

주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구

김일해*, 장동영**, 한동철***

A Study on Cutting Force Measurement Using a Cylindrical Capacitive Spindle Sensor

Il-Hae Kim*, Dong-Young Jang**, Dong-Chul Han***

Abstract

A cylindrical capacitance-type spindle displacement sensor was developed and its effectiveness as a system to monitor cutting forces during hard turning was tested in this research. The sensor was installed between the face of spindle cover and the chucking element, and measured pure radial motion of the spindle under the condition with presence of roundness error at measured surface. To prove the effectiveness of the developed system, hard turning tests using ceramic inserts and tool steel as workpiece were conducted. The workpiece was hardened up to 65 Rc. The variations of pure radial motion of the spindle were measured during the cutting tests. The signals from the sensor showed the same pattern of cutting force variations from the tool dynamometer due to the progress of tool wear. As the flank wear of the ceramic tool increased, both static component of cutting forces and the amount of center shift of spindle orbit increased. Results from the research showed that the developed sensor could be utilized as an effective and cheap on-line sensing device to monitor cutting conditions and tool performance in the un-manned machining center.

Key Words : Capacitive Sensor(정전용량센서), Spindle(주축), Cutting Force(절삭력), Displacement(변위)

1. 서론

제조업에서 절삭 가공은 여전히 제품 생산에 있어 많은 시간과 비용을 차지하고 있으며, 공작기계의 고성능화가 이

루어져 왔다. 더불어, 각종 계측 장비를 이용한 절삭 가공 상태의 감시에 대한 관심과 필요성이 증대되고 있다. 특히, 제품의 주기가 짧아지고, 다품종 소량 가공물이 증가하는 추세여서 가공 시간 단축이 생산성에서 차지하는 비중이 날

* 서울대 터보동력기계연구소
(김일해 charlie@charliekim.net)
** 서울산업대 산업정보시스템공학과
*** 서울대 기계설계학과

로 높아가고 있다. 최근에는 지능형, 전문가형과 같은 개념이 중요시되고 있으며, 절삭 가공에 있어서는 공구 수명 예측의 신뢰도 향상, 난삭재 가공의 경우 절삭 조건에 관한 유연성, 자동화에 따른 절삭 상태 감시 필요성, 고정밀 가공, 환경 친화적인 절삭 공정이 연구되고 있다⁽¹⁾. 이를 위한 가공 상태 측정은 절삭력 측정을 통한 방법이 신뢰를 얻고 있으나 고비용으로 인해 산업 현장에서 일반적인 적용이 이루어지지 못하고 있다⁽²⁾.

본 연구에서는 원통형 정전용량 주축 변위 센서를 자체 제작하여 가공중의 주축 변위를 측정하였으며, 주축 변위와 절삭력의 관계를 실험적으로 살펴보았다. 먼저, 가공단에 절삭력이 작용할 때 주축계의 변위 거동을 파악하여 적절한 센서 설치 위치를 파악하였으며, 임펄스 해머를 이용한 가진 실험을 통해 변위 센서의 측정 성능을 시험해보았다. 그리고, 가공 중의 채터 발생 신호에 대한 측정 실험을 하였으며, 반복 절삭 실험에서 공구 마모의 진행에 따른 절삭력 측정 결과와 변위 센서 측정 결과를 비교 실험하였다. 여러 절삭 조건 및 공구 마모 상태에서 측정된 결과로부터 주축 변위 센서와 절삭력과의 관계식을 구했다. 주축 변위는 절삭력 변화에 민감한 파라미터이지만, 요구되는 변위 분해능이 수십 나노미터로 매우 높으며, 측정면의 표면 조도, 형상 오차 등에 의한 영향으로 인해 일반 상용 센서로는 측정이 곤란하다.

본 연구에서 개발하여 적용한 원통형 정전용량 주축 변위 센서는 원주면 전체를 측정면으로 주축 회전 부와 이를 감싸는 센서 면 사이에 형성되는 정전용량의 변화를 통해 변위를 측정하는 센서로서 측정면의 표면 조도, 형상 오차 등에 의한 영향이 적으며, 약 50nm 이상의 변위 분해능을 가지도록 제작된 것이다⁽³⁾. 본 센서의 변위 분해능은 공작 기계 주축의 강성을 고려하면 약 5N 이내의 절삭력 변화를 측정할 수 있다. 여기서 변위 분해능은 설계 수치 및 시스템 노이즈 수준, 측정 범위에 따라 차이가 나는데, 실제 적용 사례에서는 20nm까지 실현된 바 있다.

2. 주축 변위 센서

2.1 주축 변위 센서의 설치 위치

본 연구에서는 절삭시 절삭공구 상태의 변화로 인해 절삭력이 달라질 때 주축 회전 궤적의 변화를 이용하여 주축 변위를 측정함으로써 절삭력을 예측하는 센서 시스템을 제작하여 절삭력 및 공구 마멸 변화와 비교 실험하였다.

먼저 센서 설치 위치에 대해 고려해보면, 절삭 상태를 민감하게 측정하기 위해서는 절삭점에 가장 가까운 것이 좋으나 절삭유 및 절삭칩 등에 의한 간섭이 없는 곳에 설치하여야 한다.

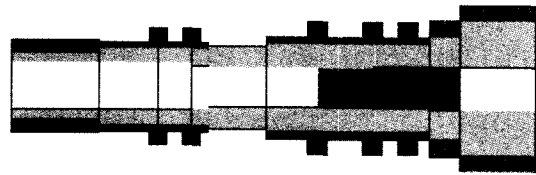


Fig. 1 Spindle model for vibration simulation

일반적으로 공작기계 주축의 베어링 내부는 절삭력에 의한 힘의 영향이 적게 나타나며 이는 다음과 같이 선반 주축에 대한 진동 해석 결과에서도 확인할 수 있다.

다음은 선반용 주축의 진동 해석 내용이며, 가공단에 7017 계열 앵글러 콘택트 베어링 3조를 사용하고 구동부에 7015 계열 앵글러 콘택트 베어링 2조를 사용한 베어링의 경우, 2000rpm에서 척 끝단에 1kgmm의 불평형질량이 있다고 가정했을 경우의 진동해석 결과이다.

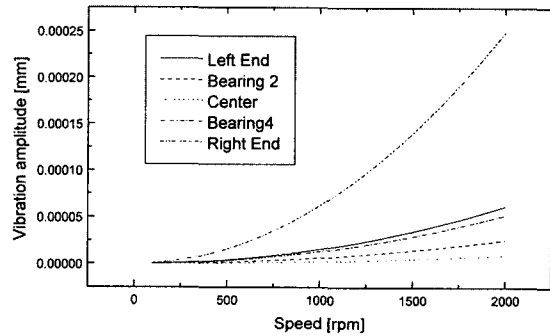


Fig. 2 Displacement at each node point

위 결과를 주축 축방향 위치에 따라 나타내면 다음 그림과 같다.

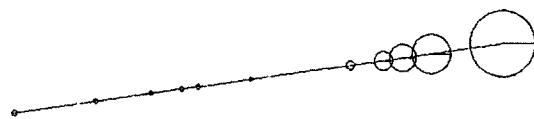


Fig. 3 Displacement along the axial node position

주축 가공단의 첫번째 베어링부터 구동단쪽으로는 주축의 변위가 상대적으로 미소하여 가공시의 절삭력 측정에 바람직하지 않으며, 절삭유 및 절삭칩 등의 영향을 피할 수 있도록 척과 주축 하우징 커버 부위에 변위 센서를 설치하도록 하였다. 원통형 정전용량 센서는 주축 상 원주면과 비접촉으로 변위 측정이 이루어지므로, 설치 후에 시스템 동특성에 영향을 미치지 않는다는 점도 장점으로 언급할 수 있다.

2.2 주축 변위 센서

원통형 정전용량 센서는 전체 원주면을 감싸는 구조로 제작되며, 원주면을 따라 4분할되어 마주보는 개개 센서의 값을 차등증폭하도록 설계되어 주축으로부터 유입되는 노이즈 성분의 동상 성분이 제거되도록 제작되었다.

이와 같이 제작된 원통형 정전용량 센서는 주축 하우징 커버 부에 부착되어 척 외경과의 틈새에 형성되는 정전용량 값을 통해 주축의 반경방향 변위를 측정한다.

센서 측정면의 경우, 측정면인 마스터 링, 마스터 실린더 혹은 주축의 측정 대상부의 진원도, 표면거칠기가 일정 수준 이하일 것이 요구된다. $0.1\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m}$ 정도의 센서 분해능이 필요한 경우 측정면은 $5 \sim 10\ \mu\text{m}$ 이하일 것이 요구되며, 주축 부품 가공 정밀도는 이보다 양호하여 $5\ \mu\text{m}$ 이내의 값을 가지는 것이 보통이다.

주축 변위 센서를 이용한 간접적인 절삭력 측정은 절삭력에 의해 야기된 유한 강성 주축의 변위 변동량에 의한 것이다. 따라서, 변위 측정 정밀도가 높아질수록 이를 유발한 절삭력의 변동량을 더욱 정밀하게 측정할 수 있음을 의미한다. 절삭 가공에서의 절삭력은 수십에서 수백 N 정도의 값을 보이며, 수 십 N 이하의 절삭력 변동량에 대해 민감하여야 이상 진동 및 마멸에 대한 관측이 가능하다. 공작기계 주축은 통상 $10 \sim 20\text{kgf}/\mu\text{m}$ 의 강성을 가지며 이 경우 10N 정도의 절삭력 변화를 관측하기 위해서는 $50 \sim 100\text{nm}$ 정

도의 변위 분해능이 필요하다. 주축의 강성이 낮은 경우에는 같은 절삭력에 대한 주축 변위가 크므로, 요구되는 변위 분해능 수준도 낮다.

2.3 실험용 시스템 구성

본 연구에서는 원통형 정전용량형 주축 변위 센서를 제작하여 척 뒷편에 설치하였고, 이를 이용하여 절삭시 절삭력 변화에 따른 주축의 변화를 측정하였다. 공구상태의 변화에 따른 주축의 운동 변화와 절삭력 변화의 상관관계를 파악하기 위해서, 공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 공작물은 원통 형상을 가지며 열처리를 통해 HRc 65가 되도록 제작하여 경도계로 측정 확인하였고, 공구는 NTK社의 CNGA 120408-TN 세라믹 인서트를 사용하였다.

절삭력 측정을 위한 공구동력계의 경우 낮은 주파수대역에서 우수한 특성을 보이는 반면, 1kHz 이상에서의 응답특성을 좋지 않은 편이다⁽⁴⁾. 정전용량을 이용한 원통형 변위 센서는 약 10kHz의 주파수대역을 가지도록 제작되었다. 신호처리를 위해서는 IBM-PC가 사용되었으며, DT-3010 AD 보드와 HP-VEE를 사용하여 변위 신호 및 절삭력 신호의 측정 및 후처리를 하도록 프로그램을 제작하였다.

3. 실험 결과

3.1 주축 궤적 신호의 측정 실험

실험은 절삭력의 정적인 성분과 동적인 성분에 대해 나누어 이루어졌다. 동적인 절삭 가진력에 의한 변위 신호 측정 결과를 살펴보기 위해서는 임펄스 해머를 이용한 가진 실험과 긴 공작물과 심한 절삭조건에서의 채터 발생 실험을 수행하였고, 정적인 절삭력에 의한 변위 신호 측정 결과는 공구 마멸에 의한 변화를 고려하여 실험하였다. 또한, 절삭력이 작용하는 거리가 센서 설치 위치에 가까워짐에 따라 감

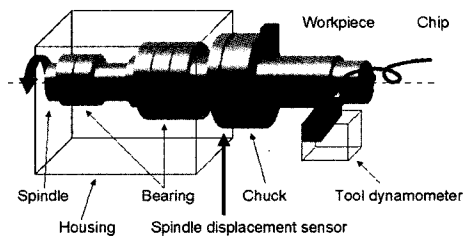


Fig. 4 Sensor installation position at spindle system

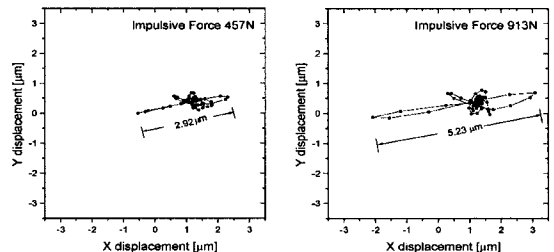


Fig. 5 Measured spindle displacement sensor signals by impulsive forces at workpiece end point

소하는 모멘트의 영향에 대한 실험을 하였다.

Fig. 5는 먼저 순간적인 가진력에 의한 변위 센서의 성능을 확인해보기 위해 정지 상태에서 주축 변위 센서 설치 위치에 임펄스 해머로 가진한 결과이다.

다음은 858rpm으로 회전하고 있는 공작물 끝단을 각기 다른 크기의 힘으로 임펄스 해머로 가진한 결과이다.

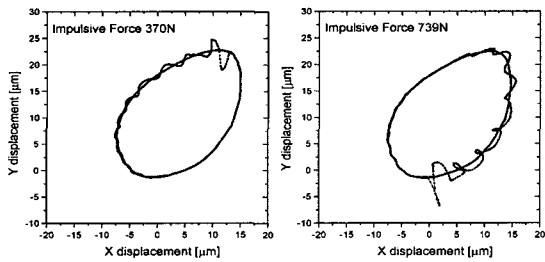


Fig. 6 Measured spindle displacement sensor signals by impulsive forces at workpiece end point when spindle is rotating at 858rpm

3.2 가공 중의 주축 궤적 신호의 측정 실험

다음 Fig. 7은 정상적인 절삭이 이루어지고 있는 경우에 실시간으로 측정된 신호 및 주파수 영역의 신호이다. chatter가 발생한 경우에는 Fig. 8과 같은 진동 신호가 측정되었다.

측정 결과는 한 회전 분량의 데이터를 나타내며, 시간 및 주파수 영역의 출력으로 구성되어 있다. 진동이 발생한 Fig. 8

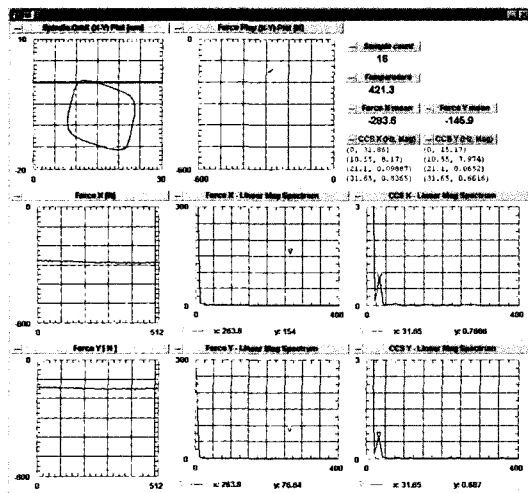


Fig. 7 Measured signals by spindle sensor and dynamometer when cutting state was normal

의 결과에서 주축 변위 센서의 측정 결과와 공구 동력계에 의한 측정 결과에서 진동의 증가, 감쇠가 동일한 수준으로 측정되며, 주파수 분석 결과에서도 이를 확인할 수 있다.

3.3 공구 마멸에 의한 측정 신호의 변화

절삭 조건 및 공구 마멸에 의해 변동되는 정적인 절삭력의 변화는 주축 변위 센서에서 측정된 회전 궤적의 중심의 변화량을 통하여 관찰할 수 있다.

가공 중의 절삭력에 의한 영향은 주축 회전 궤적의 중심이 이동하는 크기로 나타난다. 절삭이 시작되면 축 회전 궤적의 크기가 커지면서 절삭력 작용 방향으로 회전 중심이 이동하며, 절삭력의 크기에 비례하여 그 이동량이 결정된다.

다음은 두가지 절삭 조건에서 공구가 충분히 마멸될 때까지의 절삭력 및 주축 변위 센서의 측정 결과를 보인 것이다. Fig. 9는 절삭 깊이 200 μm, 절삭속도 60m/min, 이송 속도 50mm/min의 조건으로 절삭했을 때이며, Fig. 10은 절삭 깊이 300 μm, 절삭속도 48m/min, 이송 속도 50mm/min의 조건으로 절삭한 경우이다. 데이터 포인트가 ●인 것과 ▲인 것이 X 방향의 실험 결과이며, ○와 △는 Y 방향 실험 결과이다. 또, ●와 ○는 주축 회전 중심의 변동량을 나타내며, ▲와 △는 절삭력의 정적 성분 변동량을 나타낸다.

주축 회전 궤적의 중심 변화량은 주축 공회전 궤적의 중심과 절삭 중의 회전 궤적 중심의 평균값의 차이로 계산하였다. 공구의 이송 중에는 주축계에 작용하는 모멘트가 감

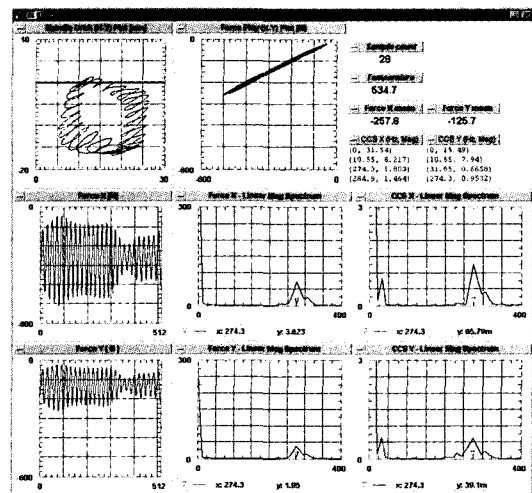


Fig. 8 Measured signals by spindle sensor and dynamometer when chattering was detected

소함으로 인해 같은 절삭력에 대해 회전 중심의 변화량이 조금씩 감소하지만, 20cm의 이송거리에 대해 약 60nm 정도의 값을 가져 실지로 절삭력 및 마멸에 의한 영향으로 관찰되는 신호의 크기 보다 매우 작으며, 그 변화량은 공구 마멸 정도에 의해 거의 영향을 받지 않는 것으로 측정되었다.

Fig. 9과 Fig. 10에서의 결과와 같이 마멸이 증가함에 따라 절삭 깊이 방향 신호가 가장 민감하게 변하는 것이 관찰된다⁽⁵⁾.

Fig. 9은 새 공구 인서트가 200 μm 마멸될 때까지, 절삭력은 X 방향으로 140N 더 이동한다. 주축 궤적 중심은 1.4 μm 증가한다. 40분 절삭 후의 급격한 증가는 모따기 면과 플랭크 면 사이가 마멸에 의해 경계가 사라지면서 경계 절삭날이 심하게 파손되었기 때문이다. 절삭 시간이 40분에 이를 때까지 플랭크 마멸이 주요한 마멸 현상으로 관찰되었다. 모따기 면의 마멸은 15분 절삭 전의 초기 절삭 상태에서 급격히 진행되었으며 모따기 면과 플랭크 면이 마멸에 의해 경계가 없어질 때까지 이 부분의 변동은 크게 관찰되지 않았다. 17분 동안 절삭 후, 모따기 면의 마멸이 인서트로부터 충분한 양이 제거되어 플랭크 면과 모따기 마멸에 의해 생긴 수직인 면 사이의 깨끗한 절삭날을 형성하였다. 17분과 24분 사이의 절삭 시간 사이에, 플랭크 마멸은 증가하지 않았지만, 절삭날의 깎여 나간 자국은 증가하였다. 그리고 충분한 깎여나간 자국이 생긴 후에, 다시 플랭크 마멸이 증가하였고 마멸에 의해 둥근 모양의 날이 편편해졌다.

Fig. 10은 사용된 세라믹 공구 인서트의 사용 범위의 상한에 가까운 조건으로의 두 번째 실험조건의 결과를 나타낸다. 그래프의 Y축 범위가 앞선 Fig. 9 보다 넓은 것을 참고

하면 한계 마멸에 이르는 절삭 시간도 짧으며 마멸 및 관련 측정 신호의 변동량과 급격하고 그 수치도 크다는 것을 확인할 수 있다. 14분 절삭 후, 공구의 플랭크 마멸량은 300 μm 까지 빠르게 증가하였고, 모따기 면과 플랭크 면 사이의 날에는 세라믹 조각이 뜯겨져 나간 것과 같은 자국이 관찰되었다.

3.4 센서와 절삭력의 관계

다음은 매 회전분의 공회전 궤적 중심에서 절삭 시작 직후의 차이를 제거하여 원점에 놓고, 그때부터 절삭 종료까지 절삭 중 주축 회전 중심의 변화량을 모아서 나타낸 것이다. 새 인서트 상태에서 동일 조건으로 절삭을 반복하여, 약 180 μm 의 플랭크면 마멸이 진행된 경우에도 변화량은 매우 작은 값이며 새 절삭 공구인 경우와 비슷한 측정결과를 보인다.

절삭력 작용 위치에 따른 주축 변위 센서 위치에서의 변위값의 관계를 선형으로 가정하여 회귀분석한 결과는 다음과 같다.

Table 1 Regression analysis result of measured orbit center signals and cutting position

Label	Estimate	Std. Error	t-value
Constant	0.035360	0.0012218	28.9419
Position	-0.00331	9.832e-5	-33.739
R Squared		0.7795	
Degrees of freedom		322	

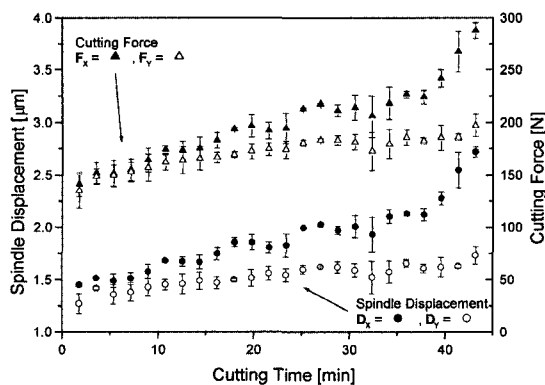


Fig. 9 Experiment results of both spindle sensor and dynamometer measurement at cutting condition of $d=200 \mu\text{m}$, $V_c= 60\text{m}/\text{min}$, $f=50\text{mm}/\text{min}$

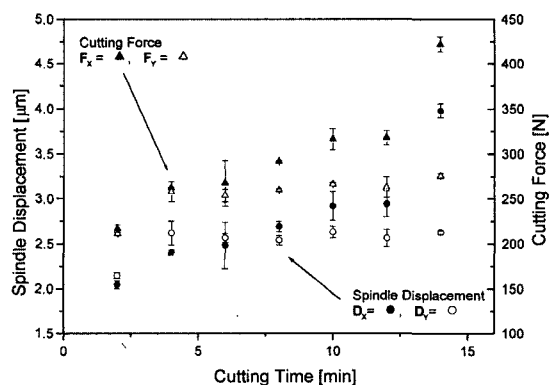


Fig. 10 Experiment results of both spindle sensor and dynamometer measurement at cutting condition of $d=300 \mu\text{m}$, $V_c= 48\text{m}/\text{min}$, $f=50\text{mm}/\text{min}$

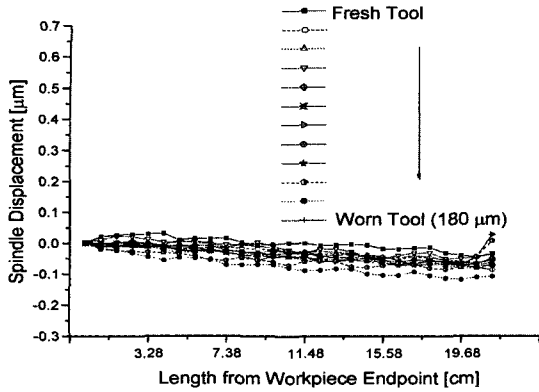


Fig. 11 Measured spindle center changes along the position of applied cutting force on workpiece

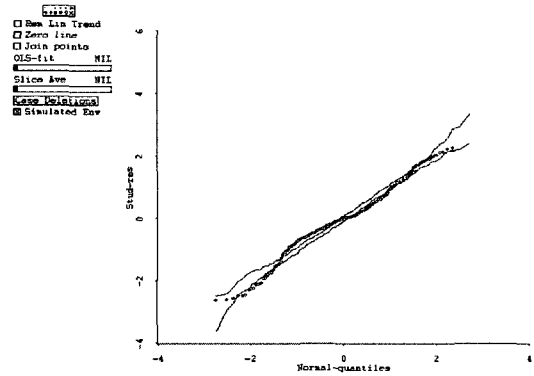


Fig. 12 Normal probability plot of the standardized residuals

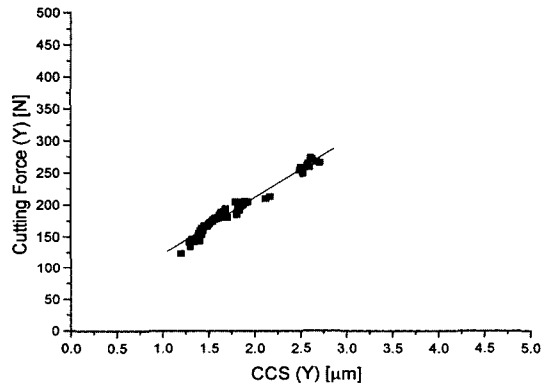
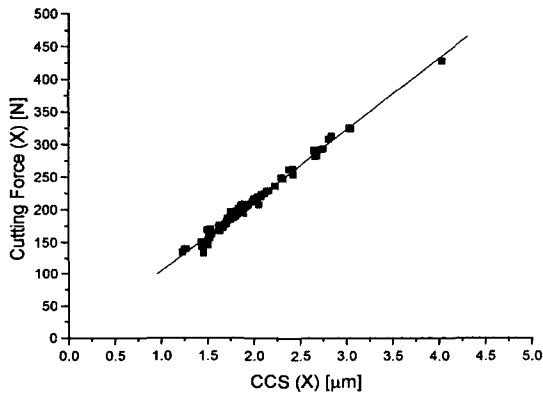


Fig. 13 Relationships between cutting force and spindle displacement sensor

Fig. 12는 선형화 가정을 검증하기 위한 정규화된 잔차의 표준 확률 분포 그림이며, 결과가 직선에 수렴하며 원점을 지나므로 선형 시스템으로 가정할 수 있다^[6].

한편, 공작물과 주축 시스템을 가공단 첫번째 베어링 축으로한 외팔보로 가정해 보면 주축 변위 센서 설치 위치에서의 변위값과 작용하는 모멘트는 다음 식과 같이 가정할 수 있다.

$$\delta_{CCS} = \frac{Mx_s^2}{2EI} \quad (1)$$

여기서, x_s 는 절삭 시작점, x_c 는 가공단 첫번째 베어링에서 센서 설치부까지의 거리, x_0 는 절삭 종료점을 의미한

다. 회귀 분석 결과를 적용하면 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta_{CCS} \Big|_{x=x_c} - \delta_{CCS} \Big|_{x=x_0} = \frac{(x_c - x_0)F_c \cdot x_s^2}{2EI} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\delta[nm]}{\Delta x[cm]} \Big|_{x=x_s} = \frac{F_c \cdot x_s^2}{2EI} = 3.31706 \quad (3)$$

식 (3)에서 절삭력 작용 거리에 따른 주축 회전 중심 변화량은 절삭력에 비례하여 증가하지만, 실제로는 공회전 중심에 대한 변화량의 5% 미만의 작은 값으로써, 변위 센서 분해능을 고려하면 이로 인한 영향은 매우 작다고 할 수 있다. 이와 같은 가정하에 절삭 중의 회전 중심 변화량의 평균값과 측정된 절삭력의 관계를 여러 가지 절삭 조건 및 마멸 경우에 대해 실험하여 다음과 같은 선형화된 관계식을 얻었다.

$$F_x = 109.2 \cdot CCS_x - 5.66 \quad (4)$$

$$F_y = 88.6 \cdot CCS_y + 33.66 \quad (5)$$

위 선형근사식에서의 표준편차는 X 방향에 대해 5.5%, Y 방향에 대해 6.7%의 값을 가진다. X 방향의 상수는 오차 범위에 해당하는 무시할 수 있는 값으로 판단되며, Y 방향의 강성 계수 및 상수는 주축 및 공작물의 질량에 의한 영향으로 판단된다.

여러 절삭 조건 및 공구 마멸 상태에서 측정된 절삭력과 주축 회전 궤적의 중심 이동량 간에는 위 Fig.13과 같이 매우 선형화된 관계를 보이며, 주축 변위센서의 측정값으로부터 절삭력의 변동을 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

절삭 가공 시스템에서 절삭 상태와 공구 마멸의 진단 및 감시 능력은 생산성 향상, 지능형 자동화 등의 측면에서 매우 중요하며, 현재까지는 공구동력계에 의한 절삭력 측정이 가장 신뢰성 있고, 재현성이 뛰어난 방법으로 간주되어왔다. 그러나, 충분한 분해능을 가지는 변위 센서를 통해 절삭력의 간접적인 측정이 가능하며, 본문의 식 (4)의 결과에 의하면 약 109N의 절삭력에 대해 설치된 주축 변위 센서에서는 1 μm의 값이 측정되며, 센서 분해능이 50nm 이하이므로 5N 이하 단위의 절삭력 변화가 측정 가능하다고 할 수 있다. 또한, 제시된 주축 변위 센서는 10kHz의 주파수 대역을 가지며 고주파 진동 성분의 측정에 유리하다. 그리고, 설치된 위치를 고려할 때 절삭 칩과 절삭유가 존재하는 환경에서도 사용이 가능하고, 센서 장착에 따른 시스템의 동특성 변화도 거의 없고, 비용도 공구동력계에 비하 매우 저렴하여 경쟁력 있는 진단, 감시 시스템의 개발이 가능하다. 본 센서는 반경방향의 절삭력을 받는 밀링, 연삭 등의 경우에도 충분히 적용 가능성이 있는 것으로 판단되며, 공작기계의 주축 개발단계에 적용된다면 지능형 공작기계 주축으로서 부가가치를 크게 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-008-3) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- (1) I.Ichiro, "Trends of the Manufacturing Technology Development in Japan - keynote paper," Proceedings of the Manufacturing Engineering: 2000 and Beyond, pp. 16~21, 1996.
- (2) D.E.Jr.Dimla, P.M.Lister, N.J.Leighton, "Neural Network Solutions to the Tool Condition Monitoring Problem in Metal Cutting - a critical review of methods," Int. J. Mach. Tools & Manufact. Vol. 37, No. 9, pp. 1219~1241, 1997.
- (3) I.H.Kim, S.S.Park, D.C.Han, "Measurement of Radial Error Motions in a Precision Air Spindle," Proceedings of the 6th Int. Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 1, pp. 753~761, 1996.
- (4) 양민양, "절삭 가공", pp. 166, 1997.
- (5) 염영하, "공작기계의 절삭이론", pp. 73, 1995.
- (6) S.Chatterjee, A.S.Hadi, B.Price, "Regression Analysis by Example," pp. 97, 2000.
- (7) 김일해, 박상신, 한동철, "원통형 커패시턴스 센서를 이용한 초정밀 공기주축의 회전오차 측정", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 637~642, 1995
- (8) 안형준, 장인배, 한동철, "형상 오차가 원통형 정전용량 변위센서의 축회전오차의 측정에 미치는 영향", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 487~490, 1997.
- (9) 김일해, 장동영, 한동철, "주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구", 한국공작기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 89~94, 2001.