이용하는 방법은 측정 주파수 대역이 좁아 고속 가공 상태의 감시에는 적합하지 않다. 자기베어링의 경우 제어 전류를 이용해 주축에 가해지는 절삭력을 효과적으로 추출할 수 있으나 적용 가능한 대상이 한정되어 있다.

가공 표면의 정밀성을 추구하는 고품위 고속 절삭 가공은 주축 회전수가 높고, 절삭력의 크기가 작다. 또한 최근의 공작기계 산업의 동향은 고속화만 뿐만 아니라 정밀도 및 전체적인 능력을 향상시키기 위한 방향으로 진행되고 있다. 즉, 절삭 상태 측정을 위한 센서 시스템은 금형의 정삭 가공에도 대응할 수 있도록 매우 민감하여야 하며, 공작물의 크기나 중량에 영향을 받지 않고, 정적인 상태부터 높은 주파수의 진동 상태까지 측정 주파수 범위가 넓어야 한다.

원통형 주축 변위 센서는 이러한 상황에 대응하여 절삭력에 의해 파악되는 다양한 절삭 가공 상태를 마찬가지로 추출할 수 있다. 본 센서는 선반에 최초로 적용되어 절삭 상태 감시에 관한 연구가 이루어졌다^(7,8). 선반의 경우 주축 척 위치에서의 변위를 통해 절삭력을 측정하는 방식이며 공작물이 회전하므로 공작물의 소재 강성, 크기, 모양 등에 따라 측정 시스템의 힘과 변위의 관계가 영향을 받게 된다. 밀링의 경우에는 공구의 종류가 한정되어 있기 때문에 힘과 변위의 관계는 보다 명확하다. 그러나 고속 밀링 주축의 동특성 파악이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 고속 밀링 가공에 원통형 주축 변위 센서를 효과적으로 적용하기 위한 준비 과정과 본 센서를 사용한 고속 밀링 가공 상태의 측정 및 제어에 대해 살펴본다.

2. 절삭력 측정

2.1 원통형 주축 변위 센서

절삭력 측정으로 대표되는 가공 상태 측정을 위한 센서는 절삭 지점과 가까울수록 바람직하지만 현실적으로는 어려운 조건이다. 특히 큰 공작물에 대해서는 공구동력계를 사용하는 경우, 자이로 효과로 인해 절삭력이 작용하는 위치에 따라 측정 결과를 보정해야 정확한 값을 알 수 있다⁽²⁾. 절삭력에 의한 변위를 측정하는 위치는 주축에서 공구와 가장 가까운 부분이 바람직하다. 주축의 하우징에 장착된 최종 덮개 부분을 센서가 내장된 형태로 교체함으로써 절삭침, 절삭유 등의 오염도 피할 수 있다.

변위 측정에는 자체 개발한 정전용량형 변위 센서가 사용되었다. 고속 가공용 주축 및 절삭 가공 조건 등을 고려해볼 때 필요한 변위 센서의 분해능은 수십~수백 나노미터 수준이 요구된다. 다만 측정 범위는 넓지 않아도 되므로 틸트 변환 방식으로 변위 분해능을 높일 수 있다. 또한, 회전체의 오차운동(error motion)의 측정은 측정면의 형상 오차 및 표면 조도 요구 조건이 매우 높다. 주축의 평가를 위한 시스템들은 정밀한 마스터 구를 사용할 수 있으나, 가공 중에는 적용이 곤란하므로, 측정면 형상의 영향을 덜 받는 센서가 필요하다. 이러한 이유로 주축 원주면을 모두 감싸는 원통형



Fig. 1 Cylindrical capacitive sensor installed at M/C

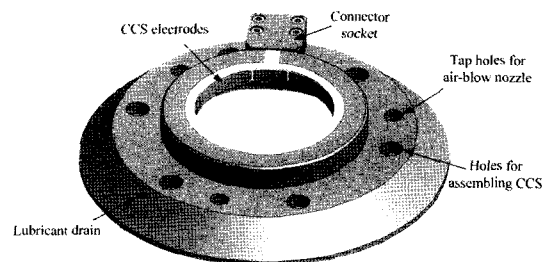


Fig. 2 Cylindrical capacitive sensor as a replacement part for milling spindle cover

주축 변위 센서가 개발되었다^(7,8).

상용 깎 센서를 이용한 연구⁽⁹⁾도 있지만, 센서 측정값에서 오차운동 이외의 값들을 제거하기 위해 복잡한 신호처리가 필요하고 센서 관련 비용이 상당히 높으며, 좁은 면적의 정전용량 센서로 원통형상을 측정하는 경우 대상이 평면이 아니기 때문에 야기되는 오차를 보정해야 하기도 한다⁽¹⁰⁾.

2.2 주축 특성에 의한 오차운동 성분 보상

주축의 오차운동은 절삭력뿐만 아니라, 주축 내부의 상태, 회전수에 따른 자이로 효과에 의한 영향 등이 포함되어 측정된다⁽¹¹⁾. 공회전 상태의 주축 고유의 특성을 미리 파악하여 절삭 중에 측정된 신호에서 제거하여 주어야 한다.

Fig. 3과 같은 신호 파형에는 Fig. 4처럼 회전 속도에 따른 주축 고유의 오차운동 성분이 포함되어 있다. 본 센서 시스템에서는 저장된 주축 특성에 의한 오차운동 성분과 절삭 중 오차운동의 회전수에 대한 1x 성분을 동기화하여 주축

특성에 의한 성분을 제거하였다.

2.3 절삭력과 주축 변위의 관계

다음 단계는 절삭력과 주축 센서에서 측정된 변위의 관계를 정확하게 모델링하는 것이다. 고속 주축은 강성 및 동특성이 회전수 및 주축 발열 상태 등에 따라 달라진다⁽¹¹⁾. 따라서 힘-변위 관계 모델을 정하기 위해서는 주축 회전수를 바꿔가며 정적인 절삭력부터 높은 주파수의 동적인 절삭력까지 주축-공구 시스템을 가진 하면서 주축 변위 센서에서의 응답을 측정하여 주축 회전수 및 가진 주파수에 대한 힘-변위 응답을 파악해야 한다. 특히 고속 밀링 주축은 동특성 파악이 까다로운 시스템으로써 공구 끝단에 베어링을 장착하고 충격 가진 방식으로는⁽⁹⁾ 충분하지 않다. 마그네틱 가진기처럼 비접촉으로 고주파까지 주기적인 가진을 주어야 실제와 유사한 환경에서 주파수 응답 특성을 파악할 수 있다.

대상 밀링 주축의 동특성 파악을 위해 제작된 가진기 시스템 사양은 다음과 같다. 최대 가진력은 300N, 최대 가진 주파수 2kHz의 사양이다. 원통형 변위 센서는 가진기에도 장

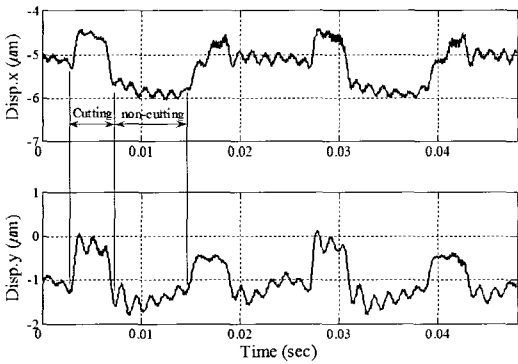


Fig. 3 Raw spindle displacement signals

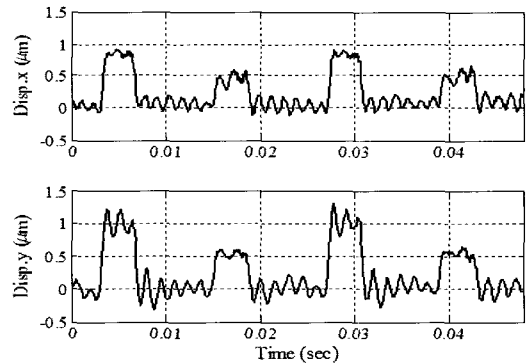


Fig. 5 Spindle displacement signals after compensation

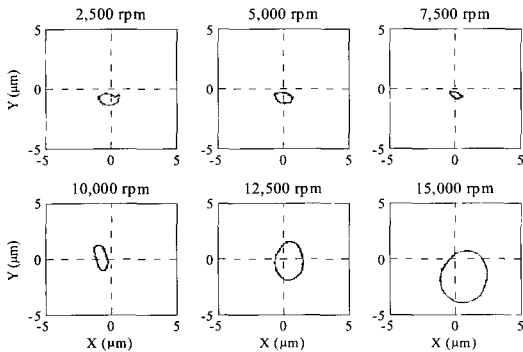


Fig. 4 Characteristic spindle runout signals

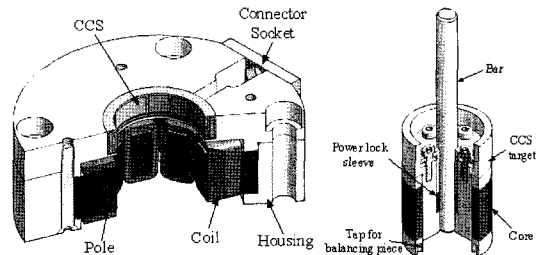


Fig. 6 Exciter system for measuring the tool-spindle system frequency response function

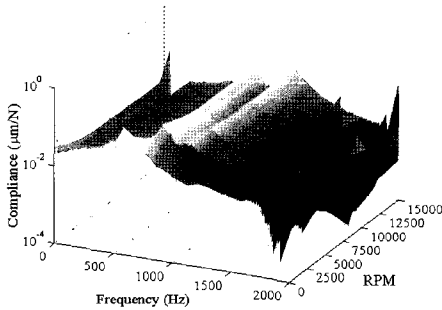
착되어 가진 대상인 로터의 회전 중심과 가진력 중심을 일치 시키는데 활용된다. 가진력 중심과 회전자의 중심을 일치시키는 것은 가진력의 선형성 보장을 위함이다. 가진력과 응답의 푸리에 변환을 각각 $F_x(\omega)$, $F_y(\omega)$, $Q_x(\omega)$, $Q_y(\omega)$ 라고 하면, 이들의 관계는 다음과 같다.⁽⁹⁾

$$\begin{bmatrix} Q_x(\omega) \\ Q_y(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{xx}(\omega) & H_{xy}(\omega) \\ H_{yx}(\omega) & H_{yy}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x(\omega) \\ F_y(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

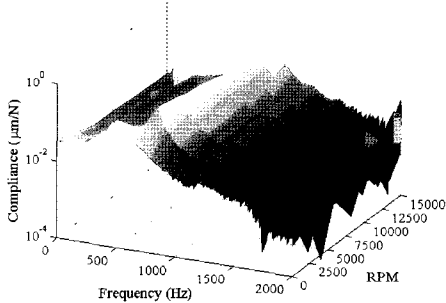
$$Q(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (2)$$

Fig. 7은 이렇게 구한 주축의 정규화 된 컴플라이언스이며, 주파수 영역에서의 주축의 컴플라이언스를 정하중에 대한 컴플라이언스로 나누어 무차원화 한 값이다.

X, Y 방향 모두 회전속도가 증가할수록 1차 공진점에서의 공진주파수가 증가하고 진폭은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 앵글러 콘택트 볼베어링 단순 O-배열의 경우 주축 회전에 의한 예압량의 증가로 베어링 강성이 증가한 것으로 판단된다⁽¹²⁾. 최종적으로 완성된 주축의 컴플라이언스의 역



(a) x-direction compliance of the spindle



(b) y-direction compliance of the spindle

Fig. 7 Dynamic compliances of the spindle according to the spindle speed and driving force frequency

행렬을 취하면 주축의 회전속도에 대한 동강성을 구할 수 있으며, 주축 특성을 보정한 변위 신호를 이용하여 절삭 가공 중 주축에 인가되는 절삭력을 계산한다.

$$F(\omega) = H^{-1}(\omega)Q(\omega) \quad (3)$$

2.4 절삭력 측정

Fig. 8과 9는 공구동력계에서 측정된 절삭력과 주축 변위 센서를 이용해 얻어진 절삭력을 비교한 결과이다. 주축 변위

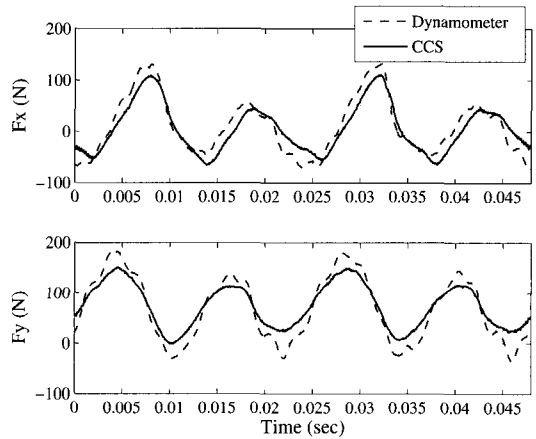


Fig. 8 Cutting test result at 2,500rpm(rotating frequency: 41.67Hz, dominant cutting frequency: 83.33Hz)

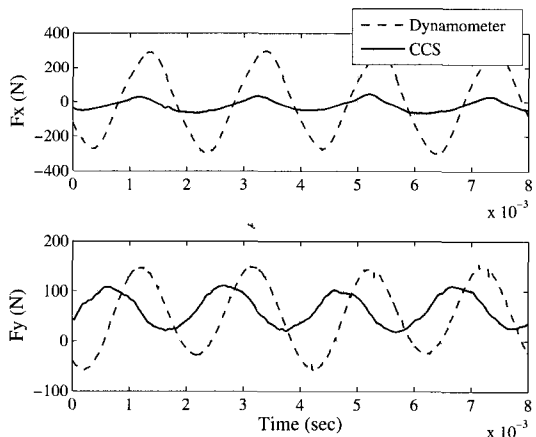


Fig. 9 Cutting test result at 15,000rpm(rotating frequency: 250Hz, dominant cutting frequency: 500Hz)

센서에서는 고속 가공 시에 절삭력이 감소하는 일반적인 경향이 확인 가능하다. 공작물의 질량이 더해져 고유진동수가 낮아진 공구동력계의 경우, 공구동력계를 보정 없이 사용하는 것은 곤란함을 확인할 수 있다.

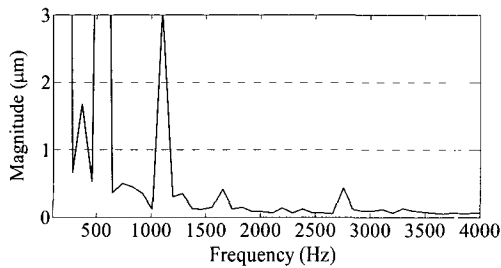
3. 가공 상태 측정 및 제어 실험

3.1 표면 조도 예측

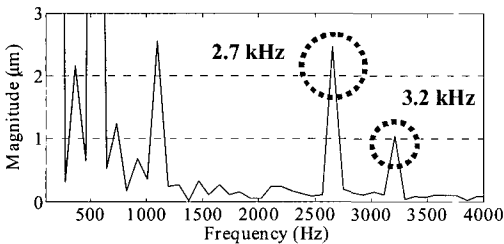
가공면의 표면 조도도 센서 신호를 이용하여 간접적으로 예측이 가능하다. 주축 변위 신호의 중심선 평균만을 이용한 선형 예측 모델도 90% 수준의 예측 정밀도를 보였다⁽¹³⁾. 선형 예측 모델을 얻기 위해 많은 실험이 요구되지만 가속도계를 사용하는 것에 비해 직접적으로 변위 신호를 이용함으로써 보다 정확한 표면 조도 예측 모델을 얻을 수 있다.

3.2 채터 측정

주축 변위 신호는 절삭안정영역을 구하기 위해서도 효과적으로 이용된다. 주축 회전 속도 15,000rpm까지 절삭 깊이를 0.5~5mm 범위에서 진행한 측면 절삭 중 안정 영역과 불안정 영역의 신호를 비교하여 보면 다음과 같다. 채터가 발생하는 경우 주축-공구계 진동 모드 중 6차 모드에 해당하는 2.7kHz의 높은 주파수 성분들이 관찰된다. 채터 발생여부는



(a) Spindle displacement signal for stable cutting



(b) Spindle displacement signal for unstable cutting

Fig. 10 Stable and unstable cutting

2.5~2.9kHz의 신호 대역을 선택하여 안정성 판별 지수로써 절삭안정영역을 구할 수 있었다.

3.3 스텝 가공에서의 이송속도 제어 실험

이송속도의 제어 여부가 가공면 형상 오차에 미치는 영향을 확인하기 위해 y축 절삭력-변위가 지배적으로 작용하는

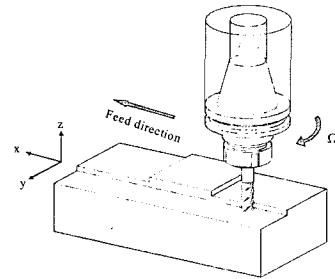
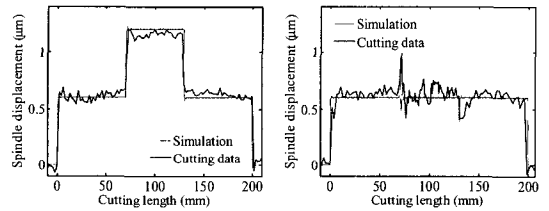
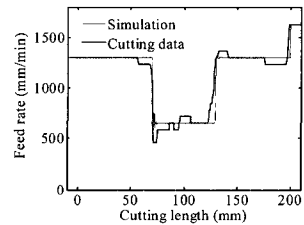


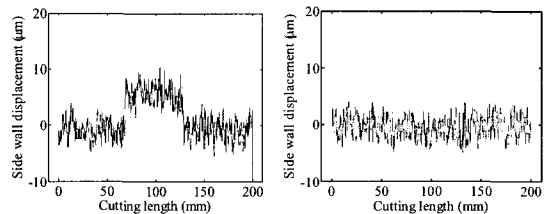
Fig. 11 Schematic of step cutting



(a) Spindle displacement with constant vs. controlled feed rate

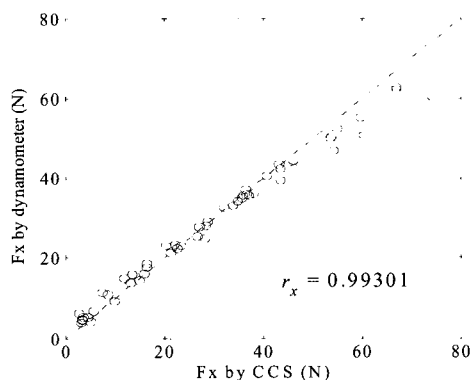


(b) Controlled feed rate

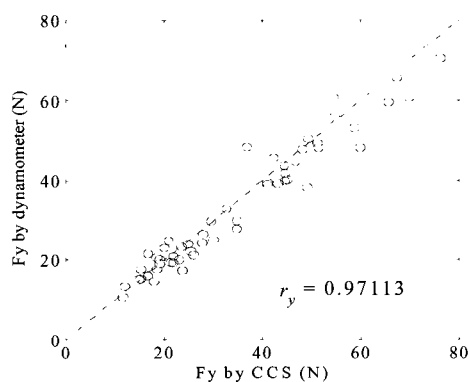


(c) Form error with uniform vs. controlled feed rate

Fig. 12 Controlled step cutting test at 13,000rpm



(a) x-directional cutting force



(b) y-directional cutting force

Fig. 13 Correlation diagram between cutting forces estimated by CCS and measured by dynamometer

하향밀링을 수행하였으며, 제어 기준 값으로 매 회전 당 주축 변위의 y축 최대값을 사용하였다. 공작물 재질은 두랄루민(A7075)이며 다음 Fig. 11과 같이 중앙이 높은 형상으로 써 가공 부하가 일정하지 않은 절삭 가공이다. 절삭 실험에는 직경 10mm, 날수 3개의 평엔드밀이 사용되었다.

Fig. 12 (a)에는 일정한 이송속도에서 부하의 변화 및 그에 의한 주축 변위 신호의 변화를 볼 수 있다. 이러한 절삭 부하의 변동에 의해 공구와 공작물 간의 위치 오차로 인해 발생하는 표면 위치 오차(Surface Location Error)⁽¹⁴⁾를 주축 변위 센서 신호를 이용하여 보정할 수 있었다. Fig. 12 (c)는 레이저 변위계로 가공된 면을 측정하여 비교한 것이다. 주축 변위 신호에서 부하의 변동을 파악하여 이를 제어함으로써 가공면의 형상 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

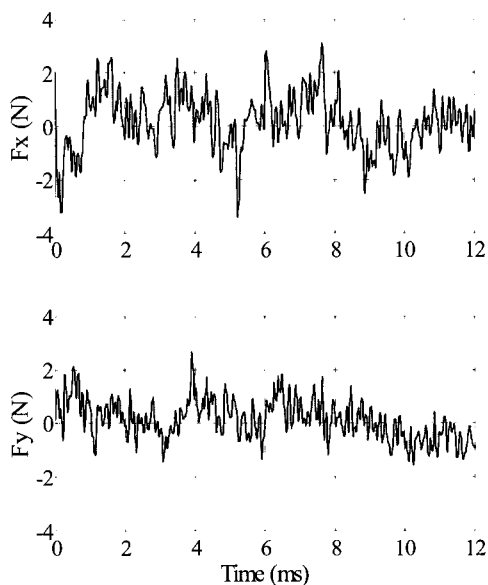


Fig. 14 Noise signals in the estimated cutting force during air-cutting at 10,000rpm

4. 결론

고속 밀링 가공이 중요한 분야로 특히 다이/몰드 분야를 들 수 있다. 공작물의 크기와 중량이 크고, 고속 가공이기 때문에 절삭력 및 이상 상태의 신호 크기도 매우 작은 편이며, 채터가 발생하는 경우에는 그 주파수 대역이 넓다. 공구동력계는 공작물의 무게가 더해진 상황에서 자체 고유진동수가 너무 낮아서 동적인 절삭력을 정확히 측정하기 곤란하다. 가장 저렴하다고 할 수 있는 가속도계, 전류 센서 등을 이용한 시스템은 정적인 절삭력에 대한 정확도가 떨어지며, 작은 변화량에 대해서는 민감하지 못하다는 단점이 있다. 이러한 상황을 고려해보면 본 논문에서와 같이 공작물이 아니라 주축에 장착되는 비접촉 방식의 센서를 이용하는 것이 대형 공작물의 고속 가공에서 특히 유리하다고 할 수 있다. 원통형 주축 변위 센서는 수십 나노미터 수준의 높은 변위 정밀도로 넓은 주파수 대역의 변위 신호를 측정함으로써 가공과 관련된 정보를 제공한다.

주축 변위 센서를 이용해 고속 절삭 상태를 측정하기 위해 필요한 핵심 요소는 센서 자체의 높은 변위 분해능, 넓은 주파수 측정 범위, 절삭력과 변위의 정밀한 모델, 표면 조도와 변위 신호의 실험적 모델링 등을 들 수 있다. 즉, 센서 자체의 정밀도가 높아야 되는 것과 각종 관계를 정확히 수립하기 위한 마그네틱 가진기의 예와 같은 정밀한 모델링 도구와

방법이 필요하다.

한편, 절삭 가공 상태 감시에 적용된 주축 변위 센서의 사양은 다음과 같다. 절삭력 예측에 관한 선형성은 절삭력 크기 80N 이내에서 매우 좋은 예측 결과를 보여주고 있다.

절삭력 분해능은 주축 변위 신호의 잡음과 주축의 강성의 곱으로 결정되며, 15,000rpm에서의 절삭력에 대한 잡음 수준은 약 5N 정도로 이를 절삭력 분해능으로 볼 수 있다. 일례로 고속에서 공회전시 주축 변위 신호로부터 계산된 절삭력 파형을 Fig. 14에서처럼 살펴보면 약 2N의 정도의 절삭력 측정 잡음이 관찰되는데, 이는 또한 주축 변위센서에서는 약 30nm에 해당되는 신호이다. 주축에서의 변위 측정을 통해 절삭 상태를 민감하게 측정하기 위해서는 가공 중인 환경에서 통상 수십~백 나노미터 수준의 변위 분해능이 확보되어야 한다. 공작기계 주축과 같이 노이즈가 심하고 오차 요인이 많은 환경에서는 본 센서처럼 대칭형 구조에 환경에 의한 영향에 상대적으로 둔감하면서 절삭 상태와 관련된 신호 변화에는 매우 민감한 센서 시스템이 가장 효과적이라고 할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Chung, Y. L. and Spiewak, S. A., 1994, "A model of high performance dynamometer," *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 279~288.
- (2) Tounsi, N. and Otho, A., 2000, "Dynamic cutting force measuring," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 1157~1170.
- (3) Spiewak, S. A., 1995, "Acceleration based indirect force measurement in metal cutting processes," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 1, pp. 1~17.
- (4) Kim, T. Y. and Kim, J. W., 1996, "Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 36, No. 8, pp. 925~937.
- (5) Jeong, Y. H. and Cho, D. W., 2002, "Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1559~1566.
- (6) Auchet, S., Chevrier, P., Lacour, M. and Lipinski, P., 2004, "A new method of cutting force measurement based on command voltages of active electro-magnetic bearings," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1441~1449.
- (7) Kim, I. H., Jang, D. Y., Kim, W. J. and Han, D. C., 2001, "In-process sensing of tool wear and process states using a cylindrical displacement sensor in hard turning," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. of Engineering Manufacture*, Vol. 215, No. 12, pp. 1673~1682.
- (8) Kim, I. H. and Jang, D. Y., 2003, "Cutting vibration monitoring using a spindle displacement sensor in turning," *Proc. of DETC'03, ASME, Chicago, Illinois, USA*.
- (9) Albrecht, A., Park, S. S., Altintas, Y. and Pritschow, G., 2005, "High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 993~1008.
- (10) Smith, P. T., Vallance, R. R. and Marsh, E. R., 2005, "Correcting capacitive displacement measurements in metrology applications with cylindrical artifacts," *Precision Engineering*, Vol. 29, pp. 324~335.
- (11) Jun, M. B., Ozdoganlar, O. B., DeVor, R. E., Kappor, S. G., Kirchheim, A. and Schaffner, G., 2002, "Evaluation of a spindle-based force sensor for monitoring and fault diagnosis of machining operations," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 741~751.
- (12) Li, H. and Shin, Y. C., 2004, "Analysis of bearing configuration effects on high speed spindles using an integrated dynamic thermo-mechanical spindle model," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 347~364.
- (13) Chang, H. K., Kim, J. H., Kim, I. H., Jang, D. Y. and Han, D. C., 2007, "In-process surface roughness prediction using displacement signals from spindle motion," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, pp. 1021~1026.
- (14) Mann, B. P., Young, K. A., Schmitz, T. L. and Dille, D. N., 2005, "Simultaneous stability and surface location error predictions in milling," *ASME Trans. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 127, pp. 446~453.