

고속 머시닝센터 주축용 3축 변위 센서 시스템 개발

3-Axis Displacement Sensor for a High-Speed Machining Center Spindle

김입해¹, *김종혁², 장진아³, 장동영⁴, 심종수²

I. H. Kim¹, *J. H. Kim(kim.jonghyuk@wia.co.kr)², J. A. Jang³, D. Y. Jang⁴, P. S. Shim²
¹(주)캡시스, ²위아 주식회사, ³서울산업대학교 기계설계자동화공학부, ⁴서울산업대학교 산업정보시스템공학과

Key words : Displacement Sensor, High Speed Spindle

1. 서론

고속 절삭 가공에 대한 수요가 증가하고, 공구 등 관련 기술이 발전하며 고속 주축이 장착된 머시닝센터의 정밀도 향상에 관한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 고속 주축은 일반적으로 주축 내장형 모터에 의해 구동이 되며 고속 회전 시 주축의 진동 및 발열에 의한 문제점이 발생한다. 이러한 주축은 윤활 및 냉각이 까다롭고, 기계적, 열적 특성을 예측하는 것이 매우 어렵다[1-3]. 또한, 주축 하우징에서의 온도 측정을 이용한 전통적인 주축의 열변위 보정 방식의 정확도도 떨어진다. 변위 측정을 기반으로 한 연구가 주목 받고 있기도 하다[4]. 주축 변위의 직접 측정은 실제 절삭의 영향을 고려하기 위해서도 필요하다[5].

일반적으로 주축의 진동은 주축의 반경 방향으로 두드러지며, 발열에 의한 주축단의 변위는 축 방향으로 두드러진다. 주축의 진동 측정에는 가속도계, 압전소자 등이 이용되며, 열변위의 측정, 보상을 위해서는 변위 센서가 사용된다. 여러 종류의 센서 사용은 설치 공간, 비용, 신호 처리 시스템의 복잡성 등의 문제점을 야기시킨다. 본 연구에서는 고속 주축에 내장하기 용이하고, 동시 3축 변위 측정을 통해 주축의 진동 및 열변위 측정을 위해 적용되는 새로운 개념의 원통형 정전용량 변위 센서를 고안하였다.

2. 3축 변위 센서

정전용량형 변위 센서에서 정전용량 값은 두 도체가 접하는 면적에 비례하며 틈새 간격에 반비례한다. 본 연구에서는 두 개념을 동시에 이용하여 고속 주축의 변위 측정 목적에 적합한 3축 센서를 고안하였다. 반경 방향은 틈새 변환 방식을 이용하여 높은 변위 분해능을 얻고, 축 방향은 면적 변환 방식을 이용하여 넓은 측정 범위를 제공한다.

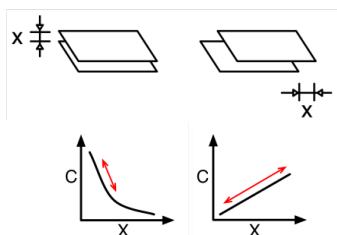


Fig. 1 Capacitive displacement measurement concept: gap-varying type vs. area-varying type

회전축의 반경 방향 변위는 기존의 원통형 정전용량 변위 센서와 동일한 개념으로 측정이 이루어진다[6]. 축 방향의 변위는 두 원통면 사이에 위치한 홈의 움직임을 측정함으로써 모두 3축의 변위 측정이 이루어진다. 원주 방향 각 4개씩의 전극면과 이러한 원통 전극면이 축 방향으로 2열로 배치된 구조이다. 각 전극면의 정전용량 값은 식(1)에 의해 3축 변위센서의 각 방향 변위로 변환된다. 측정체 표면에 홈(groove)을 내고, 이 홈이 각 열과 겹치는 면적의 차이를 이용해 축 방향 변위를 측정한다. 반경 방향 변위 측정시에는 축 방향으로 나란히 놓인 두 개의 센서 전극면

의 합을 이용함으로써 홈의 위치에 따른 영향이 없도록 설계되었다. 이러한 구조 덕분에 축 방향 변위 측정시 일반적으로 요구되는 축에 수직인 측정면이 필요하지 않기 때문에 기존 고속 주축의 동특성 변화 및 설계 변경을 최소화할 수 있다.

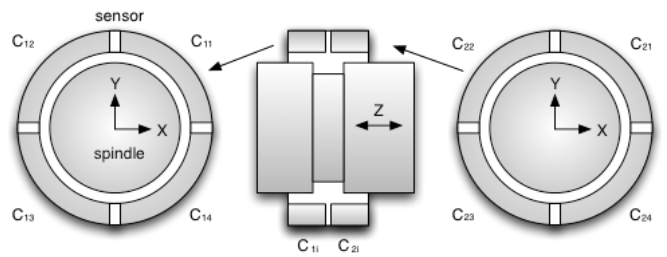


Fig. 2 Schematics of 3-axis displacement sensor

$$\begin{aligned}
 X &= gain\{(C_{11} + C_{14} + C_{21} + C_{24}) - (C_{12} + C_{13} + C_{22} + C_{23})\} \\
 Y &= gain\{(C_{11} + C_{12} + C_{21} + C_{22}) - (C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24})\} \\
 Z &= gain\{(C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14}) - (C_{21} + C_{22} + C_{23} + C_{24})\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

성능 평가를 위해 제작된 센서는 내경 40mm, 각 센서 전극면 폭 4mm, 가드, 그라운드 등 전극면 사이 간격 0.5mm의 사양으로 제작하였다. 검보정을 위한 원통형 타겟은 센서면과 틈새 0.5mm, 중앙부 홈은 폭 4mm, 깊이 1mm로 제작하였다.

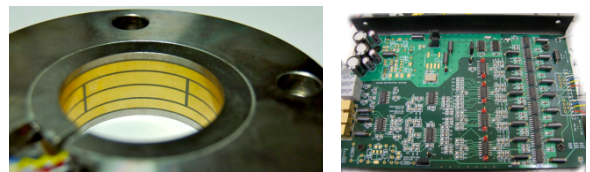


Fig. 3 3-axis capacitive displacement sensor and transducer

3. 센서 검보정

센서의 민감도 및 측정 범위에서의 선형성 및 오차를 평가하고 센서 앰프의 영점 조정을 수행하기 위해 Newport사의 정밀 이송 테이블, NI-PXI 시스템, VEE-Pro 프로그램을 이용한 3축 검보정 시스템을 구축하였다.

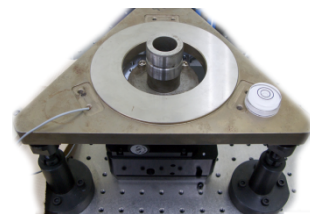


Fig. 4 Sensor calibration setup

센서 앰프는 센서와 센서선의 정전용량의 합을 전압으로 변환한다. 8개 센서 전극과 이와 연결된 각 센서선은

동일한 정전용량 값을 가지도록 제작되기 어렵다. 따라서 물리적인 원점과 센서 앰프 출력의 원점을 검보정을 통해 일치시키는 작업이 필요하다. Fig. 5는 앰프 전압 기준으로 8V 범위에 대한 센서 출력을 살펴본 것이다. 반경 방향으로 $\pm 92\mu\text{m}$, 축 방향으로 $\pm 430\mu\text{m}$ 의 측정 범위에 해당된다.

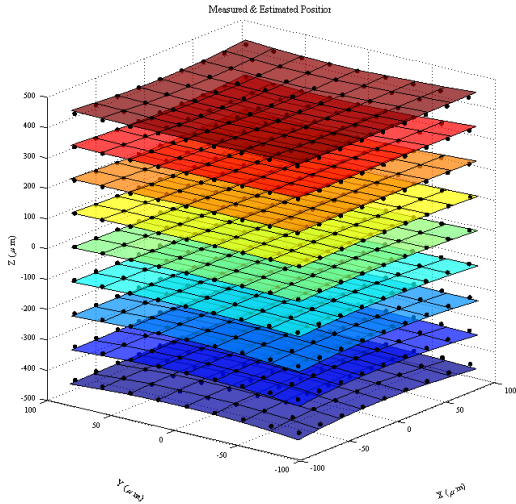


Fig. 5 Sensor output and corresponding position data

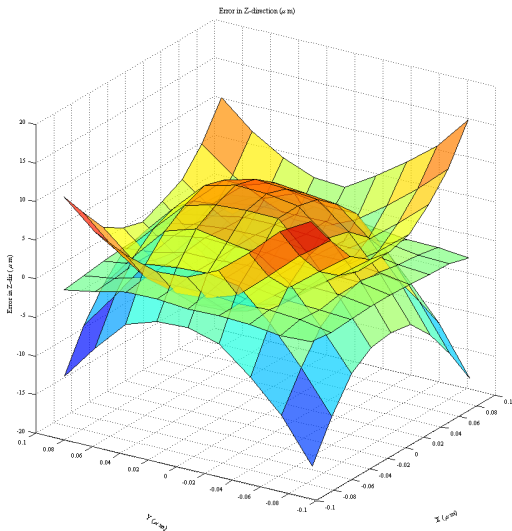


Fig. 6 Sensor output in Z-direction at Z_{max} , Z_{zero} , Z_{min}

센서 설계에서 고려된 선형 측정 영역을 벗어나면 변위에 대한 정전용량값의 비선형성이 두드러진다. 이러한 경향이 대칭이 되도록 반경 방향 각 축 센서 출력의 영점을 설정한다. 축 방향 측정 범위 최대, 최소 지점과 중앙 지점에서의 축 방향 측정 오차를 Fig. 6에 나타내었으며, 축 방향으로는 두 센서 열의 중심과 홈의 중심이 일치하는 경우 선형성이 가장 좋으며, 홈의 한쪽 수직면이 두 센서 열의 중심에 가까워지면서 비선형성이 나타남을 확인할 수 있다. 홈의 폭을 증가시키면 선형 구간이 증가하지만, 반경 방향 센서 감도가 감소하기 때문에 센서 적용 목적에 맞춰 센서 및 홈 설계를 한다.

최종적인 센서 측정 범위에 대한 검보정을 수행하여, 센서 출력값의 오차를 Fig. 7에 표시하였다. 반경 방향 측정 범위는 $\pm 46\mu\text{m}$, 축 방향은 $\pm 215\mu\text{m}$ 에 해당하며, X 방향은 $43.1\text{mV}/\mu\text{m}$, Y 방향은 $44.01\text{mV}/\mu\text{m}$, Z 방향은 $9.3\text{mV}/\mu\text{m}$ 의 민감도를 확인하였다. 일부 측정 범위 외곽을 제외하면 반경 방향으로 $0.2\mu\text{m}$, 축 방향으로 $1.5\mu\text{m}$ 이내 오차를 보였다.

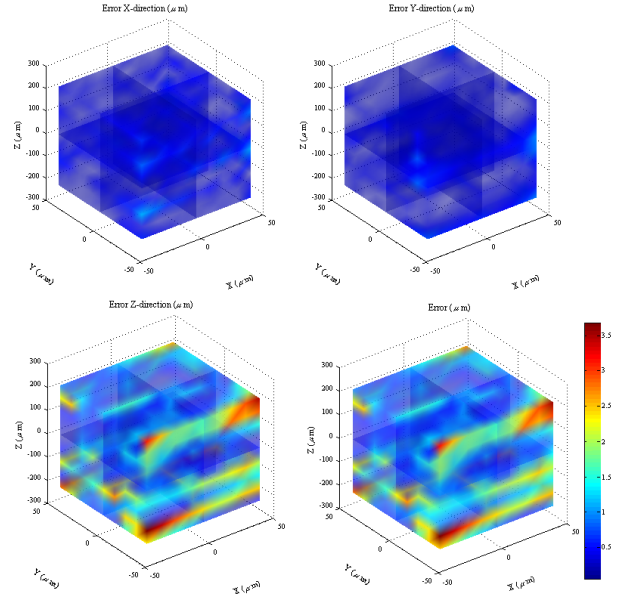


Fig. 7 Sensor output error

4. 결론

주축 측정부의 홈을 이용하는 회전체의 3축 변위를 측정하는 원통형 센서를 고안하여, 고속 주축에 적합한 새로운 개념의 3축 변위 센서를 개발하였다. 본 연구에서 개발된 센서를 이용하여 반경 방향의 주축 진동 및 축 방향의 열변위를 동시에 측정함으로써, 주축의 이상 진동, 베어링 결함, 공구 파손, 열변위 오차 등을 보다 효과적으로 측정, 대응할 수 있다

후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업 "IT부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발(10031852-2008-215)" 과제의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Lin, C.W., Tu, J.F., and Kamman, J., "An Integrated Thermo-Mechanical-Dynamic Model to Characterize Motorized Machine Tool Spindles During Very High Speed Rotation," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **43**, 1035-1050, 2003.
2. Rnatatalo, M., Aidanpaa, J.O., Goransson, B., and Norman, P., "Milling Machine Spindle Analysis using FEM and Non-contact Spindle Excitation and Response Measurement," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **47**, 1034-1045, 2007.
3. Jedrzejewski, J., Kowal, Z., Kwasny, W., and Modrzycki, W., "High-speed Precise Machine Tools Spindle Units Improving," *J. Mat. Proc. Tech.*, **162-163**, 615-621, 2005.
4. Chen, J.S., and Hsu, W.Y., "Characterizations and Models for the Thermal Growth of a Motorized High Speed Spindle," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **43**, 1163-1170, 2003.
5. 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.
6. 김진현, 김일해, 장동영, 한동철, "주축변위 측정을 통한 공구 마모 진단에 관한 연구," *한국정밀공학회지*, **20(1)**, 222-228, 2003.