

# 고속 주축 열변위 보상을 위한 1축 변위 센서 개발

## 1-Axis Displacement Sensor for Compensation Thermal Error of High-Speed Spindle

\*최종하<sup>1</sup>, #김일해<sup>2</sup>, 박성욱<sup>3</sup>, 장동영<sup>4</sup>

\*J. H. Choi<sup>1</sup>, #I. H. Kim<sup>2</sup> (charliekim.com@gmail.com), S. W. Park<sup>3</sup>, D. Y. Jang<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 서울산업대 NID 융합기술대학원, <sup>2</sup>주캡시스, <sup>3</sup>현대위아 주식회사, <sup>4</sup>서울산업대학교 산업정보시스템공학과

Key words : Displacement Sensor, High Speed Spindle, Thermal error

### 1. 서론

절삭 가공은 여전히 제품 생산에 많은 시간과 비용을 차지하고 있으며 가공시간을 확실하게 줄일 수 있는 고속 가공의 필요성이 부각되고 있다. 높은 효율, 높은 생산성을 지향하게 되면서 주축계를 고속화해야 하는 것이 필수조건이 되었다. 고속 가공은 기존의 가공 방법들과는 달리 FF(Flash fine) 가공에 의해 빠르게 가공하고 정밀한 금형과 부품을 만들기 위해 필수적인 가공이 되어 가고 있다.[1-3] 고속가공은 가공속도가 빨라짐으로 인해서 공구의 마모가 증가하고 주축의 발열로 인하여 불안정하여지고 주축의 고속 회전과 고주파의 절삭력으로 인한 기계 진동이 증가하는 등의 특징이 있다. 일반적으로 공작기계의 오차는 다양한 원인에 의하여 발생하게 된다. 그 중 주된 오차는 구조물의 기하학적 오차, 열변형 오차, NC 시스템 및 구동부에 기인한 오차로 알려져 있다. 이 중에서 주축부에서 발생하는 열변형에 의한 오차가 공작물에 발생하는 전체 가공 오차의 상당 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다. 주축 변위를 직접 측정하는 것이 실제 절삭에 영향을 미치는 정도를 알아보기 위해서도 필요하다.[4]

본 연구에서는 고속 주축에 내장하기 용이하고 주축부의 열변형 오차를 보정하기 위한 방법으로 1축 원통형 정전용량 변위센서(1 axis Cylindrical Capacitive displacement Sensor : CCS)를 고안하였다.

### 2.1 축 변위 센서

정전용량 변위 센서에서의 정전용량의 값은 식(1)에서와 같이 두 도체가 겹치는 면적에 비례하고 틈새의 간격에 반비례한다. 본 연구에서는 z 축 방향의 변위 측정을 위해 스피indle과 센서와 겹치는 면적(A)의 변화를 이용한 복렬 원통형 센서를 제작하였다. 스피indle과 센서 사이의 갭(x)은 스피indle의 z 방향 움직임에 대하여 변화가 없으므로 A 값에 따라 C 값이 결정된다.

$$C = \epsilon \frac{A}{x} \quad (1)$$

센서의 구조는 원통 전극면이 축 방향으로 2 열로 배치되었다. 측정체 표면에 홈을 내고, 이 홈이 각 열과 겹치는 면적(A)의 차이를 이용해 축 방향 변위를 측정한다. 두 원통면 사이에 있는 홈이 움직일 때 이를 측정함으로써 축 방향의 변위를 알게 된다. 각 전극면의 정전용량값은 식(2)에 의해 1축 변위센서의 변위로 변환된다.

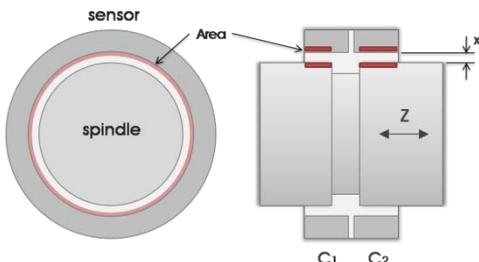


Fig. 1 Schematics of 1-axis displacement sensor

$$\Delta Z = gain (C_1 - C_2) \quad (2)$$

성능 평가를 위해 제작된 센서와 타겟은 실제 스피indle의 외경에 맞춰 설계되었다. 타겟의 외경은 86.7mm, 센서의 내경은 87mm로서 센서와 스피indle의 중심을 맞췄을 경우 틈새가 0.15mm 가 되도록 제작하였다. 각 전극면의 폭은 4mm, 가드는 1mm, 전극면 사이의 간격은 0.5mm 로 제작하였다. 검보정을 위한 원통형 타겟의 중앙부 홈은 폭 3.5mm, 깊이 1mm로 제작하였다.



Fig. 2 1-axis capacitive displacement sensor and transducer

### 3. 센서 검보정

센서의 민감도와 측정 범위에서의 선형성 및 오차를 평가하기 위하여 센서 검보정을 실시하였다. 검보정을 위해 Newport 사의 정밀 이송 테이블, NI-PXI 시스템, VEE-Pro 프로그램을 이용하여 CCS 신호 및 스테이지의 위치 좌표 데이터 획득과 스테이지의 위치 제어를 하였고 검보정 과정을 자동화 하였다.



Fig. 3 Sensor calibration setup

센서 앰프는 센서와 센서선의 정전용량의 합을 전압으로 변환한다. 2 개의 센서 전극과 이와 연결된 각 센서선은 동일한 정전용량 값을 가지도록 제작되기 어렵다. 따라서 물리적인 원점과 센서 앰프 출력의 원점을 검보정을 통해 일치시키는 작업이 필요하다. 센서 설계시 z 축 방향의 권장 측정 범위는 선형 구간이 유지되는 구간 중 2mm 높이 정도가 된다.

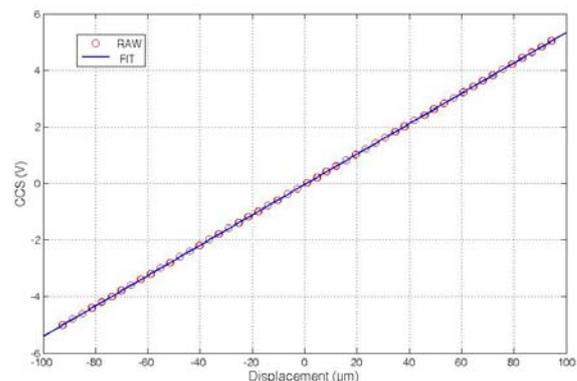


Fig. 4 Sensor output and displacement data

Fig. 4 는 스테이지의 축 방향으로 ±100 µm 범위에서

CCS 센서의 출력을 살펴본 그래프이다. 이는 앰프 전압 기준  $\pm 6V$  범위에 대한 센서 출력을 나타낸 것이다. 각 점과 직선으로 보아 선형성이 뛰어난 것을 알 수 있다. 이때의 민감도는  $53.69mV / \mu m$  로 확인되었다. 측정범위의 오차는  $0.28 \mu m$  이내의 범위로 나타났다.

#### 4. 시스템 구성 및 실험

검보정을 통해 얻어진 데이터를 바탕으로 실제 CNC 머신에 적용하여 스피들의 열변위를 측정하는 실험을 실시하였다. 실험을 위해 현대위아사의 고속 CNC 머신 중 주축 최대 회전속도가 24000RPM 인 머신을 사용하였다. CCS 센서는 스피들에 직접 장착하였고 하우징의 변위와 툴 끝의 변위 측정을 위해 Lion 사의 변위센서를 설치하였다. NI 사의 써머커플을 이용하여 하우징과 실온의 온도를 측정하였고 각각의 신호는 앰프를 거쳐서 NI - PXI 를 통해 데이터를 수집하게 된다.

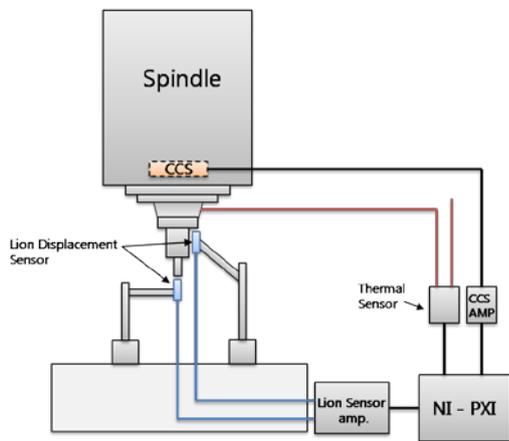


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

주축을 10000rpm 부터 24000rpm 까지 공회전하며 데이터를 수집하였다.

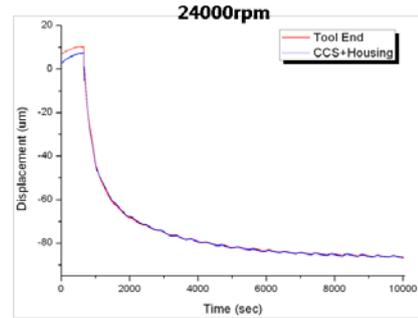
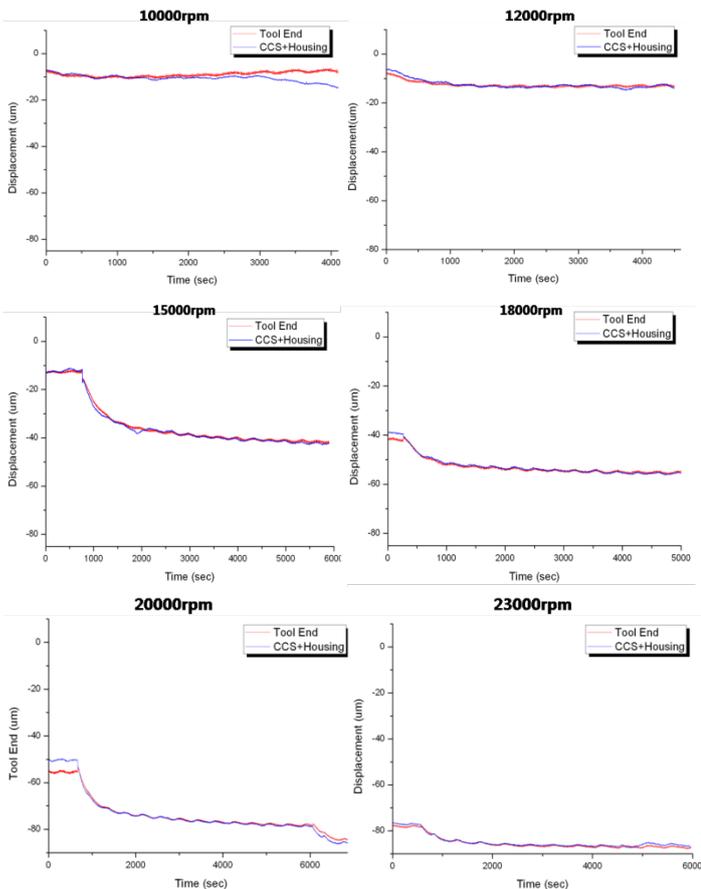


Fig. 6 Displacements of spindle by CCS and Lion sensors

주축을 rpm 별로 공회전시 변위의 변화는 Fig. 6의 그래프를 봄으로 알 수 있다. 툴 끝단의 변위를 CCS 에서 측정된 변위와 Housing 의 변위를 합한 값의 데이터와 같이 그래프로 그려 보았다. 10000rpm 부터 24000rpm 까지의 전체적인 변위의 값을 살펴보면 상대적으로 저속인 부분에서 작게 나타난다. 주축의 회전속도가 올라갈수록 더 많은 열이 발생하게 되므로 주축의 z 축의 열변위는 더 커지게 된다. 10000rpm 과 12000rpm 에서는 주축의 변위가 비슷하게 나오지만 15000rpm 이상으로 갈수록 변위의 증가 폭이 커짐을 알 수 있다. 각 rpm 별로 측정된 평균 온도는  $26.4^{\circ}C$ ,  $26.8^{\circ}C$ ,  $28.5^{\circ}C$ ,  $29.3^{\circ}C$ ,  $30.6^{\circ}C$ ,  $31.3^{\circ}C$ ,  $31.2^{\circ}C$ 로 나타났다. 24000rpm 의 경우 기계의 공회전을 멈추고 온도가 낮아지고 주축의 열변위가 다시 작아진 상태에서 24000rpm 으로 공회전을 하였을 때의 그래프이다. 주축이 회전을 함에 따라 급격히 온도가 올라간다. 이때 하우징의 온도는  $25.7^{\circ}C$  에서  $31.4^{\circ}C$  까지 변화하였다. 각 rpm 별로 열변위가 커짐에 따라서 Lion 센서에서 측정된 변위와 CCS 에서의 측정된 변위가 거의 일치함을 볼 수 있다.

주축의 오일 쿨링 시스템에 의한 영향으로 주기적으로 변위의 값이 변함을 알 수 있다. 온도 변화의 폭은  $0.7^{\circ}C$  로 나타났다. CCS 로 측정된 변위도 이에 따라 변하면서 전체적인 시스템과의 모델이 잘 맞음을 보인다.

#### 5. 결론

주축의 z 축의 변위를 측정하는 원통형 센서를 고안하고 실제 CNC 머신의 주축에 적용하여 열변위를 측정하여 보았다. 본 연구에서 개발된 센서를 이용하여 주축의 변위를 직접 측정함으로써 열변위 오차를 줄임으로 가공 오차를 줄일 수 있어서 보다 정밀도 높은 절삭가공이 가능할 것이라 예상된다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업 “IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발(10031852-2008-215)” 과제의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. J.T. Roth, S.M. Pandit, "Early prediction of impending endmilling tool failure using acceleration signals", Transactions of NAMRI/SME, Vol.26, pp. 243-248, 1998.
2. J. P. Ubanski, P. Koshy, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, "High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture", Materials and Design, Vol.21,pp. 395-402, 2000.
3. 김정석, 강명창, 김전하, 정연식, 이종환, “고속가공에서 상태 감시를 위한 계측 시스템의 신호특성”, 한국기계공학회지, 제 2 권 제 3 호, 13-19, 2003
4. Chen. J.S., “Fast Calibration and Modeling of Thermally-Induced Machine Tool Errors in Real Machining.”, Int. J. Mach. Tools Manuf., 37(2), 159-169, 1997.