

◆ 특집 ◆ 고유연 머시닝센터의 설계기술

## 고신뢰 머시닝센터를 위한 열변위 보상 센서 설계기술

### Design of Thermal Displacement Compensation Sensor for High Reliability Machine Tools

김일해<sup>1</sup>, 장동영<sup>1</sup>, 박정훈<sup>2</sup>, 박성욱<sup>2,✉</sup>, 심풍수<sup>2</sup>  
Il-Hae Kim<sup>1</sup>, Dong-Young Jang<sup>1</sup>, Jeong-hoon Park<sup>2</sup>, Sung-Wook Park<sup>2,✉</sup> and Poong-Soo Shim<sup>2</sup>

1 서울과학기술대학교 (Seoul Nat'l Univ. of Science & Technology)

2 현대위아(주) (HYUNDAI WIA Corp.)

✉Corresponding author: sw331@hyundai-wia.com, Tel: 031-596-1236

Manuscript received: 2011.6.13 / Accepted: 2011.6.28

*To increase the reliability and positional accuracy of a machine tool, a novel capacitive displacement sensor having a cylindrical shape is presented to measure the axial displacement of a machine tool spindle. Characteristics of the sensor were analyzed by numerical simulation. The sensor was built into a specific machine tool spindle and its performance was experimentally investigated. The accuracy of a thermal error compensation system of a machine tool can be enhanced greatly using proposed sensor.*

Key Words: Capacitive Displacement Sensor(정전용량변위센서), Thermal Error Compensation(열변위오차보정), Machine Tool Spindle(공작기계주축)

#### 1. 서론

장비의 정밀도, 신뢰성 및 고능률은 과거부터 지금까지 변함없이 사용자가 제직업체에 요구하는 핵심적인 가치이다. 공작기계의 수준이 해마다 향상되고 있는 지금, 공작기계의 성능에 대한 소비자들의 기대감도 날로 높아지고 있다. 머시닝센터의 신뢰성을 높이기 위해서는 다양한 가공 환경에서도 공구 절삭점이 원래 의도된 경로로 오차 없이 움직일 수 있어야 할 것이다. 주축의 고속화와 가공부하에 따른 공작기계의 열변위 오차는 이러한 장비의 성능을 저하시키는 주요 요인이다. 특히 내장형 모터를 채택한 고속 주축의 열변위 오차는 예측이 까다로우며, 가공 부하에 의해서도 많은 영향을 받는다.<sup>1,2</sup>

공작기계의 열변위 모델링은 주요 지점의 온도 측정값과 열변위 측정량을 기반으로 만들어진 모델을 이용하는 것이 오랜 관행이었다.<sup>3</sup> 그러나 고속 주축에 대해서는 열적-기계적 거동의 비선형성에 의한 영향 때문에 이러한 접근 방식의 실효성이 떨어짐에 따라 주축 영역의 열변위는 직접 측정하여 보상하는 접근 방식이 채택되기 시작하였다.<sup>4,5</sup> 이는 모델링이 까다로우며 열-탄성 거동이 지배적인 주축계의 열변형 오차를 직접 측정하고, 비교적 예측이 용이한 공작기계 구조물 열변위는 온도 기반의 열변위 모델로 추정하여 전체 열변위 보상 시스템을 구축하는 접근 방법이다.<sup>6</sup>

일반적으로 주축의 운동 오차 측정에는 공구 대신 마스터 볼을 사용하는 방법이 가장 정밀하다. 그러나 절삭 가공이 이루어지는 동안의 주축 운동

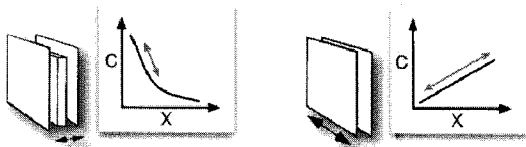
오차 측정은 오염, 파손에 대한 방지때문에 주축 하우징 내에 센서가 설치되어야 하며, 마스터 볼 역할을 하는 측정면이 회전축 외경에 설치되어야 하는 등 여러 제약이 있다. 통상의 프루브 형태의 센서로 필요한 분해능을 얻기 위해서는 그 보다 높은 형상 정밀도의 측정면이 필요하며, 또한 회전축에 상당한 수준의 정밀도로 조립되어야 한다.

본 논문에서는 센서 설치 공간의 제반 요구 조건의 수준이 과도하지 않으면서도, 충분한 변위 측정 성능을 확보하기 위해 머시닝센터 주축 전용으로 고안된 센서를 소개하겠다. 본 실험은 검보 정용 3축 이송 스테이지에서 성능을 파악하였으며, 머시닝센터 주축에 적용하여 마스터 타겟과 상용 센서에 의한 측정값을 비교하였다.

## 2. 변위 센서

### 2.1 면적 변화 방식의 원통형 정전용량 변위 센서

비접촉식 정전용량 변위 센서는 Fig. 1 에서와 같이 두 도체 사이의 정전용량(Capacitance) 값을 이용하여 물리량을 측정한다. 이때 정전용량 값은 두 도체의 겹치는 면적에 비례하고 간극에 반비례한다. 틸새변화를 이용하면 높은 분해능을 얻을 수 있으나 선형구간이 좁고, 면적변화를 이용하면 분해능은 낮으나 매우 넓은 선형측정구간을 확보할 수 있다.



(a) Gap-varying type (b) Area-varying type

Fig. 1 Concept of capacitive displacement measurement: gap varying type vs. area-varying type

또한, 대상체의 움직임만을 측정하고자 할 경우에는 센서의 면적이 넓을수록 측정면의 형상오차에 의한 측정오차를 줄일 수 있다. 회전축의 반경방향 운동오차의 측정을 위해 전체 원주면을 사용하는 원통형 정전용량 변위 센서가 이러한 개념을 바탕으로 개발된 바 있다.<sup>7</sup>

머시닝센터 주축의 축방향 변위 측정을 위해서는 다음의 항목들이 고려된 센서 설계가 이루어지

는 것이 바람직하다. 주축 내에 설치가능하며, 공구단에 가까우면서, 넓은 측정 범위를 가지고, 미크론 수준의 측정 정밀도를 가지며, 동특성에 영향을 주지 않고, 센서의 측정면의 형상정밀도가 특별히 요구되지 않는 등의 조건이 고려되어야 한다. 대략 500  $\mu\text{m}$ 의 측정 범위와 1  $\mu\text{m}$  이내의 분해능 확보가 요구된다. 측정 범위는 통상의 주축 조립 과정에서의 센서 조립오차도 고려한 것이다.

이러한 설계조건을 고려하여 개발된 것이 면적 변화 방식의 원통형 정전용량 변위 센서(CCS: Cylindrical Capacitive displacement Sensor)이다. 면적 변화 방식은 측정 범위가 넓고 뛰어난 선형성을 확보할 수 있다. 특히, 원통형 측정체를 센서가 완전히 감싸는 구조는 회전축의 반경방향 위치가 바뀌더라도 축방향 변위 측정에 영향을 주지 않는다는 장점이 있다. 측정면의 형상정밀도가 기존의 주축 가공으로 충분하다는 것이 본 구조의 특징이다. 면적 변화 방식의 경우 센서면적이 작으면 정전용량 값의 변화량이 작기 때문에 분해능 확보가 어려우나 이 구조는 자연스럽게 넓은 센서 면적을 확보할 수 있다. Fig. 2 와 같이 회전축 원주면을 파고 드는 형태의 홈이 필요하다는 것이 제안한 센서가 주축의 축방향 변위 측정에 필요한 성능을 확보하는데 있어 가장 중요한 특징이다.

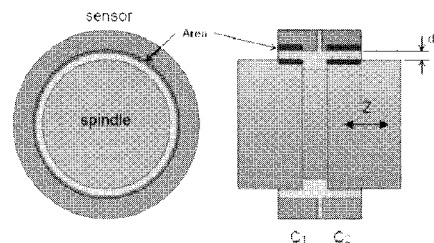


Fig. 2 Schematics of 1-axis displacement sensor

주축 사이에서 면적의 변화를 생성하기 위하여 주축의 원주방향으로 일정한 틸새를 갖는 센서 조각 두 개를 축 방향으로 배치하고, 주축에 원통형의 홈(Groove)을 만든다. 두 개의 센서 조각은 주축 커버 부품에 내장되도록 제작되어 기존 부품을 대체하게 된다. 홈과 센서가 축방향으로 동일 원점에 있을 경우 두 개의 센서 조각은 주축을 같은 면적으로 덮게 되어 정전용량 값이 같다. 주축에서 축방향의 변위가 발생하면 두 개의 센서 조각이 갖고 있는 정전용량 값이 달라지며, 두 정전용량 값의 차이를 이용하여 변위의 크기를 감지하게 된다.

$$\Delta Z = gain(C_1 - C_2) \tag{1}$$

where, Z : displacement of z-axis  
 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> : capacitance value

**2.2 센서 설계를 위한 분석**

예측 가능한 다양한 오차요인들이 제안한 센서의 성능에 미치는 영향에 대해 가상모델을 만들어 수치해석적으로 파악하여 보았다.

조립과정에서 발생할 수 있는 주축과의 동축도와 기울어짐(tilting)이 센서의 선형구간에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단하였다. 축방향의 변위를 측정하기 위해 면적 변화에 의한 정전용량 변화를 파라미터로 사용하였기 때문에 또 다른 파라미터인 거리 변화는 발생하지 않아야 한다. 센서 틸새와 정전용량이 선형 관계라면 앞서 언급한 바와 같이 원통을 완전히 감싸는 것으로 반경방향으로는 어떤 움직임도 축방향 신호에 영향을 미치지 않는다. 그러나 틸새와 정전용량은 비선형 관계이며 틸새가 매우 가까울 때 그 영향이 두드러진다. 본 센서는 원통과 원통의 조합이므로 주어진 틸새에서 두 축의 상대적인 위치오차가 축방향 신호에 영향을 매우 작게 미치는 사용 가능 공간이 존재하게 된다. 주축이 센서 중심에서 조금 벗어난 경우에는 비선형성의 영향도 상쇄되며, 중심에서 많이 벗어난 경우에만 틸새가 가까워진 부분의 정전용량 값이 상대적으로 급격히 증가하여 축방향 신호의 변위민감도가 증가하는 오차를 야기하게 된다.

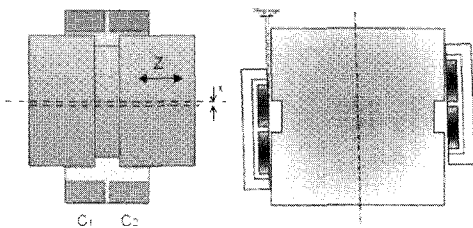


Fig. 3 Concentricity and tilting between spindle and displacement sensor

ANSYS를 이용한 3차원 전기장해석을 통해 센서의 측정영역에서 축방향 신호의 독립성과 변위 민감도를 확보할 수 있도록 센서를 설계하였다.

측정 타겟의 x, y 위치가 중앙에서 벗어나 측정 범위 바깥쪽에 놓인 경우, 즉 센서와 근접하여 가

까워진 경우, 축방향(Z) 변위에 대한 정전용량 값의 민감도가 커지는 경향을 확인하였다. 센서 틸새는 1 mm로 가정하고, 동축일 때부터 0.1 mm 간격으로 최대 0.5 mm 까지 벗어난 경우를 살펴보았으며, 설계 틸새의 약 1/3 직경 정도의 공간을 사용 가능 영역으로 추정하였다. Fig. 5는 테스트용으로 제작된 센서와 3 축 이송 스테이지를 이용하여 반경방향 위치에 따른 축방향 변위 민감도를 측정 한 결과이다. 센서 틸새는 0.5 mm 이었고, 약 0.2 mm 직경의 중앙 영역이 균일한 민감도를 가지는 것으로 확인되었다.

기울어짐에 대해서는 각도가 커질수록 민감도는 감소하는 경향이 있으나, Fig. 6의 그래프에서 축방향 -0.5 ~ 0.5 mm 부근을 선형구간으로 보았을 때, 센서의 중심에서 ±250 μm 정도의 구간에서는 오차가 미미함을 확인하였다.

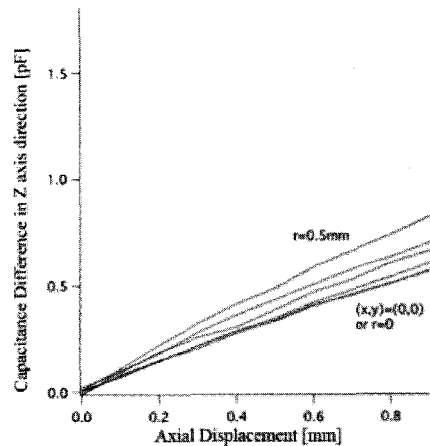


Fig. 4 Capacitance difference in Z axis direction as a function of x and y position

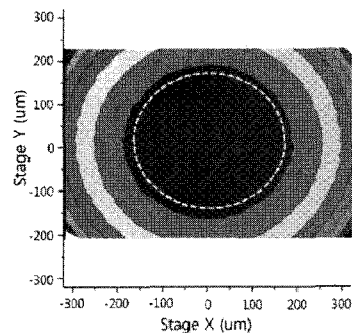


Fig. 5 Sensor output variation as a function of target concentricity

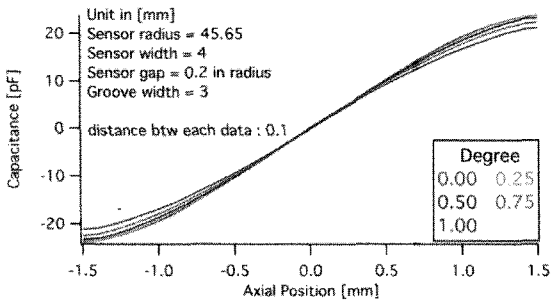


Fig. 6 Capacitances difference in Z axis direction as a function of tilting angle

홈의 크기는 완성된 센서의 성능에 큰 영향을 주는 요소이다. 홈의 넓이와 깊이는 센서의 선형 측정구간 및 민감도에 영향을 주며, 넓거나 깊을 수록 바람직한 특성이 얻어지겠지만 주축 입장에서 는 필요 최소한의 크기로 가공되어야만 한다.

**sensor separation**

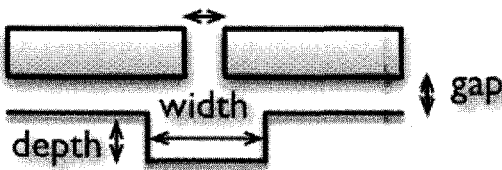


Fig. 7 Design parameters of groove

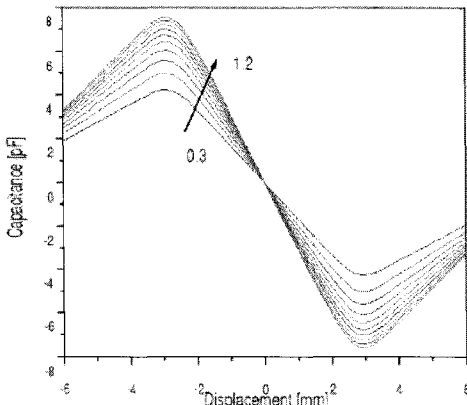


Fig. 8 Capacitances difference in Z axis direction as a function of groove depth

동일한 기하학적 조건에서 홈의 깊이만 변경한 경우 축방향으로 전체적인 출력 특성을 살펴보았

다. 면적 변화 방식은 높은 선형성에 비해 민감도 확보가 어렵다. 홈 깊이가 깊어지면 축방향 위치 변동에 대한 정전용량의 변동이 커지기 때문에 민감도가 증가하지만, 일정수준을 넘어가면 증가효과는 급격히 줄어든다. 여기서는 약 1.5 mm 정도면 얻을 수 있는 최대 민감도 깊이라고 할 수 있다.

홈의 폭이 넓어지는 경우 Fig. 9 에서 볼 수 있듯이 축방향 변위에 대한 민감도가 증가한다. 그러나 설치공간을 고려하면 센서의 크기는 기하학적 제한 때문에 센서앰프 등 전기적인 시스템 등의 요소를 종합적으로 고려해 설계 치수를 결정하여야 한다.

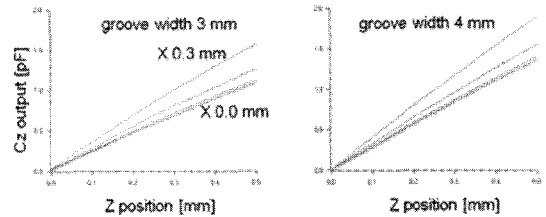


Fig. 9 Capacitance difference in Z axis direction as a function of groove width

**2.3 센서의 설계 및 제작**

성능평가를 위해 제작된 센서와 타겟은 주축에 장착하기 위해서는 실제 주축의 외경에 맞춰 설계 되어야 한다. 앞의 해석 결과와 주축의 설계 수치를 바탕으로 센서를 설계하였다. 타겟의 외경은 86.7 mm, 센서의 내경은 87 mm 로서 센서와 주축의 틈새가 0.15 mm 가 되도록 제작하였다. 각 전극면의 폭은 4 mm, 가드는 1 mm, 전극면사이의 간격은 0.5 mm 로 제작하였다. 검보정을 위한 원통형 타겟의 중앙부 홈은 폭 3.5 mm, 깊이 1 mm 로 제작하였다.

열변위의 측정기준이 되는 공구 변위를 보다 정확히 측정하기 위해서는 최대한 주축의 끝부분에 센서가 설치되는 것이 바람직하다. 주축의 베어링에 예압을 주고 주축 하우징의 제일 끝부분에 설치를 할 수 있도록 센서를 설계하였다. 다음은 제작된 센서와 앰프의 실물사진이다.

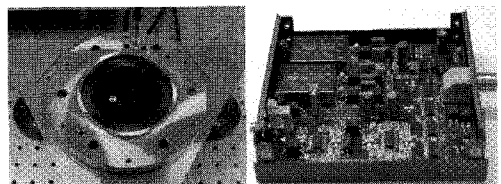


Fig. 10 1-axis capacitive displacement sensor and transducer

### 3. 센서 검보정

앞서 논의된 특성 때문에, 본 센서는 일반적인 1 축 센서보다는 조금 복잡한 검보정 과정이 필요하다. 먼저 제작된 센서의 유효 작동공간을 3 축 이송 스테이지에서 파악한 후에야 민감도 및 선형 구간을 측정할 수 있다.

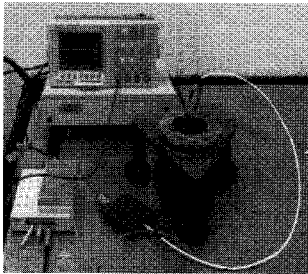


Fig. 11 Sensor calibration setup

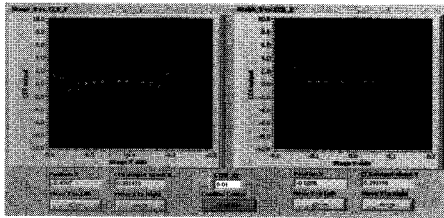


Fig. 12 CCS- Target aligner

센서와 실험용 측정 타겟의 기울어짐 영향을 최소화하고 동축도의 일치를 위해 Fig. 12 와 같이 LabView 기반의 프로그램을 작성하여 수평조정을 실시한 뒤, X와 Y축을 이동해가며 측정 구역 내에서의 민감도 분포를 측정한다. 여기서 틈새변화에 의해 민감도가 영향을 받지 않는 유효범위를 결정하고 가장 이상적인 중심위치에서 정밀한 검보정을 수행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

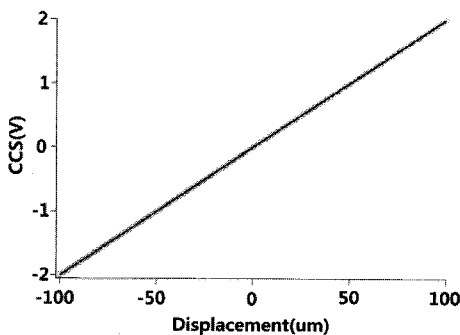


Fig. 13 Sensor calibration result

Table 1 Specifications of CCS

Sensitivity	20 mV/ $\mu$ m (Noise level 5 mV p-p)	
Effective Range	Radial(d)	60 $\mu$ m
	Axial(h)	500 $\mu$ m
Sensing Range	$\pm$ 0.1mm	
Resolution	0.5 $\mu$ m	
Linearity	99% ( $R^2=0.99$ )	

### 4. 열변위 측정

#### 4.1 열변위 측정 시스템 구축

개발된 센서의 실험은 Fig. 14 와 같이 헤드유닛에서 수행되었다. 센서는 주축의 앞쪽 커버 뒤에 설치되었으며 그 위치는 Fig. 15 와 같다.

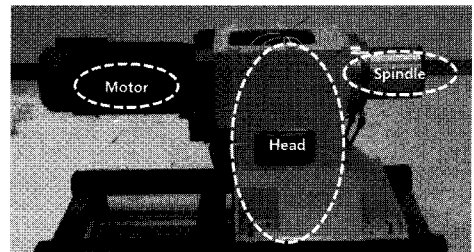


Fig. 14 Head unit for experiment

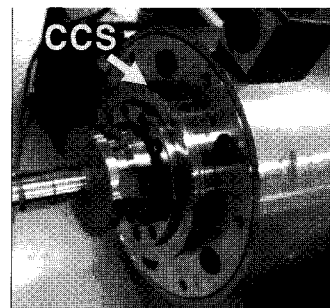
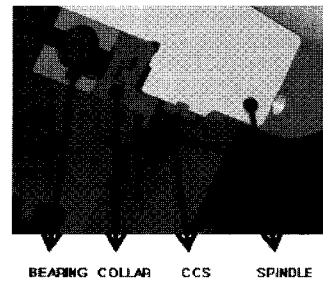


Fig. 15 1-axis cylindrical capacitive displacement sensor in the spindle

실험과정에서의 신호비교를 위한 센서로는 Micro Epsilon 사의 0.1 $\mu$ m 분해능의 상용 와전류 변위 센서인 eddy NCDT 3010-U1 을 사용하였다.

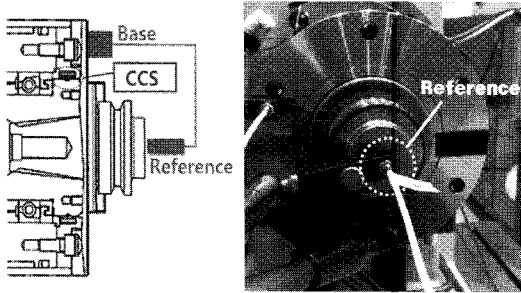


Fig. 16 Experimental setup for measuring thermal displacement of rotor

### 4.2 센서 재보정

3 축 스테이지에서 이루어진 검보정은 주축의 해당부위와 동일하게 제작된 검보정용 부품을 사용하였으나 실제 양산 주축은 센서의 측정 분해능보다 큰 오차가 존재한다. 이를 위해 기준센서를 사용하고 tool clamp/unclamp 시 발생하는 변위를 이용하여 일종의 현장 검보정을 수행할 수 있다.

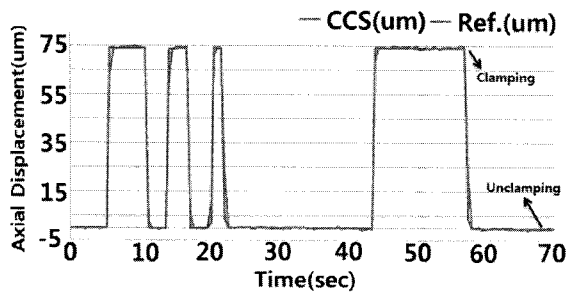


Fig. 17 Displacement of Rotor in Clamping and unclamping

센서앰프의 출력전압과 측정변위 값의 최종 민감도를 확인한 후 내장된 센서와 상용센서에서 측정한 주축의 돌출량 측정결과를 Fig. 17 에서 확인할 수 있다.

### 4.3 추축 회전시의 돌출량 비교

비교용 센서와 개발된 센서의 측정위치가 다르기 때문에 주축온도상승, 주축회전 등의 요인으로 생길 수 있는 오차에 대해 살펴본다.

두 센서의 설치 위치 간의 오차와 측정 위치

사이의 대상체인 주축과 마스터 타겟 또한 열변위가 발생한다. 즉, 아래 그림에서 ①과 ②의 변화로 두 센서의 측정변위 사이에는 오차가 발생한다. 이러한 오차과약을 위해 주축회전수가 급격히 변화할 때 발생하는 순간 돌출량을 비교한다. 순간 돌출량은 주축 회전수 변동에 의한 변위로 주축 열변위와 별도로 측정이 선행되어야 한다.

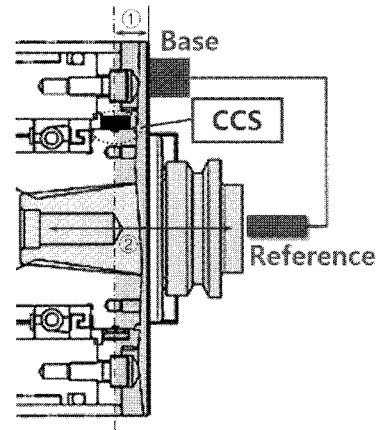


Fig. 18 Thermal Displacement between positions of CCS and Reference Sensor

돌출량 비교로 ②의 공구 탈착상태에 따라서 발생할 수 있는 오차량을 알 수 있다. 이 오차는 주축의 회전시에 클램프 유닛의 점스프링력과 Gripper 에 의해 고정되어 있는 공구가 주축의 회전시 원심력에 의해 축방향의 움직임이 발생하여, 회전 초기에 발생하는 공구의 변위이다.

Fig. 19는 회전수를 4,000 rpm 에서 8,000 rpm 으로 반복 변화시키며 주축의 돌출량을 비교 측정된 결과이다. 축 돌출량은 약 1.5  $\mu$ m 이고, 두 센서의 상대적인 오차는 최대 0.2  $\mu$ m 이다.

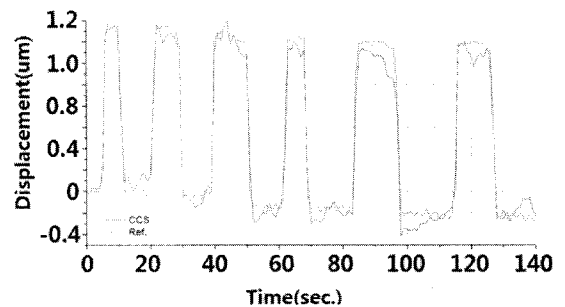


Fig. 19 Tool Expansion in 4,000 and 8,000rpm variation

다음은 4,000 ~ 8,000 rpm 사이에서 회전속도를 임의로 변화시키며 측정된 데이터이다. 회전 속도 변화 시 최대 돌출량은 2.5  $\mu\text{m}$  이며, 두 센서의 신호는 최대 0.3  $\mu\text{m}$  의 오차를 보였다.

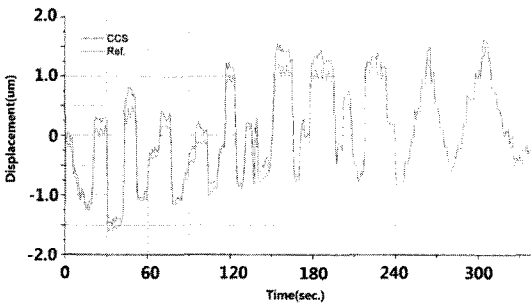


Fig. 20 Tool expansion by random rpm variation (4,000 ~ 8,000 rpm)

**4.4 장시간 열변위 측정 비교**

Fig. 21 은 주축을 6,000 rpm 에서 8 시간 동안 회전시키며 측정된 결과이다. 이 결과에서 최대 오차는 0.7  $\mu\text{m}$  으로 대부분의 측정 결과가 일치한다. Fig. 22 는 주축을 8,000 rpm 에서 4 시간 연속 운전한 결과로, 이 실험에서 두 센서로 측정된 변위의 오차는 최대 1  $\mu\text{m}$  으로 대부분의 측정값은 일치하였다.

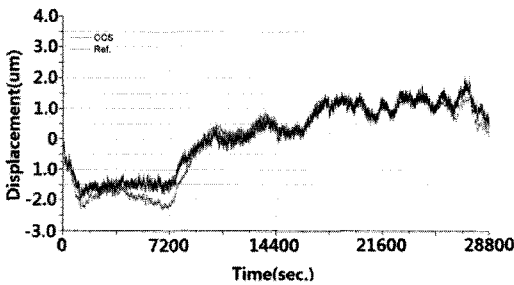


Fig. 21 Thermal displacement of rotor in 6,000rpm

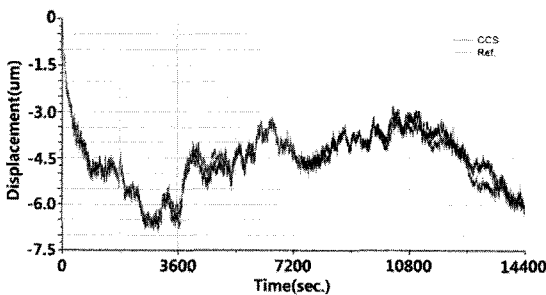


Fig. 22 Thermal displacement of rotor in 8,000rpm

두 데이터의 일부 구간에서 차이가 관찰되는데, 센서가 설치된 위치가 다르기 때문에 그 사이에 조립되어 있는 부품에서 발생된 임의적인 현상으로 추측된다. 실제 절삭가공 중에는 보다 복잡한 현상이 발생할 수 있으며, 절삭지점에서의 주축 변위계측은 아니기 때문에 절삭점 위치와 원통형 변위 센서의 측정 결과 사이에는 이러한 오차가 불규칙적으로 발생할 수 있다. 이는 주축의 축방향 변위계측을 열변위 보상에 이용하는 유사한 방식에서도 마찬가지로 발생 가능하다고 판단되며, 현재 실험에서 다양한 경로로 파악된 바로는 임의적인 시간구간 동안 1  $\mu\text{m}$  이내의 차이가 발생하는 경우가 있으나 대부분의 시간구간에서는 제안한 센서의 위치에서의 측정값과 공구단을 측정할 비교 검증용 센서의 값이 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

**5. 결론**

본 연구를 통해서 실가공 시 발생하는 주축의 축방향 열변위를 실시간 모니터링 하여 직접보상하기 위한 주축에 내장되는 형태의 정전용량형 변위 센서를 개발하였다. 이 센서는 기존의 양산형 주축의 설계 변경을 최소화하여 범용성을 갖도록 고안되었으며, 상용 주축과 헤드를 포함하는 시험장치를 구성하고 그 성능을 검증하기 위한 열변위 측정시험을 진행하였다.

개발된 변위센서에서 주축의 운전속도를 다양하게 바꾸어가며 발생하는 축의 순간 돌출량을 비교 측정함으로써 주축 내장 환경에서의 변위센서와 기존 외부환경에서의 성능차이가 없음을 검증하고, 6,000 rpm 과 8,000 rpm 의 운전속도에서 각각 8 시간 4 시간 열변위를 비교 측정하였다. 그 결과 모두 1  $\mu\text{m}$  이내의 오차와 함께 주축 열변위를 측정하였으며, 측정 시험 동안 주변온도의 변화, 비교 측정을 위한 상용센서와 본 연구에서 개발한 정전용량형 변위 센서의 설치위치에서 기인한 측정위치 오차를 고려하였을 때, 실가공에서의 열변위 직접 보상방식에 적용하기 위한 센서로서 충분한 신뢰성을 확인하였다.

향후 본 연구에서의 변위 센서가 내장된 고속 주축을 머시닝센터에 장착한 후, 주축 열변위 이외의 구조물에서 발생하는 열변위 오차를 모델링을 통해 보정하는 시스템과 병행하여 실가공을 수행하면서 가공부하, 절삭유의 영향 등 가공환경에

서의 신뢰성을 확보하기 위한 환경시험을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 사업”의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Chen, J. S. and Hsu, W. Y., “Characterizations and models for the thermal growth of a motorized high speed spindle,” *Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 43, No. 11, pp. 1163-1170, 2003.
2. Chen, J. S. and Chen, K. W., “Bearing load analysis and control of a motorized high speed spindle,” *Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 45, No. 12-13, pp. 1487-1493, 2005.
3. Kim, S. H., Ko, T. J. and Ahn, J. H., “Prediction System of Thermal Errors Implemented on Machine Tools with Open Architecture Controller,” *J. of KSPE*, Vol. 25, No. 5 pp. 52-59, 2008.
4. Abele, E., Altintas, Y. and Brecher, C., “Machine tool spindle units,” *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 2, pp. 781-802, 2010.
5. <http://www.roeders.de>
6. Kim, S. M. and Lee, S. K., “Prediction of thermo-elastic behavior in a spindle-bearing system considering bearing surroundings,” *Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 41, No. 6, pp. 809-831, 2001.
7. Kim, I. H., Park, S. S. and Han, D. C., “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.