

## 주축 변위 센서를 이용한 절삭력 측정에 관한 연구 A Study on Cutting Force Measurement Using Cylindrical Capacitance-Type Spindle Displacement Sensor

김일해\*, 박만진\*\*, 장동영\*\*\*, 한동철\*\*\*\*

\* 서울대학교 기계설계학과 대학원,

\*\* 서울산업대학교 산업정보시스템공학과 대학원

\*\*\* 서울산업대학교 산업정보시스템공학과

\*\*\*\* 서울대학교 기계설계학과

### 초록

A cylindrical capacitance-type spindle displacement sensor was designed and tested in the hard turning as a way to develop a sensor that can estimate cutting forces without using a tool dynamometer. The displacement sensor was installed between the face of spindle cover and the chucking element, and measured pure radial motion of the spindle. Ceramic inserts and tool steel workpiece of 65 Rc were used during the hard turning tests. The signals from the sensor showed the same pattern of cutting force variations as those from the tool dynamometer. The research results showed that the developed sensor could be utilized as an effective and cheap on-line sensing device to estimate cutting forces.

Keyword : Capacitive sensor (정전용량센서), Spindle (주축), Cutting force (절삭력), Displacement (변위)

### 1. 서론

제조업에서 절삭 가공은 여전히 제품 생산에 있어 많은 시간과 비용을 차지하고 있으며, 공작 기계의 고성능화는 이를 줄이기 위한 노력으로 시도 되고 있다. 더불어, 각종 계측 장비를 이용한 절삭 가공 상태의 감시에 대한 관심과 필요성도 증대되고 있다. 특히, 제품의 주기가 짧아지고, 다 품종 소량 가공물이 증가하는 추세여서 가공 시간 단축이 생산성에서 차지하는 비중이 날로 높아지고 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 측정장치인 공구동력계는 고비용으로 인하여 산업 현장에서 이용이 이루어지지 못하고 있다.[2]

본 연구에서는 주축 첫번째 베어링과 절삭점

사이에 설치하는 원통형 정전용량 주축 변위 센서를 설치하여 절삭력에 의해 주축 궤적 신호가 변하는 원리를 이용하여 궤적신호를 측정함으로써 가공 중 절삭력을 예상할 수 있는 시스템 개발을 목적으로 한다. 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 50nm의 변위 분해능을 가지도록 제작되었다.[3] 제시된 변위 분해능은 공작 기계 주축의 강성을 고려하면 약 5~10N 정도의 절삭력 분해능에 해당하는 것으로 볼 수 있다.

### 2. 본론

본 연구에서는 절삭시 절삭공구 상태의 변화로 인해 절삭력이 달라질 때 주축 회전 궤적의 변화를 이용하여 주축 변위를 측정함으로써 절삭력을 예측하는 센서 시스템을 제작하여 절삭력을 예측하고 이를 이용하여 공구 마모과정에서 생기는 절삭력과 센서신호의 변화를 측정하였다.

센서의 설치에 절삭 상태를 민감하게 측정하기 위해서는 절삭점에 가장 가까우면서 절삭 유 및 절삭칩 등에 의한 간섭이 없는 곳에 설치하였다. 일반적으로 공작기계 주축의 베어링 내부는 절삭력에 의한 힘의 영향이 적게 나타난다. 이는 선반 주축에 대한 진동 해석 결과에서도 확인할 수 있다. 가공단에 7017 계열 앵글러 콘택트 베어링 3 조를 사용하고 구동부에 7015 계열 앵글러 콘택트 베어링 2 조를 사용한 베어링의 경우, 2000rpm에서 척 끝단에 1kgmm의 불평형량이 있다고 가정했을 경우의 진동해석 결과이다.

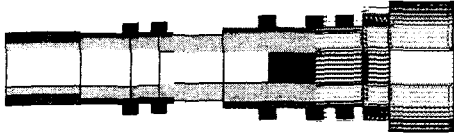


Fig.1 진동 해석을 위한 주축 모델

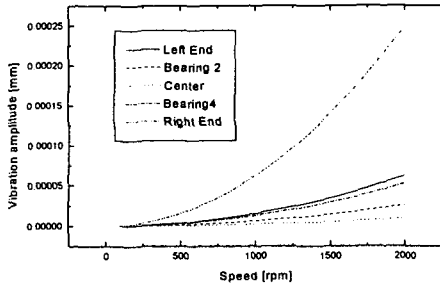


Fig.2 주요 노드점의 변위 거동

위 결과를 주축 축방향 위치에 따라 나타내면 다음 그림과 같다.



Fig.3 주축 위치에 따른 변위 거동

진동해석의 결과를 이용하여 센서를 설치한 위치는 주축 가공단의 첫번째 베어링부터 최쪽으로 주축의 변화가 상대적으로 크기 때문에 유리하고 또한 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 장점을 가지고 있다.

원통형 정전용량 센서는 전체 원주면을 감싸는 구조로 제작되며, 원주면을 따라 4 분할되어 마주보는 개개 센서의 값을 차동증폭하도록 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, 표면 거칠기가 일정 수준 이하일 것이 요구된다.  $0.1\mu\text{m}$  ~  $1\mu\text{m}$  정도의 센서 분해능이 필요한 경우 측정면은  $5\sim 10\mu\text{m}$  이하일 것이 요구되며, 주축 부

품 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, 수십 N 이하의 절삭력 변동량에 대해 민감하여야 이상 진동 및 마모에 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  $50\sim 100\text{nm}$  정도의 변위 분해능이 필요하다. 주축의 강성이 낮은 경우에는 같은 절삭력에 대한 주축 변위가 크므로, 요구되는 변위 분해능 수준도 낮다고 할 수 있다.

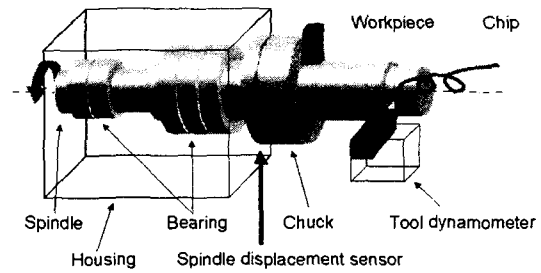


Fig.4 원통형 정전용량 센서의 설치 위치

본 연구에서 센서의 유용성과 효율성을 증명하기 위하여 하드터닝 실험을 실시하였다. 원통형 정전 용량형 주축 변위 센서 이외에도 공구 상태의 변화에 따른 주축의 운동 변화와 절삭력 변화의 상관관계를 파악하기 위해서, 공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 공작물은 원통 형상을 가지며 열처리를 통해 HRC 65 가 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.

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 마모에 의한 변화를 고려하여 실험하였다. 또한, 절삭력이 작용하는 거리가 센서 설치 위치에 가까워짐에 따라 감소하는 모멘트의 영향에 대한 실험을 하였다.

다음 Fig.5 는 먼저 순간적인 가진력에 의한 변위 센서의 성능을 확인해보기 위해 정지 상태에서 주축 변위 센서 설치 위치에 임펄스 해머로 가진한 결과이다. 각각 457N, 913N 의 가진이 이루어졌으며, 가진력의 주파수 성분이 저주파 대역을 중점으로 하여 전체 주파수 대역에서 균일한 수준이 나오도록 주의하여 가진했다.

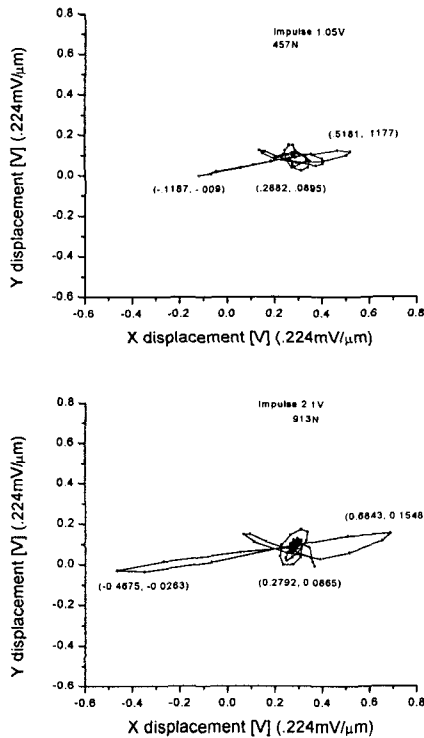


Fig.5 임펄스 해머 가진 신호

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

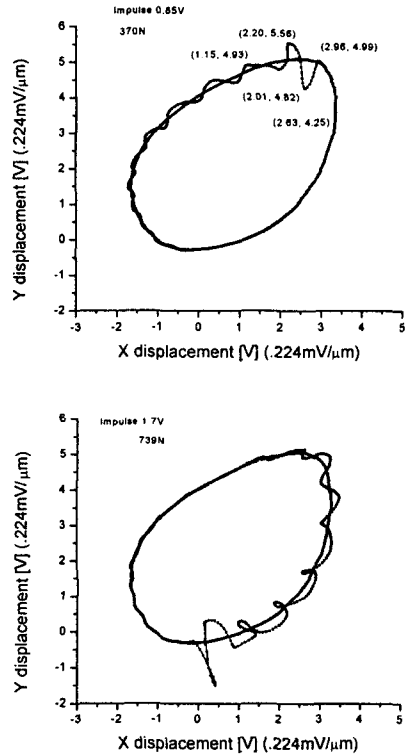


Fig.6 회전시 임펄스 해머 가진 신호

다음은 정상적인 절삭이 이루어지고 있는 경우에 실시간으로 측정된 신호 및 주파수 영역의 신호이다.

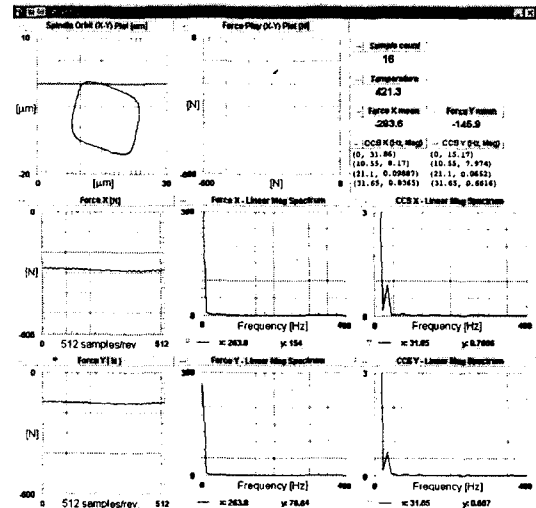


Fig.7 정상 절삭시의 실시간 측정 신호

채터가 발생한 경우에는 다음과 같은 진동 신호가 변위 센서와 공구동력계 측정 결과에서 다음과 같이 나타난다.

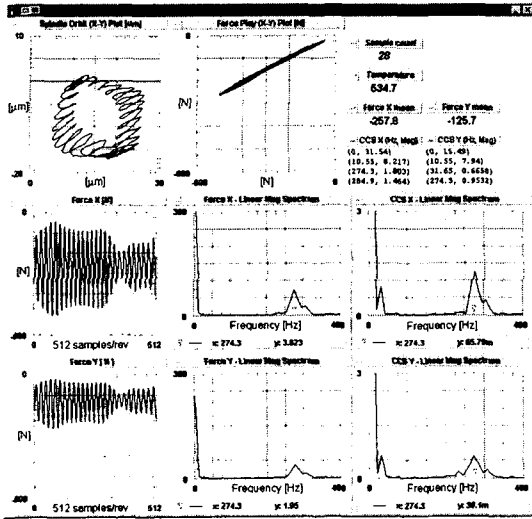


Fig.8 채터 발생시의 실시간 측정 신호

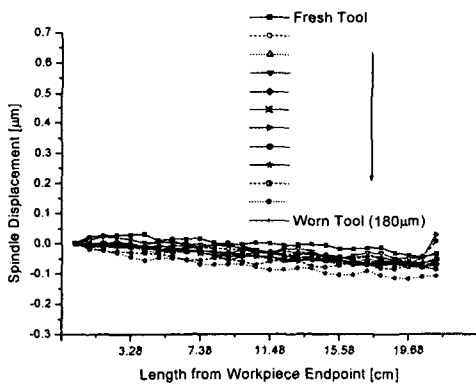


Fig.9 절삭력 작용 위치에 따른 센서 측정 값

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

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		

Table.1 회귀 분석 결과

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

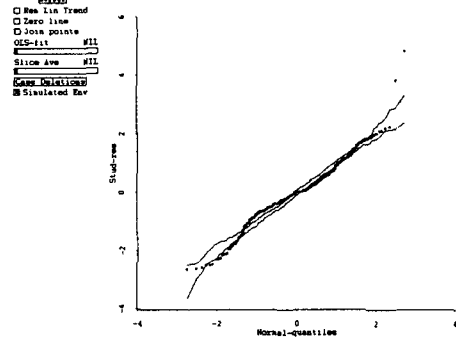


Fig.10 Normal probability plot of the standardized residuals

한편, 공작물과 주축 시스템을 가공단 첫번째 베어링을 축으로 한 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 가공단 첫번째 베어링에서 센서 설치부까지의 거리,  $x_c$ 는 절삭 시작점,  $x_0$ 는 절삭 종료점을 의미한다. 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 여러가지 절삭 조건 및 마모 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 오차범위에 해당하는 무시할 수 있는 값으로 판단되며, Y 방향의 강성 계수 및 상수는 주축 및 공작물의 질량에 의한 영향으로 판단된다.

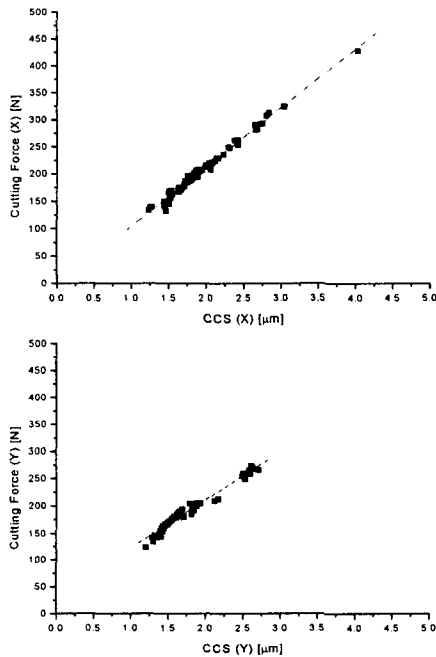


Fig.11 절삭력과 주축 변위의 관계

여러 절삭 조건 및 공구 마모 상태에서 측정된 절삭력과 주축 회전 궤적의 중심 이동량의 관계를 Fig.11 에 보여 주고있다. 선형화된 관계를 보이며, 주축 변위센서의 측정값으로부터 절삭력의 변동을 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

절삭 조건 및 공구 마모에 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 마모될때까지의 절삭력 및 주축 변위 센서의 측정 결과를 보인 것이다. Fig.12 는 절삭 깊이 200 $\mu$ m, 절삭속도 60m/min, 이송 속도 50mm/min 의 조건으로 절삭했을때이며, Fig.13 은 절삭 깊이 300

$\mu$ m, 절삭속도 48m/min, 이송 속도 50mm/min 의 조건으로 절삭한 경우이다. 데이터 포인트가 ●인 것과 ▲인 것이 X 방향의 실험 결과이며, ○와 △는 Y 방향 실험결과이다. 또, ●와 ○는 주축 회전 중심의 변동량을 나타내며, ▲와 △는 절삭력의 정적 성분 변동량을 나타낸다.

주축 회전 궤적의 중심 변화량은 절삭이 시작되기전 궤적의 중심과 절삭 중의 회전 궤적 중심의 평균값의 차이로 계산하였다. 공구의 이송중에는 주축계에 작용하는 모멘트가 감소함으로 인해 같은 절삭력에 대해 회전 중심의 변화량이 조금씩 감소하지만, 20cm 의 이송거리에 대해 약 60nm 정도의 값을 가져 실지로 절삭력 및 마모에 의한 영향으로 관찰되는 신호의 크기 보다 매우 작으며, 그 변화량은 공구 마모 정도에 의해 거의 영향을 받지 않는 것으로 측정되었다.

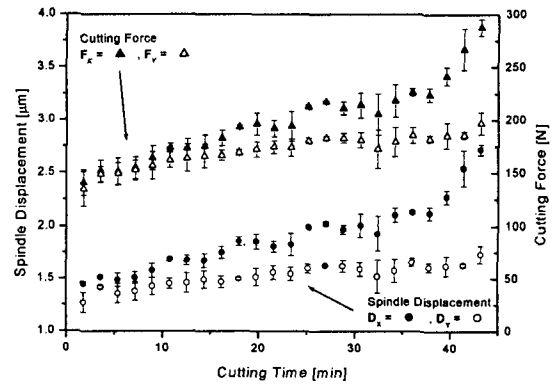


Fig.12 d=200 $\mu$ m, Vc=60m/min, f=50mm/min

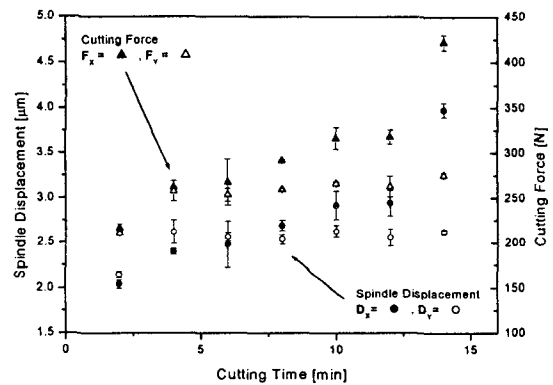


Fig.13 d=300 $\mu$ m, Vc=48m/min, f=50mm/min

Fig.12 과 Fig.13 에서의 결과와 같이 마모가 증가할수록 절삭 깊이 방향 신호가 가장 민감하게 변하는 것이 관찰된다.[5] Fig.12 는 새 공구 인서트가 200 $\mu$ m 마모될 때까지, 절삭력

은 X 방향으로 140N 더 이동한다. 주축 궤적 중심은  $1.4\mu\text{m}$  증가한다. 40 분 절삭 후의 급격한 증가는 모따기 면과 플랭크 면 사이가 마모에 의해 경계가 사라지면서 경계 절삭날이 심하게 파손되었기 때문이다. 절삭 시간이 40 분에 이를 때까지 플랭크 마모가 주요한 마모 현상으로 관찰되었다. 모따기 면의 마모는 15 분 절삭 전의 초기 절삭 상태에서 급격히 진행되었으며 모따기 면과 플랭크 면이 마모에 의해 경계가 없어질 때까지 이 부분의 변동은 크게 관찰되지 않았다. 17 분 동안 절삭 후, 모따기 면의 마모가 인서트로부터 충분한 양이 제거되어 플랭크 면과 모따기 마모에 의해 생긴 수직면 사이의 깨끗한 절삭날을 형성하였다. 17 분과 24 분 사이의 절삭 시간 사이에, 플랭크 마모는 증가하지 않았지만, 절삭날의 깎여나간 자국은 증가하였다. 그리고 충분한 깎여나간 자국이 생긴 후에, 다시 플랭크 마모가 증가하였고 마모에 의해 둥근 모양의 날이 편편해졌다. Fig.13 은 사용된 세라믹 공구 인서트의 사용 범위의 상한에 가까운 조건으로의 두 번째 실험조건의 결과를 나타낸다. 그래프의 Y 축 범위가 앞선 Fig.9 보다 넓은 것을 참고하면 한계 마모에 이르는 절삭 시간도 짧으며 마모 및 관련 측정 신호의 변동량과 급격하고 그 수치도 크다는 것을 확인할 수 있다. 14 분 절삭 후, 공구의 플랭크 마모량은  $300\mu\text{m}$  까지 빠르게 증가하였고, 모따기 면과 플랭크 면사이의 날에는 세라믹 조각이 떨어져 나간 것과 같은 자국이 관찰되었다.

다음은 매 회전분의 절삭 시작후부터 절삭 종료까지 절삭중 주축 회전 중심의 변화량을 모아서 나타낸 것이다. 약  $180\mu\text{m}$  의 플랭크면 마모가 진행된 경우에도 변위 센서의 최대 분해능이 50nm 인 것을 감안하면, 변화량은 매우 작은 값이며 새 절삭 공구인 경우와 비슷한 측정결과를 보인다.

### 3. 결론

절삭 가공 시스템에서 절삭 상태와 공구 마모의 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 109N 의 절삭력에 대해 설치된 주축 변위 센서에서는 10 m 의 값이 측정되며, 센서 분해능이 50nm 정도이므로 약 5N 단위의 절삭력 변화가 측정 가능하다고 할 수 있다. 또한, 제시된 주축 변위 센서는 10kHz 의 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 비해 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.

### 4. 후기

본 연구는 과학재단의 2000 년 목적기초연구의 특정기초연구의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Ichiro, I., "Trends of the Manufacturing Technology Development in Japan - keynote paper," Proceedings of the Manufacturing Engineering: 2000 and Beyond, pp.16-21, 1996
2. Dimla, D.E.Jr, Lister, P.M., Leighton, N.J., "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. Kim, I.H., Park, S.S., Han, D.C., "Measurement of Radial Error Motions in a Precision Air Spindle," Proceedings of the 6<sup>th</sup> 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. Chatterjee, S, Hadi, A.S., Price, B, "Regression Analysis by Example," pp.97, 2000