

# 자기력을 이용한 정강성 측정장치 개발에 관한 연구

## A Study on the Development of Stiffness Measuring Device by Using Magnetic Force

\*황영국<sup>1</sup>, #이춘만<sup>2</sup>

\*Y. K. Hwang<sup>1</sup>, #C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계설계공학과 대학원, <sup>2</sup> 창원대학교 기계설계공학과

Key words : Stiffness measuring device, Magnetic force, Machine tool spindle

### 1. 서론

공작기계의 정밀도는 공작물에 대한 공구의 위치정밀도와 그들 사이 구조물의 상대적인 변형에 영향을 받는다. 공구와 공작물 사이의 상대적인 변형을 일으키는 원인으로는 가공물의 중량, 절삭저항과 같이 외부로부터 작용하는 하중과 회전부위의 불균형 및 절삭기구 등에 기인한 진동, 외부로부터의 복사열 및 내부 열손실에 의한 발열 등이 있다.

이들은 많거나 적거나 피할 수 없는 문제로서 공작기계를 설계하는 경우 충분한 검토가 이루어져야 하는 항목이다. 즉, 공작기계의 정적 변형, 진동문제 및 열변형에 대한 충분한 고려가 있어야 한다.

공작기계의 구성요소 중 주축계는 공작기계의 정밀도와 생산성을 결정짓는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 주축의 설계에 있어서는 일반적으로 높은 회전 정밀도와 고속 회전 성능, 큰 강성이 요구된다. 최근의 공작기계용 주축의 개발은 고속화, 고정밀화 방향으로 나아가고 있고 주축계에서의 정적, 동적 및 열적 영향은 점점 복잡해지고 있다. 또한 가공정밀도가 마이크로 단계를 거쳐 나노단계로 향하는 초정밀단계이므로 조립 후나 운전 중 주축계의 특성을 정밀하게 평가하고 예측하는 것은 대단히 중요하면서도 어려운 문제이다.

주축계의 굽힘강성은 Fig. 1과 같이 다이얼게이지 및 하중계를 이용하여 주축에 축 직각 방향의 하중(P)을 가하였을 때의 하중 방향의 변위를 측정하는 것으로 KS B 4001에 규정되어 있다.

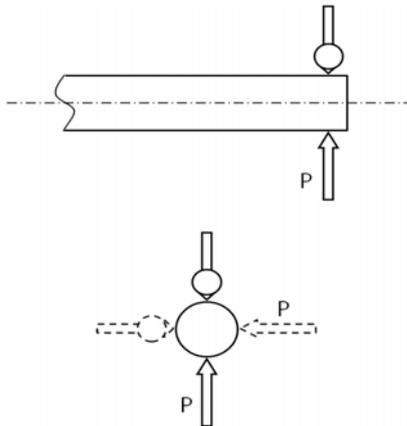


Fig. 1 Measuring principle of bending stiffness

이 방식은 주축이 정지된 상태에서 이루어지는 평가로 주축의 회전 중 발생하는 원심력에 의한 강성변화의 영향은 측정 중 고려하지 못한다. 현재와 같은 주축의 고속화 추세에서는 그 영향을 무시할 수 없으므로 새로운 평가 방법의 개발이 필요하다. 이에 T. Aoyama 등은 고속 회전 중 공구홀더 인터페이스의 강성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같은 장치를 이용하였다.

본 논문에서는 주축의 고속회전에 의해 발생하는 주축 인터페이스부의 접촉률 변화, 베어링의 접촉각 및 강성 변화 등에 의한 주축계의 강성 변화를 고려할 수 있고, T. Aoyama 등의 방식에서와 같이 많은 기계적 구성이 포함된 장치에서 오는 비선형성의 증가에 의한 정밀도 문제와 장치 구성의 어려움을 해결할 수 있는 새로운 강성 측정장치를 개발해 보고자한다.

이에 본 논문에서는 강자성체가 자기장 내에서 자기 유도

에 의해 자화되며 쿨롱의 법칙에 비례하는 흡인력이 두 자극 간에 작용하는 원리를 이용하여 비 접촉 상태로 주축계에 하중을 가하고 그에 따른 자기력의 변화를 측정하여 강성을 예측할 수 있는 새로운 측정장치의 개념을 제안하였다. 제안된 측정원리의 시제품을 제작하고, 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다.

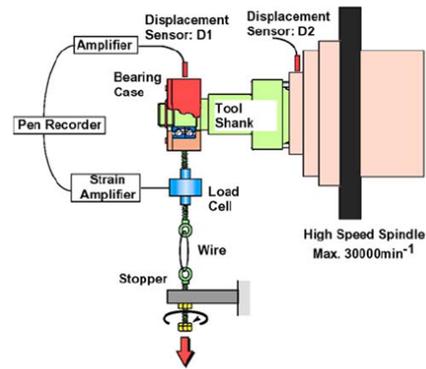


Fig. 2 Experimental equipment for measurement of radial stiffness

### 2. 자기력을 이용한 정강성 측정장치

기존의 다이얼게이지와 하중계를 이용한 방식이 아닌 두 자극 사이에 발생하는 자기력의 변화를 이용하여 강성을 측정할 수 있는 장치를 소개하고자 한다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 자기력을 이용한 정강성 측정장치의 전체 개념도이다. 구성은 전자석, 로드셀, 부쉬, 컨트롤러 등으로 구성된다.

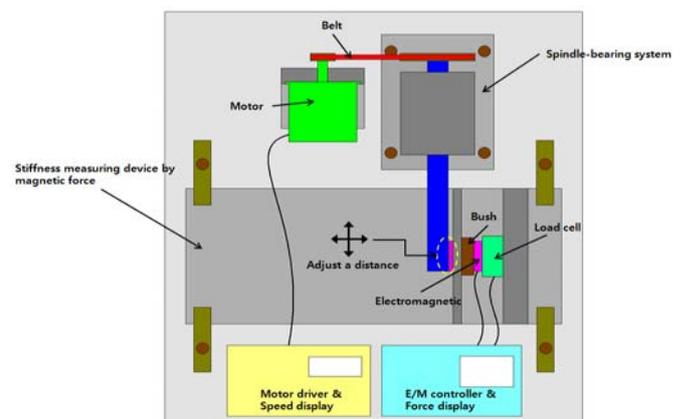


Fig. 3 Concept drawing of the prototype

각 구성품의 역할과 구조에 대해 살펴보면 전자석은 외부에서 인가되는 전류에 의해 시편에 흡인력을 가한다. 로드셀은 전자석과 시편사이에서 발생하는 자기흡인력을 측정하는 역할을 한다. 부쉬는 시편과 전자석 사이에서 발생한 자기흡인력이 손실 없이 로드셀에서 정확히 측정될 수 있도록 전자석을 축 방향으로는 풀어주고 반경 방향으로는 구속시키는 역할을 한다.

제안된 장치에서 시편의 강성을 측정하는 원리는 다음과 같다. 철, 니켈 등의 강자성체는 자기장 내에서 자기 유도의 의하여

자화되며 서로 흡인력이 작용한다. 이 흡인력은 쿨롱의 법칙으로 구할 수 있으며, 강한자석일수록 큰 흡인력이 작용한다. Fig. 4의 경우 발생하는 흡인력은 식(1)과 같다.

$$F_m = \frac{K(m_1 \cdot m_2)}{L_f^2} \tag{1}$$

여기서  $m_1, m_2$ 는 자극의 세기,  $L_f$ 은 양 자극 사이의 거리,  $K$ 는 비례 상수이다.

$L_f$ 는 전자석이 ON되었을 때 자극사이의 거리로 다음 식(2)로 계산된다.

$$L_f = L_i - x \tag{2}$$

여기서  $L_i$ 는 전자석 OFF시 자극과 자성체 사이의 거리이고  $x$ 는 자석과 자성체 사이에 작용하는 힘에 의한 시편의 변위이다.  $x$ 는 후크의 법칙에 의해  $F_a/k$ 이며  $F_a$ 는 자석과 자성체 사이에 작용하는 자기력으로 시편의 강성이 반영되지 않은 힘이다.  $k$ 는 시험편의 강성이다.

(1), (2)식을 이용하여  $k$ 에 대하여 정리한 후 해를 구하면 식(3)을 얻을 수 있고, 이 식을 이용하여 강성을 구할 수 있을 것으로 기대된다.  $C$ 는  $K(m_1 m_2)$ 이다.

$$k = \frac{F_a(L_i F_m \pm \sqrt{C \cdot F_m})}{F_m L_i^2 - C} \tag{3}$$

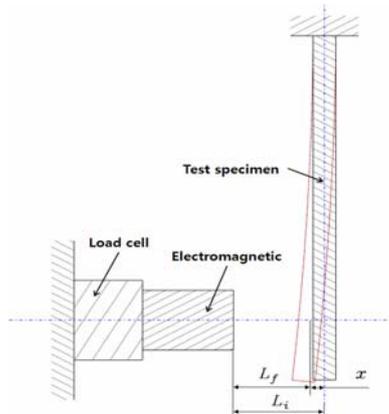


Fig. 4 Measuring principle of the proposed stiffness measuring device

Fig. 5는 제안된 강성 측정 장치의 가능성을 검증하기 위해 제작된 시제품의 전체 형상과 검증 실험에 사용된 시험편 형상을 보여주고 있다. 시험편은 이론적해를 쉽게 구할 수 있는 단순한 형상으로 두 가지 유형을 제작하였다.

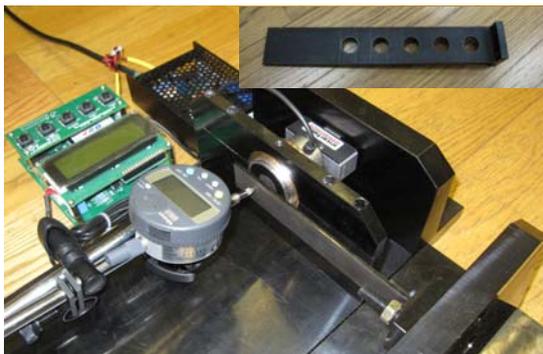


Fig. 5 Photo of the developed prototype of the stiffness measuring device

Fig. 6은 본 연구에서 제안한 식(3)과 시제품을 이용하여 측정된

시험편의 강성과 유한요소해석을 이용하여 구한 시험편의 강성을 보여주고 있다.

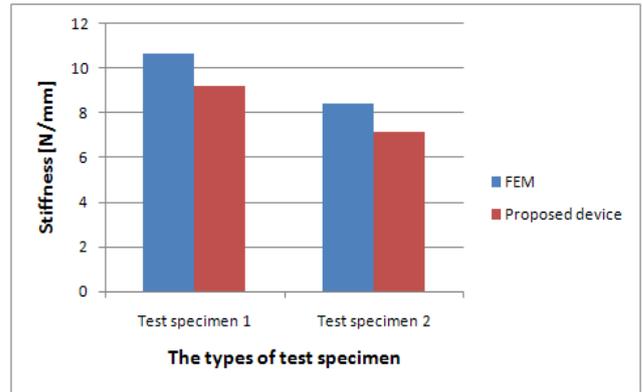


Fig. 6 Comparison results between FEM value and predicted value

측정결과 두 시편 모두에서 제안된 장치를 이용하여 예측한 값이 유한요소해석에 의한 계산값의 약 85% 수준으로 나타났다.

현재 제안된 장치를 이용한 강성 측정에서 시편의 변화에 따른 강성 변화의 정성적 양상은 측정이 됨을 확인하였으나 정량적인 값의 예측은 다소 부정확 한 것으로 나타났다. 측정과정에서 전자석과 시편사이의 거리 변화에 강성 예측값이 상당히 민감하게 반응하여 장치 설치의 정확성을 높이는 방안에 대해 검토 중이며 결과의 부정확성을 야기할 수 있는 여러 원인들에 대해 고찰 중이다.

### 3. 결론

본 논문에서는 주축회전수 변화에 따른 주축인터페이스부의 접착률과 베어링 특성 변화를 고려하여 주축계의 강성을 측정할 수 있는 새로운 개념의 강성측정장치를 개발하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강자성체는 자기장 내에서 자기 유도에 의해 자화되며 쿨롱의 법칙에 비례하는 흡인력이 두 자극 간에 작용하는 원리를 이용하여 주축계가 회전 중에도 강성을 측정할 수 있는 새로운 개념을 제안하였다.

2. 자기력을 이용한 강성측정장치에 대한 시제품을 제작하고, 측정시편에 대하여 실험을 수행하였다. 실험은 제안된 측정 원리를 검증하기 위해 정지상태의 시편에 대해 수행하였다. 측정결과 유한요소해석을 통해 예측한 값과 제안된 강성측정장치에 의한 실험값에 많은 차이를 보였다. 향후 이에 대한 원인 분석 연구를 계속할 예정이다.

향후 본 장치에 대한 추가적인 실험과 보안을 통해 현재 문제가 되는 정확성과 신뢰성을 높이고, 회전중인 주축계에 대한 강성평가 연구를 진행할 계획이다. 이를 통해 제안한 장치의 원리가 검증되고, 신뢰성이 확보된다면 종래보다 더욱 정밀한 주축계의 강성평가가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

### 후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. T. Aoyama, I. Inasaki, "Performance of HSK Tool Interfaces under High Rotational Speed," Annals of the CIRP, 50, 281-284, 2001.
2. W. H. Hayt, "Engineering Electromagnetics," McGraw-Hill, 1996.
3. 谷腰欣司, 2005, "전기와자기, 세화."
4. Eugege. I., Rivin, "Tooling Structure: Interface between Cutting Edge and Machine Tool," Annals of the CIRP, 49, 591-634, 2000.