

# 선반 구조변경을 위한 현장용 공구대 강성계산모델

허성혁\*, 김수진\*\*,#

\*경상대학교 기계시스템공학과, \*\*경상대학교 기계항공공학부

## Practical Turret Stiffness Calculation Model to Modify Lathe Structure

Seong-Hyeok Heo\*, Su-Jin Kim\*\*,#

\*Department of Mechanical System Engineering, Gyeongsang National University,

\*\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

(Received 24 July 2017; received in revised form 4 August 2017; accepted 6 August 2017)

### ABSTRACT

In this research, a practical stiffness calculation method is developed and applied for modifying the height of the headstock, turret, and tailstock of a CNC lathe to enlarge the turntable diameter. The casting structure is assumed to be a rigid body and the linear motion element to be an elastic spring to simplify the turret stiffness calculation model. The stiffness of the sliding guide and ball screw of the original lathe is measured with a push tester and LVDT sensor, and the turret stiffness of the modified lathe is predicted and compared with experimental results to verify the model. The measured stiffness of the original turret is 0.17 kN/ $\mu$ m and that of the modified turret is 0.11 kN/ $\mu$ m, i.e., an 18% difference from the predicted result. The verified stiffness calculation model can be used to develop another modified lathe.

**Key Words** : Modified Lathe(구조변경), Turret Stiffness(터렛 강성), Stiffness Model(강성모델), Sliding Guide(미끄럼 가이드), Practical(현장용), Turnable Diameter(선삭 직경)

### 1. 서 론

CNC 선반 주축과 공구대의 강성은 가공정밀도, 가공품질, 생산성 등에 많은 영향을 주는 인자로서 지금까지 많은 연구가 이루어져 왔다. 한편 공작기계 제조사에서는 다양한 시장수요의 만족과 개발기간 단축, 개발비용 절감을 목표로 베드프레임과 주요부품은 그대로 사용하고 주축과 공구대 등 일부 부품을 변경하여 선삭 가능 직경을 확대한 파생기

종 개발이 많이 이루어지고 있다. 기존 CNC 선반에 관한 연구들은 선반 전체를 새롭게 디자인하고 그것의 강성을 구조해석을 통해 예측하고 개선하는 것들이 주를 이루고 있다.<sup>[1-5]</sup> 가공장비의 직선이송장치<sup>[6]</sup>와 구조부의 조립관계로 정밀도와 강성을 분석한 연구<sup>[7]</sup>와 핵심 요소 부품인 볼스크류<sup>[8]</sup>와 LM 가이드<sup>[9]</sup>의 정밀도와 강성을 해석한 연구들이 있다.

하지만 현장에서 구조변경이 발생할 때마다 구조해석을 실시하기엔 어려움이 많아 설계자의 노하우에 많이 의존하고 있는 실정이다. 따라서 지금까지 해왔던 경험에 의존한 구조변경에서 벗어나 실험과 간단한 강성예측 모델을 통해 목표로 하는 강성을

# Corresponding Author : [sujinkim@gnu.ac.kr](mailto:sujinkim@gnu.ac.kr)

Tel: +82-55-772-1636, Fax: +82-55-772-1630

만족시킬 수 있는 구체적이고 체계적인 구조변경 절차와 방법론을 정립할 필요가 있다.

본 연구에서는 CNC 선반의 공구대를 대상으로 구조변경 시 강성의 변화를 쉽게 계산할 수 있는 현장용 계산모델을 만들고 그것을 실험을 통해 검증함으로써 향후 선삭 가능 직경을 늘린 모델을 설계할 때 기본적인 강성에 대한 이해가 있다면 바로 쉽게 강성변화를 계산할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 현장용 강성모델 개발

### 2.1 선반 구조변경

선반을 설계하는 중소기업은 안전 요건 등을 고려할 때 바람직하지는 않지만 기본모델에서 고객의 요구가 반영된 구조변경 요구를 많이 받고 있다. 그 예로 직경이 큰 공작물을 가공하기 위한 주축대와 공구대의 높이 증대 구조변경이 있는데, 기존 장비는 최대선삭가능 직경이 300 mm이며 주축대, 공구대, 심압대의 중심축 높이만 각각 70 mm 높이는 구조변경을 통해 최대선삭가능 직경을 350 mm까지 확대하였다. Fig 1. (a)는 구조변경 전후 공구대의 높이 변화를 나타낸다.

### 2.2 주물은 강체로 가정

구조변경 전후 주축대 주물구조의 오토데스크 인벤터 구조해석에서 강성이 기존 1.5 kN/μm에서 구조변경 후 1.2 kN/μm로 예측되었다. 공구대도 주물구조의 Fig. 1 (b)와 같이 전체를 하나의 주물로 가정해 구조해석하면 기존 1.7 kN/μm과 구조변경 후 1.1 kN/μm로 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성을 포함한 실제 측정값보다 약 10배 크게 계산되었다. 그 이유는 주축대와 공구대 모두 주물의 강성이 아주 큰 반면 주물 베드와 공구대를 연결하는 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성은 상대적으로 작기 때문이다. 이렇게 공구대의 강성에 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성이 큰 영향을 미치므로 주물은 강체로 보고 미끄럼가이드와 볼스크류를 탄성체로 가정해 이론적 수식을 유도하여 현장용 강성계산 모델을 만들었다.

### 2.3 공구대의 강성이론

공구대의 주물을 강체로 미끄럼가이드와 볼스크류를 탄성체로 가정해 강성을 이론적으로 유도하면 다음과 같다. Fig. 2 개념도에서 좌우 방향은 z축이고 앞뒤 방향은 x축이고 상하 방향은 y축이며, 베드와 왕복대 사이의 강성은 아래첨자1로 왕복대와 이송대 사이의 강성은 첨자2로 표시하였다.

베드와 왕복대 사이의 z축 회전방향 강성  $k_{\theta z1}$ 은 식 (1)과 같이 두 미끄럼가이드의 y방향 강성  $k_{y1}$ 과 가이드간의 폭  $w$ 로 나타낼 수 있다.

$$k_{\theta z1} = \frac{1}{2}k_{y1}w^2 \quad (1)$$

왕복대와 이송대 사이의 z축 회전방향 토크는 식 (2)와 같이 미끄럼가이드의 단위 길이별 힘과 거리를 가이드 길이  $l$ 로 적분해 계산할 수 있다.

$$T_{z2} = 4 \int_0^{\frac{l}{2}} \left( \frac{k_{y2}}{l} \theta_{z2} x \right) x dx = \frac{1}{6} k_{y2} l^2 \theta_{z2} \quad (2)$$

식 (2)로부터 왕복대와 이송대 사이의 z축 회전방향 강성  $k_{\theta z1}$ 은 미끄럼가이드의 y방향 강성  $k_{y2}$ 와 길이로 식 (3)과 같이 유도된다.

$$k_{\theta z2} = \frac{1}{6} k_{y2} l^2 \quad (3)$$

전체 공구대의 x방향 강성  $k_x$ 은 힘의 위치  $h$ 와 변형량을 측정하는 높이  $m$  그리고 각 요소의 강성으로부터 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\frac{1}{k_x} = \frac{h_1 m_1}{k_{\theta z1}} + \frac{h_2 m_2}{k_{\theta z2}} + \frac{1}{2k_{x1}} + \frac{1}{2k_{x2}} \quad (4)$$

식 (4)에 식 (1)과 식 (3)을 대입하면 식 (5)과 같이 왕복대와 베드 사이 미끄럼가이드의 강성과 이송대와 왕복대 사이 미끄럼가이드 및 볼스크류의 강성을 측정해 공구대의 x방향 강성을 계산할 수 있게 된다.

$$\frac{1}{k_x} = \frac{2h_1m_1}{k_{y1}w_1^2} + \frac{6h_2m_2}{k_{y2}l_2^2} + \frac{1}{2k_{x1}} + \frac{1}{2k_{x2}} \quad (5)$$

식 (5)에서 중심점을 높이는 구조변경은 높은 길이의 제곱에 비례해 공구대의 강성을 약화시킴을 알 수 있다. 이를 보완해 같은 강성을 가지기 위해서는 미끄럼가이드의 폭과 길이를 구조변경 높이에 비례해서 키워야 함을 알 수 있다. 즉 식 (6)과 같이 높이 증가에 비례해 미끄럼가이드의 폭과 길이를 늘이면 강성이 유지된다.

$$w_1 \propto \sqrt{h_1m_1}, \quad l_2 \propto \sqrt{h_2m_2} \quad (6)$$

위와 같은 방법으로 공구대의 z방향 강성을 식 (7)과 같이 유도할 수 있으며 중심점을 높이는 구조변경에서 미끄럼가이드의 폭과 길이를 키워 강성을 보완할 수 있다. 실제 설계에서는 구조변경 후 z방향의 강성저하를 보완하기 위해서 이송대 미끄럼가이드의 폭  $w_2$ 를 확대하였다.

$$\frac{1}{k_z} = \frac{6h_1m_1}{k_{y1}l_1^2} + \frac{2h_2m_2}{k_{y2}w_2^2} + \frac{1}{2k_{z1}} + \frac{1}{2k_{z2}} \quad (7)$$

## 2.4 강성계산 소프트웨어 개발

앞에서 유도한 강성 계산 방법은 강성과 역학을 이해한다면 비교적 쉽게 계산할 수 있지만 현장에서 공구대의 구조변경 시 강성을 쉽게 예측할 수 있도록 식 (5)를 포함한 강성예측 프리웨어 Fig. 3를 Visual C++ 대화상자 기반으로 개발하고 웹에 공개하였다. 선반 구조 해석과 관련된 기존 연구들과 비교할 때 개발 모델의 우수성은 없지만 현장용으로 쉽게 사용할 수 있다는 점이 다르다.

## 2.5 기본 강성측정

앞의 강성계산 모델을 완성하기 위해서는 베드와 왕복대(Cross slide) 이송대(Carriage) 사이의 x, y, z 축 강성이 각각 요구된다. 강성 예측에서 어려운 부분은 각 요소별 강성 측정으로 본 논문에서는 푸시 테스터를 이용하여 구조물에 일정한 힘

을 가한 후 LVDT로 변형량을 측정하여 베드와 왕복대 그리고 왕복대와 이송대 사이의 탄성체인 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성을 각각 측정하여 Table 1에 나타냈다. 측정된 강성은 x방향 0.5 kN/ $\mu\text{m}$  y방향 1.0 kN/ $\mu\text{m}$ 로 주물 구조물 강성의 10% 미만으로 현장용 계산 모델에서 주물 구조물을 강체로 가정한 것이 타당하다.

## 3. 구조변경 적용실험 및 고찰

### 3.1 선반 구조변경

베드에서 주축중심까지의 거리가 280 mm인 기존 장비에서 가공가능 소재 직경을 늘리기 위해서 거리 350 mm인 구조변경 장비를 설계하고 제작하였다. 기존 장비는 Fig. 4 (a)와 같고 구조변경된 장비는 Fig. 4 (b)와 같다. 두 장비 모두 같은 베드와 미끄럼가이드, 볼스크류를 사용하고 구조변경 후 장비의 주축대, 공구대, 심압대의 주물구조 높이만 70 mm높여 선산 가능 직경을 17% 늘인 새로운 모델을 개발함으로써 비용증가를 최소화하였다. 장비의 가공성을 비교하기 위해 직경 80 mm의 SM45C의 소재를 절삭속도 2 m/s, 이송속도 0.3 mm/rev의 조건으로 선삭하여 가공깊이 12 mm 까지 양호한 표면품질을 얻을 수 있었다.

푸시 테스터를 이용하여 구조물에 일정한 힘을 가하면서 LVDT의 변형량을 읽어 주축대, 공구대, 심압대의 x방향 강성을 측정하고 강성계산 모델과 비교 검증하였다.

### 3.2 결과 및 고찰

주축대의 강성은 구조해석에서 기존 모델 1.6 kN/ $\mu\text{m}$ 과 구조변경 모델 1.2 kN/ $\mu\text{m}$ 이었고 실험에서는 모두 약 1 kN/ $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 심압대의 강성은 기존 0.13 kN/ $\mu\text{m}$ 에서 구조변경 후 0.1 kN/ $\mu\text{m}$ 로 주축대와 비교하여 약 0.1배에 불과했다. 주축대의 강성에 비해 공구대와 심압대의 강성이 약 0.1배로 낮게 나타난 것은 주축대는 베드에 볼트로 체결된 반면 공구대는 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성에 영향을 받고 심압대는 미끄럼가이드의 강성에 영향을 받기 때문으로 사료된다.

주물을 강체로 가정하고 미끄럼가이드와 볼스크류를 탄성체로 가정한 이론에서 강성은 구조변경 전 0.14 kN/μm에서 구조변경 후 0.10 kN/μm으로 약 29% 감소하는 것으로 예측되었다. 실험에서도 구조변경 전 0.17 kN/μm에서 구조변경 후 0.11 kN/μm로 35% 감소하여 예측과 18% 오차로 일치하였다.

측정된 미끄럼가이드와 볼스크류의 강성 Table 1과 이론적 모델 식 (5)로 예측한 구조변경 전후 공구대의 강성은 Table 2와 같다. 구조변경 전 공구대 x방향 강성은 0.14 kN/μm 이고 구조변경 후 강성은 0.10 kN/μm이다. 또한 구조변경 후 공구대의 x방향으로 200 N의 힘이 가해질 때 변형량은 2.1 μm임을 예측하였다.

**Table 1 Stiffness of sliding guide and ball screw**  
(kN/μm)

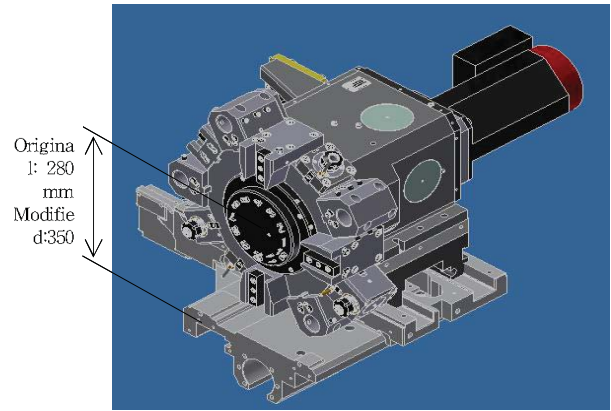
Position	$k_x$	$k_y$	$k_z$
Bed-Cross slide	$0.5 \pm 0.1$	$1 \pm 0.25$	1
Cross slide-Carriage	$0.5 \pm 0.1$	$1 \pm 0.25$	-

**Table 2 Predicted turret deformation and stiffness**

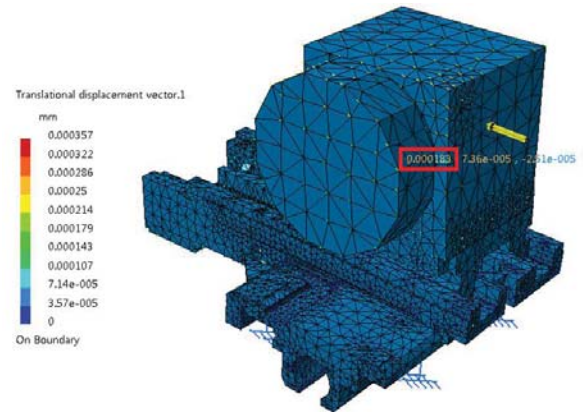
Model	Deformation (μm)	Stiffness (kN/μm)
Original	$1.4 \pm 0.3$	$0.14 \pm 0.05$
Modified	$2.1 \pm 0.4$	$0.10 \pm 0.03$

**Table 3 Predicted and measured turret stiffness**  
(kN/μm)

Model	Predicted	Experiment
Original	$0.14 \pm 0.05$	0.17
Modified	$0.10 \pm 0.03$	0.11

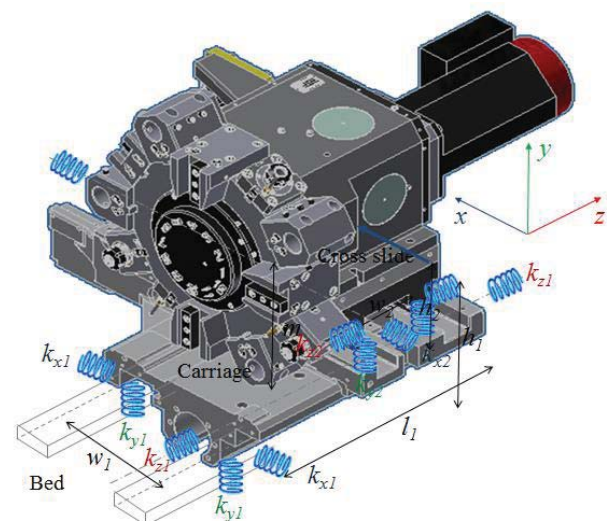


(a) Modified turret (increase 70 mm)



(b) FEM analysis of a solid

**Fig. 1 Modified turret and FEM analysis**



**Fig. 2 Sliding guide and ball screw stiffness diagram**

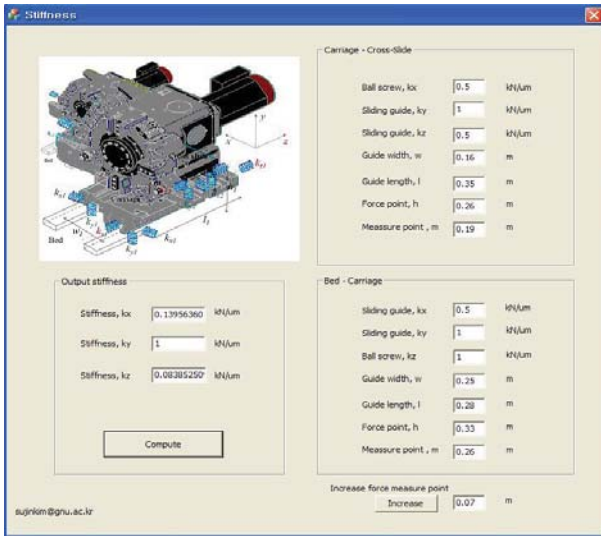
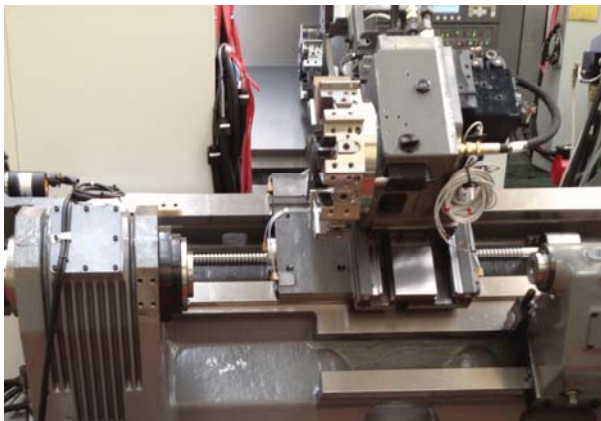
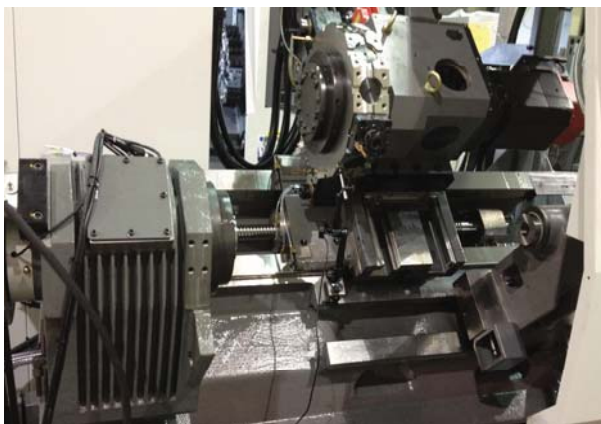


Fig. 3 Developed stiffness calculation software



(a) Original



(b) Modified

Fig. 4 Original and modified CNC lathe

## 4. 결론

본 연구에서는 직경 300 mm까지 선삭 가능한 기존 CNC 선반의 선삭가능 직경을 350 mm로 늘이기 위해 축의 높이를 증가시킨 구조변경 CNC 선반을 설계하고 제작해 강성변화를 이론과 실험을 통해 비교하였다.

구조해석으로부터 변경 전 주축대의 강성 1.5 kN/μm에서 변경 후 주축대의 강성은 1.2 kN/μm으로 25% 감소하였다. 주축대의 강성에 비해 공구대의 강성이 약 0.1배로 낮게 나타난 것은 주축대는 베드에 볼트로 직결된 반면 공구대는 상대적으로 강성이 작은 미끄럼가이드와 볼스크류로 연결되어 있기 때문이다.

공구대 전체를 하나의 주물로 가정한 구조해석의 강성이 미끄럼가이드와 볼스크류의 탄성변형을 포함한 실측에 비해 아주 커서, 주물구조는 강체로 가정하고 이송계를 탄성체로 가정한 단순화 모델을 이론적으로 유도할 수 있었다.

주물을 강체로 가정하고 미끄럼가이드와 볼스크류를 탄성체로 가정한 이론에서 공구대의 강성은 구조변경 전 0.14 kN/μm에서 구조변경 후 0.10 kN/μm으로 약 29%감소하는 것으로 예측되었다. 실험에서도 구조변경 전 0.17 kN/μm에서 구조변경 후 0.11 kN/μm로 35% 감소하여 예측과 18% 오차로 일치하였다.

개발된 간단한 강성 계산 모델을 이번 연구처럼 선반의 가공 가능 직경을 높이는 경우 낮아지는 공구대 강성을 예측하는 데 쉽게 사용할 수 있도록 Visual C++로 개발해 공개했다. 이 프로그램은 선반 구조해석 연구에 비해 단순한 것이지만 현장의 구조면경 설계에 빠르고 쉽게 적용할 수 있다는 점에 차이가 있다.

## REFERENCES

1. Sawada, K., "Development of Ultraprecision Machining Center with Closed-Loop Structure and Its Control", Annals of the CIRP, Vol.44, No.1, pp. 369-372, 1995.

2. Lee, T. H., Choi, J. W., "Structural Analysis on Horizontal CNC Lathe", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 3, pp. 298-303, 2011.
3. Kang, S. H., Kim, C. S., "A Study on the Static/Dynamic Stability for the Structure of a Mill Turret with a B-Axis Tilting Facility", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 1, pp. 39-44, 2014.
4. Hong, J. P., Gong, B. C., Choi, S. D., Choi, H. J., Lee, D. S., "Study on Structure Design of High-Stiffness for 5-Axis Machining Center," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 5, pp. 7-12, 2011.
5. Moon, D. J., Cho J. H., Choi Y. S., Hwang I. H., Lee, J. C, "High-Stiffness Structure Design of 8-Axis Multi-tasking Machine for Automotive Powertrain Shafts," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15 No. 2, pp. 78-83, 2016.
6. Oh, J. S., Kim, G. H., Park, C. H., Chung, S. J., Lee, S. K., Kim, S. J., "Accuracy Simulation of the Precision Linear Motion Systems," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 275-284, 2011.
7. Lee, C. H., Song, C. K., Kim, B. S., Kim, C. J., Heo, S. G., "Technologies to Realize High Stiffness Mechatronics Systems in Production Machines," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, pp. 32, No. 5, pp. 431-439, 2015.
8. Min, B. K., Cao, L., Kim, K. H., Park, C. H., Chung, S. C., "Modeling and Uncertainty Analysis of Ballscrew Nut Stiffness", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 5, pp. 415-422, 2015.
9. Zou, H. T., Wang, B. L., "Investigation of the contact stiffness variation of linear rolling guides due to the effects of friction and wear during operation," Tribology international, Vol. 92, pp. 472-484, 2015.