한국기계가공학회지, 제21권, 제7호, pp. 21～27(2022.07) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 7, pp. 21～27(2022.07) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2022.21.07.021

CNC 복합 자동선반 구조물의 구조해석 및 동특성 분석에 관한 연구

양동호*, 이상협*, 차승환*, 곽진*, 이종찬*,#, 이영식**
*금오공과대학교 기계설계공학과, **(주)대성하이텍

Structural Analysis and Dynamic Characteristics Analysis of CNC Automatic Lathe Structure

Dong-Ho Yang*, Sang-Hyeop Lee*, Seung-Hwan Cha*, Jin Kwak*, Jong-Chan Lee*,#, and Young-Sik Lee**
*School of Mechanical Engineering, Kumoh Nat. Inst. Tech., **Daesung HI-TECH co., Ltd.

(Received 12 April 2022; received in revised form 25 April 2022; accepted 02 May 2022)

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the structural stability of a CNC automatic lathe structure and avoid resonance. The analysis conditions were analyzed by applying the weight of the upper assembly. From the structural analysis, the stress and deformation were low, and the safety factor was high. From the dynamic characteristic analysis, it was determined that resonance does not occur because the natural frequency is outside the driving range. The error between the dynamic characteristic analysis and vibration test results is very low; thus, the reliability of the analysis results can be secured.

Keywords : Automatic Lathe(자동선반), FEM(유한요소해석), Natural Frequency(고유진동수), Resonance(공진), Stablility(안정성)

1. 서 론

최근 제조 산업에서 다품종 생산에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 생산성 향상에 관한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 공작기계의 성능 향상을 위해 다양한 Unit 추가 및 다축화가 진행되고 있으며 고속가공을 위해 스핀들의 회전속도 또한 점차 높아지고 있다.

축의 숫자가 증가하고 공작기계에 적용되는 ATC, Spindle 등의 Unit이 추가됨에 따라 장비 하부 지지 구조물에 작용하는 하중을 분산시켜 구조적 안정성을 확보하기 위한 연구가 필요하다. 또한, 스핀들 회전속도가 증가함에 따라 하부 구조물의 진동 분산이 원활히 이루어져야 하며, 고유진동수를 높여 공진에 대한 회피 설계가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 장비 하부 구조물의 안정성을 평가하기 위한 구조해석 및 동특성 분석을 진행하고, 해석 결과를 바탕으로 제작된 실제 제품의 진동 시험을 통해 해석과 시험 결과의 비교 분석으로 검증을 진행하고자 한다.

Corresponding Author : jclee@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7376, Fax: +82-54-478-7382

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 구조해석

2.1 해석조건

본 연구에서는 CNC 복합 자동선반 9축 장비로 구조물의 구조적 안정성 평가를 위해 구조물 설계를 진행하고, 장비에서 발생하는 자중과 상부 적용 Unit의 무게를 하중조건으로 부여하여 구조해석을 진행하였다.

CNC 복합 자동선반 3D Modeling은 AUTODESK INVENTOR를 활용하여 진행하였으며, 구조해석 및 동특성 분석은 은 ANSYS Workbench를 활용하였다. Table 1은 구조물의 소재를 나타내고 있으며, 주조성과 기계적 성질을 고려하여 GC300 소재를 선정하였다. CNC 복합 자동선반의 3D Modeling 형상은 Fig. 1에 나타내었다.

장비의 구조물은 2D 도면을 토대로 모델링을 진행하였으며 경량화 효과 및 하중, 진동 분산 효과의 극대화를 위해 아치형 리브(Rib)구조를 설계하여 적용하였다.

해당 구조물 상부에 스핀들이 조립되기 때문에 해당 조립부에 스핀들의 무게를 하중 조건을 부여하였으며, 구조물 하부에 구속조건을 부여하여 구조해석을 진행하였다. 스핀들의 무게는 Table 2에, 구속조건은 Fig. 2, 하중 조건은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 Material properties of GC300

Density (kg/m^3)	Young's Modulus (GPa)	Poisson Ratio
7,300	124	0.3

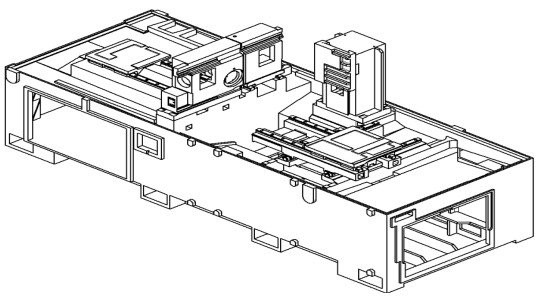


Fig. 1 3D Modeling of base

Table 2 Weight of spindle

	Spindle
Weigt(Kg)	69.48

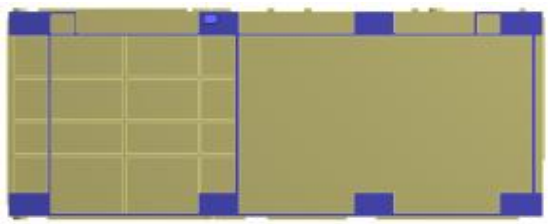


Fig. 2 Supports of base

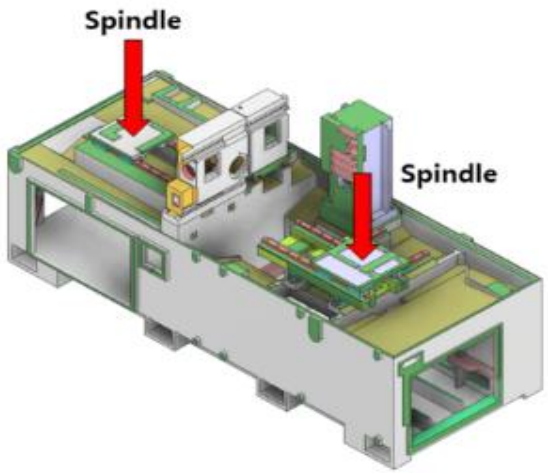


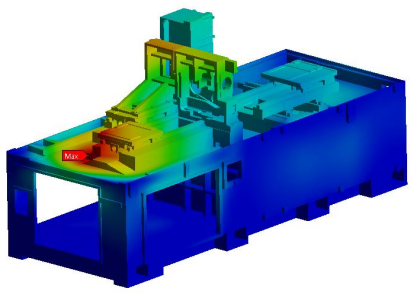
Fig. 3 Analysis load condition

2.2 구조해석 결과

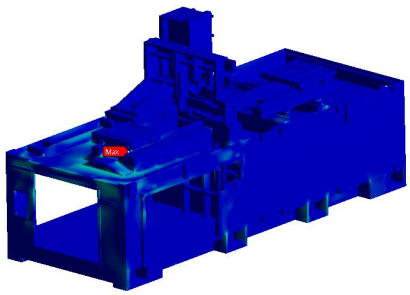
CNC 복합 자동선반의 구조해석 결과 변형과 응력에 대한 결과를 얻었다. Fig. 4와 Table 3에서 구조해석 결과를 나타내었다.

Fig. 4에 (a)는 변형량을 나타내고 있으며, 최대 변형량은 15.159㎛로 Sub Spindle 이송부에 나타났으며, 최대 응력은 4.1987Mpa Sub Spindle 이송부에서 나타났다.

본 구조물에 적용되는 소재의 항복강도 195Mpa을 고려하였을 때 최대 응력에 대한 안전율은 46.44로 안전한 구조임을 알 수 있다.



(a) Deformation



(b) Stress

Fig. 4 Results of base structural analysis

Table 3 Results of structural analysis

Type	Result
Equivalent Stress(MPa)	4.1987
Deformation(㎛)	15.159

3. 동특성 해석

3.1 해석조건

장비의 무게가 2,889kg으로 매우 높다. 고유진동수의 경우 질량과 강성에 의해서 결정되는데 질량이 높아질수록 장비의 고유진동수가 상승하며, Spindle 회전에 의하여 발생하는 진동과 장비의 고유진동수가 같아질 경우 공진에 의해 장비의 파손이 발생할 수 있다.

이에 동특성 분석을 통하여 장비의 고유진동수를 확인하고, 고유진동수가 Spindle의 회전에 의한 진동의 범위를 초과하게끔 설계를 진행하고자 한다.

해석에 사용된 조건은 기존 구조해석과 동일한 구속조건과 하중 조건을 부여하였으며, Spindle의 회전수 8,000rpm을 진동수로 환산하면 최대 133.3Hz로 구조물의 고유진동수가 이 범위를 초과하여야 한다.

3.2 동특성 해석 결과

설계를 바탕으로 한 동특성 해석의 결과 1차 모드가 167.58Hz, 2차 모드 223.15Hz, 3차 모드 259.91Hz로 파악되었다. 각 모드별 형상은 Fig. 5에서 Fig. 7까지 나타내었다.

1차 모드는 Tool Post 상단에서 Y축 기준 Bending이 발생하였으며, 2차 모드는 장비 바닥부에서 Y축 방향 Bending이 발생하였고, 3차 모드는 Main Spindle Post에서 Y축 기준 Twisting 되는 것으로 확인되었으며, 진동수와 변형 형상은 Table 4에 나타내었다.

동특성 해석 결과 1차 모드가 장비의 Spindle 회전에 의하여 발생하는 진동수보다 높으므로 장비 가동간 공진에 의한 문제는 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

Table 4 Natural frequency and mode shape

Mode	Natural Frequency	Mode shape
1st Mode	167.58Hz	Bending along Y axis at tool post
2nd Mode	223.15Hz	Bending along Y axis at bed
3rd Mode	259.90Hz	Twisting aling Y axis at spindle post

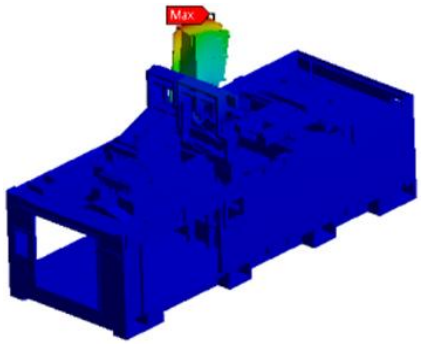


Fig. 5 Mode shape of natural frequency(1st Mode)

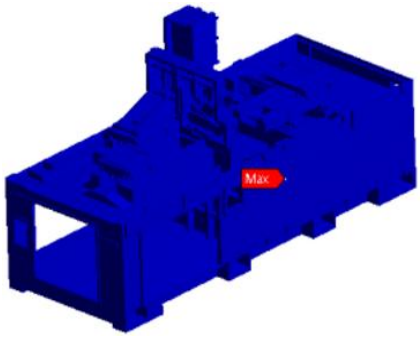


Fig. 6 Mode shape of natural frequency(2nd Mode)

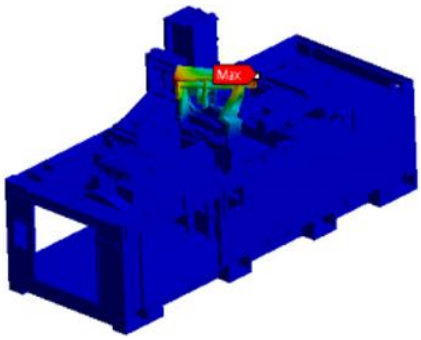


Fig. 7 Mode shape of natural frequency(3rd Mode)

Table 5 Spec. of impact hammer(PCB Ltd. co., 086D20)

Description	Unit
Sensitivity(±15%)	0.23mV/N
Measurement Range	±22240N pk
Resonant Frequency	≥ 12kHz
Non-Linearity	≤ 1%

4. 진동시험

4.1 고유진동수 실험 장비

해석 결과를 토대로 실제 장비를 제작한 후 해당 장비의 고유진동수 측정을 통해 설계 및 해석에 대한 검증을 진행하였다.

고유진동수 실험은 Fig. 8과 같이 3축 가속도 센서를 측정부에 부착하고 Impact Hammer를 이용하여 임의의 가진을 주어 전용 프로그램을 통해 응답하는 주파수를 분석하는 방식으로 진행되었다.

고유진동수 측정 장비는 PCB사의 3축 가속도센서(Triaxial Accelerometer, 356A15)와 임팩트 해머(Short-sledge Impulse Hammer w/force sensor & tips, 086D20), 그리고 신호수집기 (NATIONAL INSTRUMENT社, NI9234 & cDAQ9171), 전용 프로그램 (NEWWAVE)를 통해 진행되었으며, Fig. 9 ~ Fig. 11, Teble 5 ~ Table 7에 장비 형상과 상세 Spec을 나타내었다.

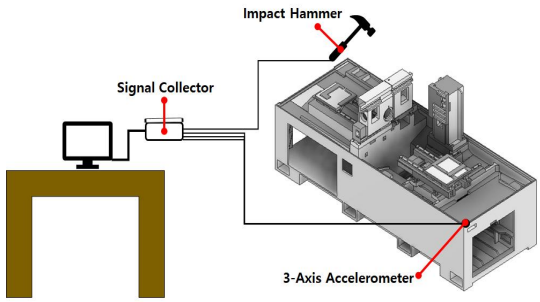


Fig. 8 Natural frequency experiment concept diagram

Fig. 9 Impact hammer(PCB Ltd. co., 086D20)

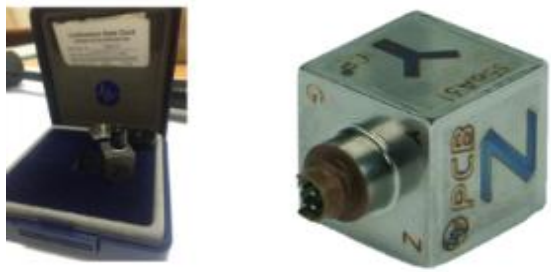


Fig. 10 3-Axis accelerometer(PCB Ltd. co., 356A15)

Table 6 Spec. of 3-axis accelerometer(PCB Ltd. co., 356A15)

Description	Unit
Sensitivity(±10%)	10.2mV/(m/s2)
Measurement Range	±490m/s2 pk
Frequency Range(±5%)	2 to 5000Hz
Frequency Range(±10%)	1.4 to 6500Hz
Resonant Frequency	≥ 25kHz
Broadband Resolution (1 to 10000Hz)	0.002 m/s2 rms
Non-Linearity	≤ 1%
Transverse Sensitivity	≤ 5%

Fig. 11 signal collector (INSTRUMENT Ltd. co., NI9234)

Table 7 Spec. of signal collector (INSTRUMENT Ltd. co., NI9234)

Description	Unit
Signal Range	±5V
Channel	4 differential
Sample Rate	51.2kS/s/ch
Resolution	24-Bit
Excitation	2mA
Connectivity	BNC

4.2 고유진동수 실험 결과

고유진동수 실험을 실시하기 위해 총 4개의 위치에 3축 가속도 센서를 부착한 후 실험을 통하여 고유진동수 측정을 진행하였으며, Fig. 12에 센서 부착 위치를 나타내었다.

실험은 데이터의 신뢰성 향상을 위하여 Impact Hammer를 이용하여 임의의 가진을 주며 총 10회 반복을 통해 진행되었으며, 해당 값들의 평균적인 경향성을 프로그램에 의하여 데이터로 나타내었다.

고유진동수는 X,Y,Z 3개의 축에서 동시에 진동량이 급증하는 구간을 고유진동수로 파악하였으며, 측정 데이터는 FIg. 13에서 Fig. 16에 나타내었으며, Table 8에 정리하여 나타내었다.

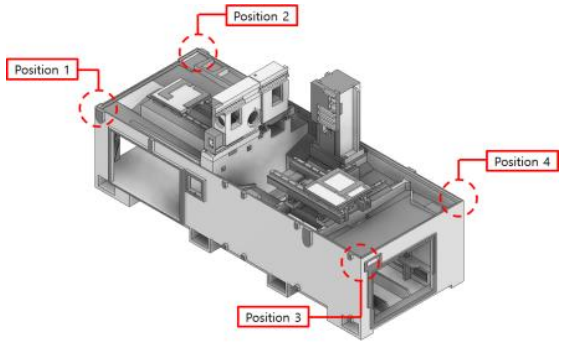


Fig. 12 Position of 3-Axis accelerometer

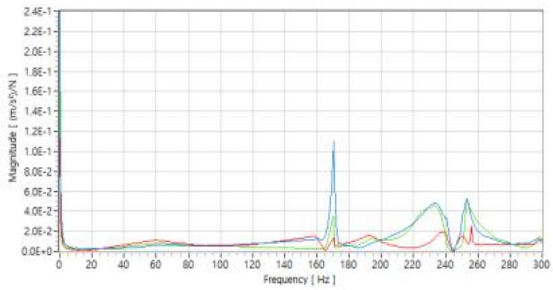


Fig. 13 Result of natural frequency experiment(at position 1)

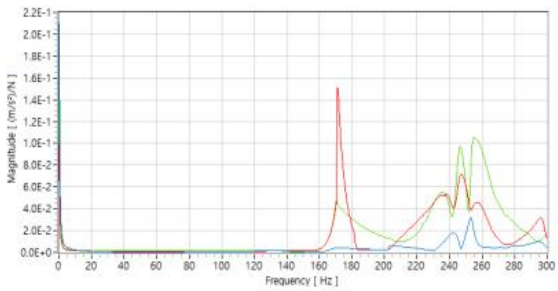


Fig. 14 Result of natural frequency experiment(at position 2)

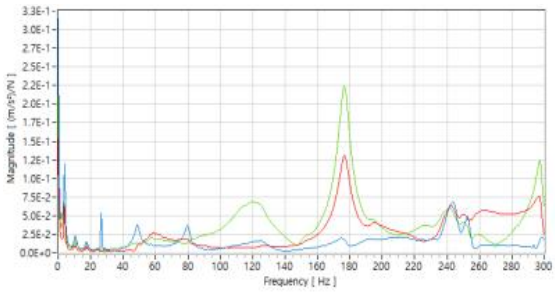


Fig. 15 Result of natural frequency experiment(at position 3)

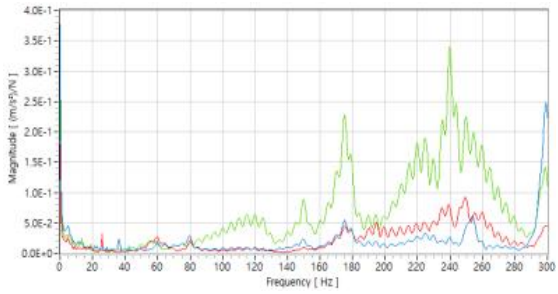


Fig. 16 Result of natural frequency experiment(at position 4)

Table 8 Natural frequency experimental result

Mode	Natural frequency
1st mode	170.5Hz
2nd mode	232.5Hz
3rd mode	263.5Hz

Table 9 Comparison of Modal analysis data with dynamic characteristic experimental results

Number \ Analysis		Modal analysis data	Experimental data	Error
Natural frequencies	1st	167.58Hz	170.5Hz	1.71%
	2nd	223.15Hz	232.5Hz	4.02%
	3rd	259.90Hz	263.5Hz	1.36%

5. 해석과 실험 결과 비교

5.1 해석 결과와의 오차

동특성 해석 결과와 고유진동수 실험 결과의 오차는 1차 모드에서 2.95Hz, 2차 모드에서 0.65Hz, 3차 모드에서 3.60Hz로 나타났으며, 해당 데이터의 비교표를 Table 9에 나타내었다.

해석과 실제의 오차가 최대 4.02%로 최대 오차가 10% 미만이므로 설계에 따른 제작이 우수하게 진행된 것으로 확인되었으며, 해석의 신뢰성을 확보하였다.

또한, 1차 모드가 170.5Hz로 10,230rpm 수준에 해당하므로 장비 가동 중 고유진동수에 의한 공진 현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 CNC 복합자동선반의 제작에 있어 설계의 안정성을 구조해석 및 동특성 분석을 통해 확보한 후, 이를 토대로 제작된 장비에 대한 실험을 통해 공진 발생 여부를 확인하는 연구를 진행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 전체 구조물의 설계를 바탕으로 3D 형상화된 장비의 최대 응력은 4.7987Mpa로 적용 소재를 고려하였을 때 안전율은 46.44로 매우 높게 나타났다.
2. 동특성 분석 결과 1차 모드가 167.58Hz로 장비의 가동범위를 벗어나 공진현상 발생은 없는 것으로 나타났다.
3. 제작된 장비에 대한 고유진동수 실험 결과 1차 모드가 170.5Hz로 장비의 최대 가동 범위를 벗어나는 것으로 확인되었다.
4. 장비의 동특성 해석 결과와 실제 장비를 통한 실험 결과에서 발생한 오차가 최대 4.06% 수준으로 나타났으므로 해석에 대한 신뢰성을 확보하였다.

후 기

“본 연구는 한국산업기술진흥원에서 지원하는 월

드클래스300 프로젝트 기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다."

REFERENCES

1. "Technology Roadmap for SME,"(2022) http://smtech.go.kr
2. Lee, S. H., "A Study on the Structure Design of CNC Automatic Lathe to Improve Structural Stability," Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea, 2021.
3. Lee, W. H., Lee, T, K., Kim, B. S., "An Experimental Study on the Natural Frequency and the Mounting Conditions of Automobile Al-alloy Wheel," Journal of Korean Society of Enviromental Technology, Vol. 16, No. 6, pp. 533~540, 2015.
4. Kim, S. I., Lee, J, H., Lee, P, G., Kim, C, E. "Comparison of Measured Natural Frequencies of a Railway Bridge Specimen Between Different Excitation Methods," KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 30, No. 6, pp. 535~542, 2010.
5. Lee, W. S., Lee, J. C., Yang, D. H., Cha, S. H., Yoo, J. G., "A Study on the Structural Characteristics of Integral Type Auto Packaging M/C Main Frame", Proceeding of the KSMPE autumn Conference, pp. 156-156, 2018.
6. Kim, Y. H., "Study on Structure and Vibration Characteristics of CMP unit using FEM", Chagwon National University, Republic of Korea, 2015.