# 상관계수법을 이용한 공작기계 결합부의 강성 튜닝
# Stiffness Tuning of Machine Tools Joints using the Correlation Method

*이찬홍[1]
*Chan Hong Lee[1] (chlee@kimm.re.kr)
[1]한국기계연구원 초정밀기계연구실

Key words : Joint Stiffness, Joint Tuning, Correlation Method, Gradient Search Method

## 1. 서론

치열한 경쟁 속의 세계시장에서 개발 장비의 시장진입은 기술적 신규성과 가격경쟁력을 기반으로 적절한 시기에 이루어져야 한다. 이 중에서 가격경쟁력은 신 장비를 개발하면서 소요되는 설계와 장비평가 비용을 단축시킨다면 상당한 효과를 얻을 수 있다. 그래서 세계 유수의 공작기계 제조 기업은 Virtual Machine Tool 개념을 속속 도입하여 개발 장비의 설계와 평가 비용 면에서 큰 도움을 받고 있다[1].

실제 공작기계 시작품을 전산상의 3D 구조모델로 대신하여 각종 특성평가와 실험하기 어려운 조건에 대한 거동을 평가하기 위해서는, 장비 내 모든 이동형과 고정형 결합부를 스프링 강성으로 대체하고 상응한 강성 값을 적용해야 한다. 일반적으로 3D 전산모델을 만들기 위해서는, 실제 장비의 모든 구조형상을 동일하게 전사하는 것이 아니라 작은 구멍, 모따기 등과 같은 미소 형상에 대한 것과 장비기능과 관계없는 디자인 관련 형상을 생략하기 때문에, 실제 장비의 질량과 강성분포가 전산모델의 분포와 다소간 차이가 있다. 그래서 시작품과 전산모델의 정동적 특성을 동일하게 만들어 실물과 같은 전산 시작품을 만들기 위해 결합부의 강성을 튜닝 해야 한다. 대부분의 전산모델에서 구조물의 특성을 좌우하는 것은 주물 구조물의 재료적 특성보다는 결합부의 특성에 의해 큰 차이를 내는 것으로 알려져 있기 때문이다.

본 논문에서는 전산모델의 결합부 강성을 결정할 때, 초기 시작품의 실험적 정적 처짐을 전산모델의 처짐과 상관계수를 계산해서 처짐곡선의 형태적 유사성을 평가함으로써, 형태가 동일한 상관계수 값 1에 최대한 접근할 때의 결합부 강성을 튜닝 강성 값으로 결정하는 방법론을 제시하였다.

## 2. 공작기계의 회전 결합부 - 주축 모델링

공작기계의 대표적인 회전 결합부인 주축 모델링을 이용하여 결합부의 강성 튜닝을 설명하도록 한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 주축빔은 회전 결합부인 베어링에 의해서 주축 하우징에 연결되어 있다. 이러한 전산모델의 경우, 실제 주축 시작품을 통해서 정적 처짐곡선을 측정하고, 전산모델에서 전후부 베어링의 강성을 변화시키면서 주축 선단 처짐 값을 얻고, 측정 값과 비교하여 베어링 강성을 튜닝하는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 강성 튜닝의 방법론에 대한 것이 주 내용이므로, 노이즈가 섞여 있는 실험적 주축 처짐을 측정하는 대신, 정적 특성과 베어링 강성을 잘 알고 있는 간단한 주축 모델을 통하여 정적 처짐 곡선을 계산한다. 또한 다른 전산모델을 튜닝용으로 만들어 상관계수 방법론을 통해 전후부 베어링 강성을 튜닝해서 방법론의 타당성을 관찰하도록 한다.

Table 1에는 간단한 이론적 주축의 사양과 알고 있는 베어링 강성을 나타내었고, Fig. 2에는 주축 선단에서 1 N의 하중을 가했을 때, 주축의 정적 처짐곡선을 나타내었다. 결국 정적 처짐곡선의 상관계수를 통해 상응한 베어링 강성을 찾을 수 있으면 튜닝 방법론의 타당성이 인정된다고 할 수 있다.

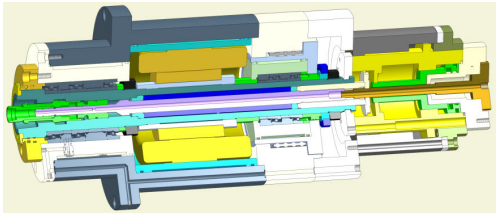
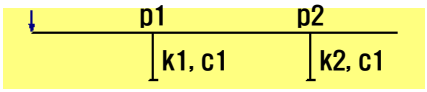


Fig. 1 Main spindle with rotating joints in machine tools

Table 1 Specification of Simple Spindle System




| | |
|---|---|
| Spindle Length | 0.3 m |
| Outer/Inner Diameter | 0.04 / 0.02 m |
| Bearing Position, p1 / p2 | 0.1 / 0.23 m |
| Bearing Stiffness, k1 / k2 | 273.625 / 163.828 N/㎛ |

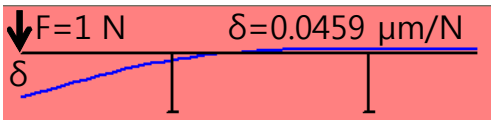



Fig. 2 Spindle deflection curve with force at spindle nose

## 3. 상관계수 법에 의한 결합부의 강성 튜닝

두 개의 곡선 값 x(i), y(i) 에 대한 유사성은 상관계수 $\Upsilon_{xy}$에 의해서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{xy} = \frac{\sum(x-\bar{x}) \bullet (y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \bullet \sum(y-\bar{y})^2}} \qquad (1)$$

여기서 x(i)는 Fig. 2에 의해 알려진 처짐곡선이고, y(i)는 전후 베어링 강성을 임의로 입력한 주축의 처짐곡선이다. 예를 들면 Fig. 3은 전후부 베어링 강성을 100과 300 N/㎛으로 입력한 정적 처짐곡선으로 Fig. 2와의 상관계수 값이 0.97206으로 계산되었다.

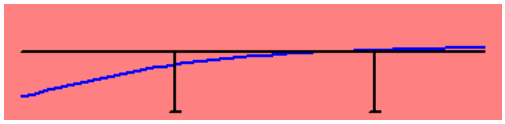
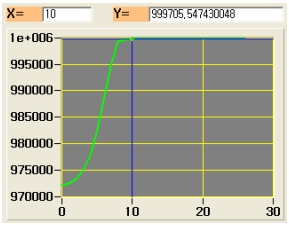
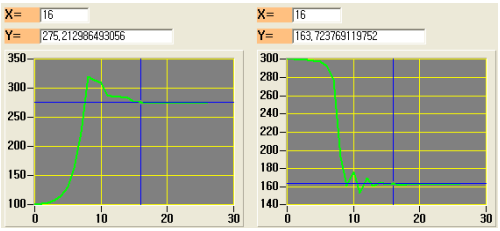


Fig. 3 Spindle deflection curve with front and rear bearing stiffness k1=100, k2=300 N/㎛

주축 모델에서는 전후부 베어링 강성계수 2개를 입력변수로 하기 때문에, 이 변수들에 대한 상관계수 값이 최대가 되었을 때 찾고자 하는 베어링 강성 값이 된다. 이러한 최대, 최소 값을 찾는 방법은 수동으로 할 수 없고, 다차원 공간에서 각 축에서 가파른 경사를 찾아서 경로를 결정하는 알고리즘인 Gradient Method를 사용하였다. 그리고 계산상의 정확도를 높이기 위해 식 (1)에 $10^6$을 곱하였다. 제안된 방법론으로 베어링 강성값을 찾기 위해 총 375번의 탐색용 해석이 이루어졌고, 27번의 경로 변경이 있었다. 그래서 최대 상관계수의 변화 궤적은 Fig. 4(a)에 나타냈고, 각 전후부 베어링 강성 입력 값의 변화는 Fig. 4(b)에 나타냈다. 제안된 방법론에 의해 찾아진 전후부 베어링의 강성은 273.629와 162.828 N/㎛로서 99.9%의 정확도를 가지고 있다.




(a)




(b)

Fig. 3 Joint stiffness tuning with correlation analysis and grandient search methods

## 4. 결론

1. 공작기계 결합부의 강성 튜닝을 위해서 상관계수 법과 급경사 검색법을 사용한 결과 99.9 %의 정확한 회전 결합부 강성값을 얻을 수 있었다.
2. 상관계수 법에 의한 튜닝은 처짐곡선의 형태를 기반으로 하므로, 처짐곡선의 최소 3점을 선택하고, 고르게 분포하면 좋은 결과를 얻을 수 있다.
3. 실제 주축의 처짐측정에서 측정 가능한 부위가 전후단의 축 노출부위이므로, 이 양단에 각 2개씩 분포 측정하면, 강성 정확도는 99.8 %가 된다.

## 참고문헌

1. Altintas, Y., Brecher, C. Weck, M. and Witt, S. "Virtual Machine Tool," Annals of the CIRP, 54/2, 2005.