



위상 최적화 기법을 이용한 수평형 공작기계의 칼럼 리브구조 최적설계

황지상^a, 김성재^{a*}, 성철훈^b

Study on the Optimal Design of Column Rib Structure of Horizontal Machine Tool Using Topology Optimization Technique

Ji-Sang Hwang^a, Sung-Jae Kim^{a*}, Chul-Hoon Sung^b^a Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Dong-A University^b Institute of Technology, Sungsan Amdeco Inc.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 October 2022

Revised 21 November 2022

Accepted 23 November 2022

Keywords:

Rib

Machine tool

Static stiffness

Lightweight

Structural analysis

Topology optimization

ABSTRACT

As carbon neutrality is the advancement in the electric vehicle industry, the demands for battery module cases are increasing. However, current manufacturing machineries are encountering challenges to meet the required demand owing to low precision and long duration for cutting the materials. To meet the demand, it is necessary to study a machine tool that has machining precision and reduced cutting process time. However, current machine tools are not optimized because they are designed according to the subjective decision and experience of the designer. To solve this problem, research is needed to lightweight and increase stiffness by optimally designing ribs of machine tools. In this study, I attempted to increase stiffness and lightweight by applying the topology optimization technique to the column rib of the machine tool. Furthermore, I intend to derive the optimized design parameters by comparing static stiffness of the initial shape and optimized shape after optimization.

1. 서론

탄소 중립으로 인하여 전기자동차 산업의 지속적인 발전과 자동차 배기가스의 정부 정책 및 규정 등에 따라 전기차 배터리 시장이 성장하여 배터리 모듈 케이스의 수요도 증가하고 있다. 이러한 배터리 모듈 케이스는 알루미늄이 사용되며 낮은 탄성계수 및 연신율로 인한 성형 공정의 기술적 한계가 있다^[1]. 또한 배터리 셀을 고정하여 안정성을 요구하므로 높은 절삭 공정 기술과 치수 정밀도가 필요하다. 배터리 모듈 케이스는 수직형 머시닝센터로 가공되고 있으나 공작물의 양 측면 가공을 위한 반복적인 셋팅으로 가공정밀도가 저하되고 절삭 공정 시간을 증가시키는 단점을 가지고 있다. 때문에

대부분의 배터리 모듈 케이스 생산은 외주 가공에 의존하고 있는 실정이다. 이를 해결하기 위하여 공작물의 양 측면을 동시에 가공하여 생산성을 증가시키는 수평형 공작기계의 연구가 집중되고 있다.

공작기계는 크게 주축, 안내면, 몸체로 구성되어 있다. 이 중에서 몸체에 해당하는 칼럼(column)과 베드(bed)는 주요부의 중량을 지지하기 위하여 높은 강성(stiffness)이 요구되며 원가 절감을 위한 경량화 설계가 이루어져야 한다. 그러나 공작기계는 개념설계 단계에서 설계자의 주관적 결정과 경험에 의존하여 설계되며^[2,3], 이러한 설계 방식은 강성 미확보로 가공오차 및 불량률이 증가하거나 과도한 안전율로 원가 절감을 이룰 수 없는 원인이 된다. 따라서 공작기계의 강성을 증가시켜 변형을 최소화하고 경량화를 위해

* Corresponding author. Tel.: +82-51-200-7647

E-mail address: sjkim641@dau.ac.kr (Sung-Jae Kim).

여 리브(rib) 설계가 도입되며, 원가 절감을 위하여 리브 구조를 최적화하는 연구가 필요하다. 최적화 연구는 설계자가 설계한 모델을 토대로 설계 변수에 따라 치수 최적화, 형상 최적화 및 위상 최적화(topology optimization)로 분류된다. 최근 공작기계 분야에서 주요부의 강성을 평가하고^[3-7] 이를 기반으로 다양한 최적화 기법들을 적용하여 공작기계를 재설계하였다.

Han 등^[8]은 내면 연삭기의 리브 두께를 설계변수로 선정하여 정·동강성평가 기반의 치수 최적화를 수행 후 약 10%의 경량 설계를 이루었다. Park 등^[9]은 C-형 지지부의 두께를 설계 변수로 선정하고 구조해석 기반의 치수 최적화를 수행하여 18.74 kg을 경량화 하였다. Kim 등^[10]은 헤드 구조물의 정·동강성을 고려하기 위하여 Pareto optimal solution 방식의 위상 최적화를 수행하여 2.1%의 경량 설계를 이루었다. Lee 등^[11]은 헤드 프레임의 정·동강성을 고려한 위상 최적화를 수행하여 구조물 형상을 최적화하여 17.3%의 경량 설계를 이루었다.

앞서 소개된 논문 중 치수 최적화를 적용한 연구들은 구조물의 설계변수인 두께를 최적화하였으나, 그 외 위상 최적화를 적용한 연구에서는 구조물을 직접적으로 설계 변경하여 최적화된 설계인자를 도출하였다. 이러한 위상 최적화는 계획 설계 공간 내에서 작용하는 하중 및 경계조건을 토대로 재료를 재분배하여 새로운 개념의 형상을 제공하는 기법으로 자동차 또는 기계 부품의 형상^[12] 또는 리브 설계에도^[13,14] 활용되고 있다. 그러나 공작기계의 개념설계 단계에서 리브 설계에 적용한 사례는 찾아보기 어려운 상황이다.

본 논문에서는 공작기계의 개념설계 단계에서 설계자의 주관적 결정과 경험으로 설계되어 강성과 경량화가 고려되지 않는 문제를 해결하고자 칼럼의 정강성에 국한하여 위상 최적화 기법을 적용하고 최적화된 리브 구조를 도출 후 이를 설계하는 방향을 제시하고자 한다. 최적화 연구를 수행하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS Workbench를 사용해 자중과 절삭력을 고려한 구조 해석을 실시하여 정강성을 도출하였다. 그리고 결과 값을 토대로 리브 구조의 위상 최적화를 수행하고 초기 형상과 최적화된 형상의 정강성을 비교하여 설계 검증을 실시하였다.

2. 초기 모델의 정강성 해석

2.1 초기 모델의 해석 조건

해석 대상 모델의 칼럼은 Fig. 1과 같이 좌우 직선 왕복운동을 하며, 칼럼에 결합된 스피indle 헤드(spindle head)는 볼 스크류(ball screw)와 LM 가이드(LM guide) 그리고 블록(block)과 상하 직선 왕복운동을 하고 있다. 유한요소 해석 시 전체 조립품에 대하여 해석을 수행하면 요소 수에 비례하여 시간이 증가한다. 따라서 칼럼의 거동 특성과 관련 있는 LM가이드 및 블록을 제외한 부속품을

Table 1 Material property

Material	FC30	SM45C
Young's modulus [GPa]	122.5	207
Poisson's ratio	0.25	0.3
Density [kg/m ³]	7200	7850
Yield strength [MPa]	227.5	250

Table 2 Mass of regenerated modules

Part	mass [kg]	Part	mass [kg]
Spindle head	163.71	Belt drive cover	2.084
Belt drive	33.114	Air cylinder	2.043
Slide cover & bracket	14.614	Pully & screw shaft	15.627

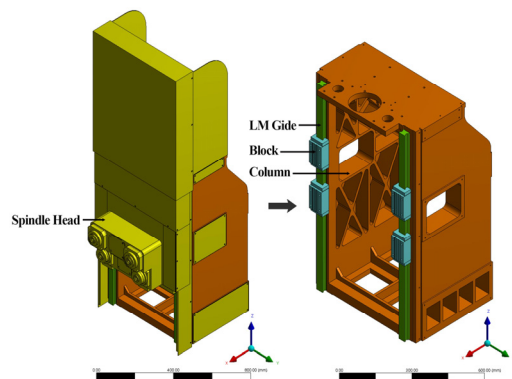


Fig. 1 Simplified column shape

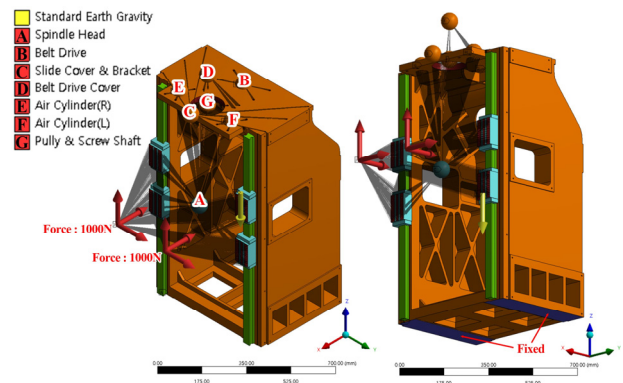


Fig. 2 Boundary condition of column

간소화하여 해석을 진행하고자 하였다. 칼럼은 주물 제품으로 FC30, LM 가이드와 블록은 SM45C가 사용되었으며 물성치는 Table 1에 도시하였다. 하중조건은 자중을 고려하기 위하여 간소화 된 칼럼 부속품 질량과 중력 조건을 적용하였으며 이를 Table 2에 도시하였다. 또한 가공 부하를 고려하여 스피indle의 공구 끝점을 생성 후 통상 해석 시 사용되는 절삭력 1,000 N을 X, Y, Z축 방향으로 적용하였다. 그리고 칼럼 하단을 구속조건으로 적용하였으며 경계조건(boundary condition)에 대하여 Fig. 2에 도시하였다.

Table 3 Deformation & stiffness of initial shape

Axis	Deformation [μm]	Stiffness [$\text{N}/\mu\text{m}$]
X	7.964	125.57
Y	7.024	142.36
Z	36.806	27.17

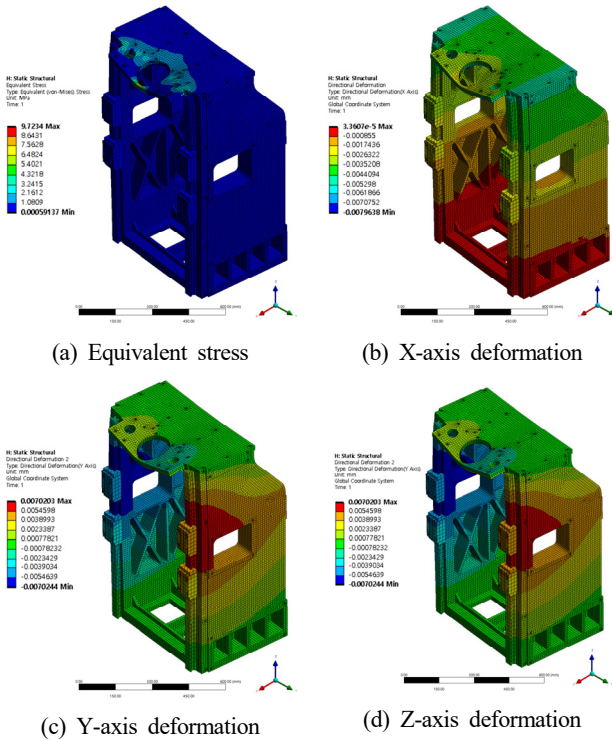


Fig. 3 Analysis result of initial shape

2.2 초기 모델의 정강성 해석 결과

칼럼의 정강성 해석을 위하여 앞에서 정의한 조건으로 구조해석을 실시하고 응력과 X, Y, Z 축 방향의 변형량을 도출하였다. 그리고 절삭력 1,000 N에 각 축의 변형량 [μm]을 나누어 X, Y, Z 축 방향의 정강성을 도출하였다. 해석 결과 발생한 응력은 9.723 MPa이며, 각 축의 변형량은 X축 7.964 μm , Y축 7.024 μm , Z축 36.806 μm 이다. 결과 값을 토대로 강성을 도출한 결과 X축은 125.57 N/ μm , Y축은 142.36 N/ μm , Z축은 27.17 N/ μm 이며 변형량과 강성에 대한 결과 값을 Table 3에 도시하였다. Fig. 3에 도시한 바와 같이 볼 스크류가 설치되는 지점에서 가장 큰 응력과 변형이 발생하였으며 초기 리브 구조가 적절하지 않다고 판단된다. 따라서 칼럼 내부의 리브 구조를 최적화할 필요가 있다.

3. 칼럼의 위상 최적화

3.1 최적설계 방법

위상 최적화는 초기형상의 질량을 효과적으로 재분배함으로써

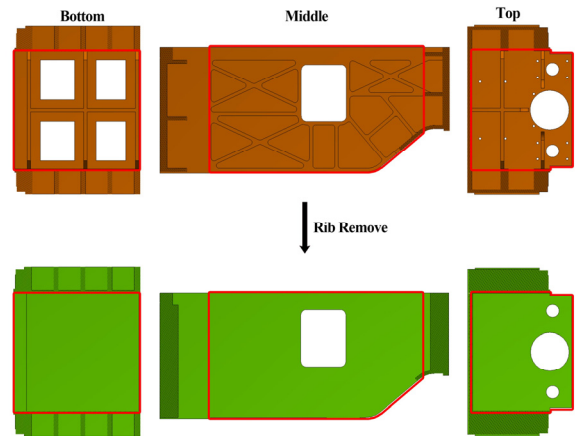


Fig. 4 Remove rib from initial shape

최적화된 형상을 도출하는 기법이다. 이러한 최적화 기법은 개념설계 단계에서 설계 방향을 선정하는 도구로 사용되고 있다. 따라서 최적화를 수행하기 위해서는 개념설계단계의 형상이 필요하므로 현재 형상을 과 설계(over design) 모델로 변경할 필요가 있다. Fig. 4와 같이 칼럼의 리브를 제거하고, 리브의 높이만큼 질량을 추가하였다.

초기 칼럼의 리브 구조는 리브의 방향과 작용하는 하중에 따라 상단부와 중심부, 하단부로 구분할 수 있다. 상단부는 생략되었던 부속품의 중량을 지지하며, 중심부는 상단부의 하중 및 절삭력, 하단부는 비틀림 하중을 견디고 있다. 따라서 리브 구조마다 집중적으로 최적화 해석을 수행하기 위하여 형상을 세분화하였으며 적절한 리브 구조를 도출하기 위하여 상단부에서 중심부, 하단부 순서로 위상 최적화를 수행하고자 한다.

3.2 목적함수와 제약조건

일반적으로 위상 최적화는 식 (1)^[15]과 같이 최적설계의 목적 함수(objective function)인 컴플라이언스(compliance)를 최소화함으로써 전역 강성(global stiffness)이 최대화 되도록 한다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } C(x) &= u^T K u = \sum_{j=1}^n u_j^T K_j(x_j) u_j \\ \text{Subject to } \sum_{j=1}^n x_j v_j &\leq V_o \\ 0 < x_{\min} &\leq x_j \leq 1, \quad j=1,2,3\dots n \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 C는 컴플라이언스 함수이며, u는 각 절점에서의 변위 벡터, x는 유사밀도(pseudo density), K는 강성, V_o는 설계 공간의 부피를 뜻한다. 여기서 설계 변수인 유사 밀도의 값은 0에서 1 사이로 나타난다. 유사 밀도가 0인 경우에는 요소(element)가 비활성화되고 1인 경우에는 요소가 활성화되며 최적화가 진행된다. 이러한 식을 바탕으로 칼럼의 최적 설계 목적함수와 제약조건을 지정하였다. 식 (2)와 같이 칼럼의 목적함수는 컴플라이언스가 최소화 되도록

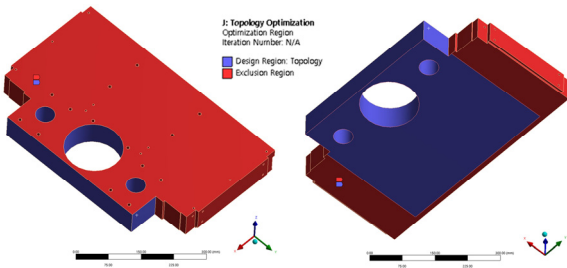


Fig. 5 Optimization area at the top

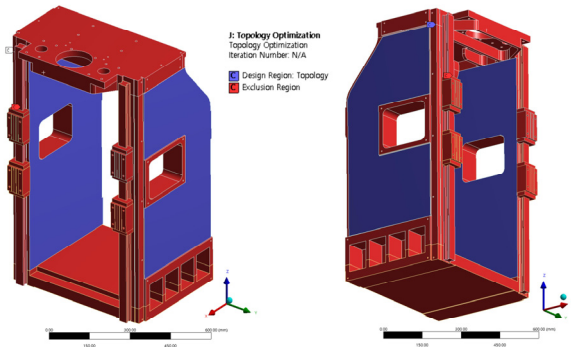


Fig. 6 Optimization area in the middle

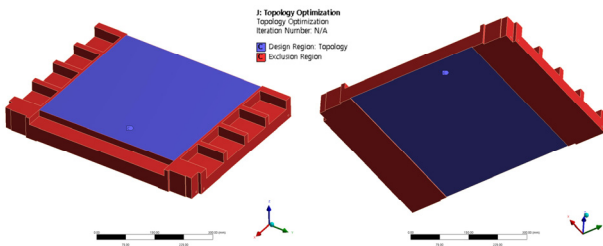


Fig. 7 Optimization area at the bottom

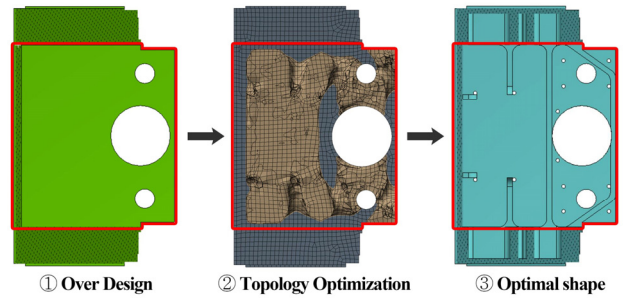


Fig. 8 Rib re-design at the top

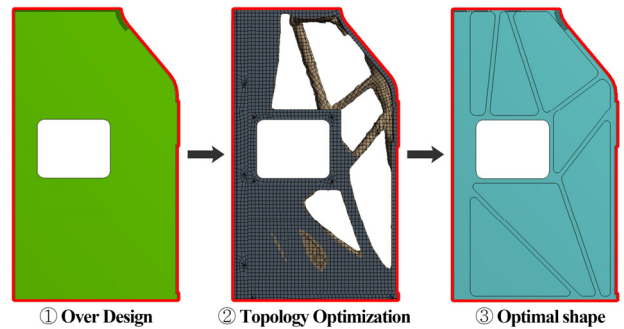


Fig. 9 Rib re-design in the middle

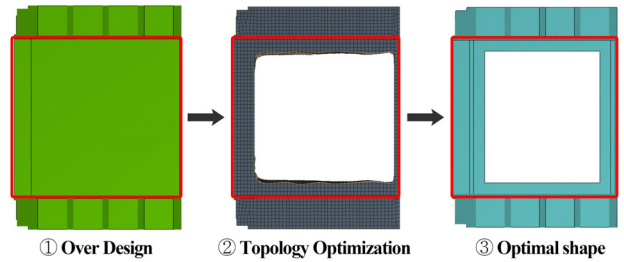


Fig. 10 Rib re-design at the bottom

하였다. 제약조건으로는 최적화된 형상의 질량이 초기 형상의 질량 284.57 kg를 초과하지 않도록 하였고, 처짐으로 인하여 가공정밀도가 저하되는 것을 방지하기 위하여 3축의 최대 변형량이 $5 \mu\text{m}$ 이하가 되도록 하였다.

Minimize compliance

Subject to displacement $\leq 5 \mu\text{m}$ (2)

Mass $< 284.57 \text{ kg}$

3.3 상단부의 최적형상

위상 최적화 수행을 위해서 최적화 영역과 비 최적화 영역을 구분해야 한다. 따라서 Fig. 5와 같이 상단부의 하면을 최적화 영역으로 설정하였으며, 제약조건을 고려하여 질량이 25% 감소하도록 설정 후 위상 최적화를 수행하였다. 최적화 수행 결과 최대 처짐이 발생하였던 볼 스크류 주변부에 질량이 집중됨을 확인할 수 있었던 반면, 초기 리브가 설계된 지점에서는 질량이 감소된 것을 확인할 수 있다.

이는 최대 처짐이 발생한 볼 스크류의 주변부에 보강설계가 필요한 것으로 판단된다. 해석 결과를 바탕으로 Ansys Space Claim을 사용하여 Fig. 8과 같이 리브 구조를 재설계하였다. 리브의 치수는 초기 설계된 두께 12 mm, 높이 40 mm로 설계하였다.

3.4 중심부의 최적형상

상단부의 최적화 수행 결과 재설계된 형상을 기반으로 Fig. 6과 같이 중심부 벽면을 최적화 영역으로 설정하였다. 그리고 제약조건을 고려하여 벽면의 질량이 25%로 감소하도록 설정 후 위상 최적화를 수행하였다. 그 결과 상단부의 유닛을 버티기 위한 형상이 도출되었다. 해석 결과를 토대로 Fig. 9과 같이 리브 구조를 재설계하였다. 리브의 치수는 초기 설계된 두께 12 mm, 높이 72 mm로 설계하였다.

3.5 하단부의 최적형상

앞서 수행한 최적화 형상을 기반으로 Fig. 7과같이 하단부의 양

Table 4 Mass change after topology optimization

	Mass [kg]	Rate of decrease
Initial shape	284.57	10.84%
Optimal shape	256.73	

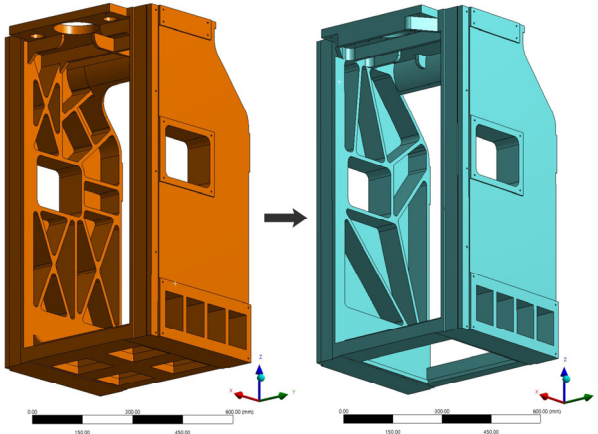


Fig. 11 Optimized shape of column

면을 최적화 영역으로 설정하였다. 그리고 제약조건을 고려하여 질량이 25%로 감소하도록 설정 후 위상 최적화를 수행하였다. 해석 결과 바닥 면의 리브는 구조적으로 필요 없음을 확인할 수 있다. 해석 결과를 바탕으로 Fig. 10과 같이 하단부를 재설계하였다.

3.6 최적화 결과

위상 최적화를 수행함으로써 리브 구조의 설계 방향을 검토하였다. 상단부는 질량을 추가하여 보강설계를 하였으며 중심부와 하단부는 리브를 변경하거나 제거하여 초기 질량 284.57 kg에서 최적화 후 256.73 kg으로 10.84% 경량화할 수 있었다. Fig. 11에는 초기 칼럼 형상과 최적화 칼럼의 형상을 도시하였다.

4. 최적화 모델의 정강성 해석

4.1 최적화 모델의 해석 조건

초기 형상은 X, Y축 하중에 대하여 높은 강성 값을 보인 반면, Z축에서는 비교적 낮은 강성 값을 확인할 수 있었다. 앞서 수행한 위상 최적화 연구를 통하여 보강 및 경량화를 진행하였으므로 최적화 형상에 대한 검증할 필요가 있다. 이에 최적화 형상에 대하여 정강성 해석을 실시하였으며 해석 조건으로는 초기모델과 같은 조건으로 수행하였다.

4.2 최적화 모델의 정강성 해석 결과

칼럼의 구조해석 후 최대응력과 X, Y, Z축 방향의 변형량을 도출하였으며 결과 값을 토대로 정강성을 계산하였다. 해석 결과 Fig.

Table 5 Comparison of analysis result after optimization

Axis	Initial shape	Optimal shape	Rate of decrease
X-deformation [μm]	7.964	4.348	45.4%
Y-deformation [μm]	7.024	3.505	50.1%
Z-deformation [μm]	38.806	3.623	90.7%
Equivalent stress [MPa]	9.723	1.75	82%

Table 6 Comparison of stiffness after optimization

Axis	Initial shape	Optimal shape	Rate of increase
X-stiffness [N/ μm]	125.57	229.98	83.1%
Y-stiffness [N/ μm]	142.36	285.32	100.4%
Z-stiffness [N/ μm]	27.17	275.98	915.8%

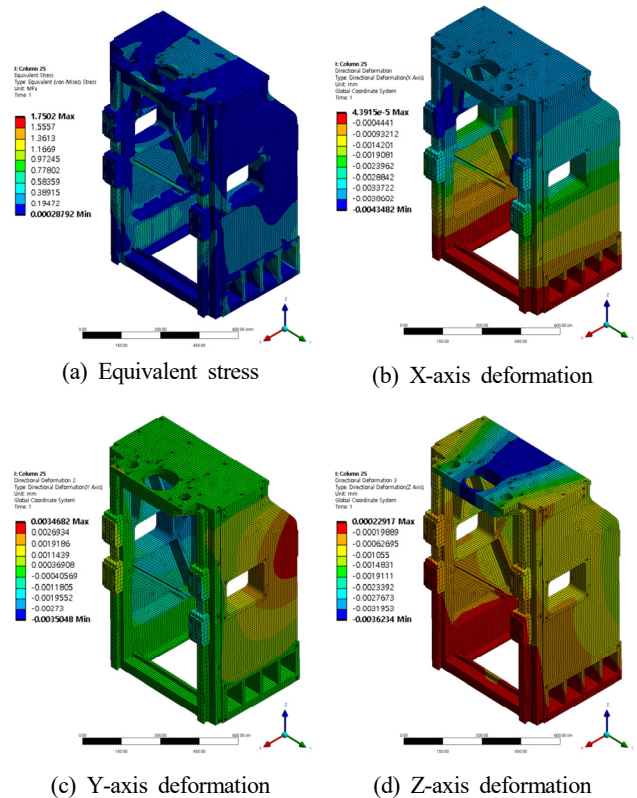


Fig. 12 Analysis result of optimized shape

12와 같이 최대 응력은 1.75 MPa로 초기 형상 대비 82% 감소하였으며 변형량은 X축 4.348 μm 로 45.4% 감소, Y축 3.505 μm 로 50.1% 감소, Z축 3.623 μm 로 90.7% 감소하였다. 발생응력과 변형량이 전체적으로 감소하였으며 Table 5에 도시하였다. 본 해석 결과를 토대로 강성을 계산한 결과 X축은 229.98 N/ μm 로 83.1% 증가, Y축은 285.32 N/ μm 로 100.4% 증가, Z축은 275.98 N/ μm 로 915.8%로 증가하였으며 이를 Table 6에 도시하였다. 최적화된 칼럼 형상은 전체적으로 강성이 증가하였으며, 특히 Z축 강성의 가장 크게 증가하였다. 본 연구를 통하여 칼럼의 경량화와 강성 증가를

달성할 수 있었으며 리브 구조의 설계 방법에 대한 검증 또한 이루어졌다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존 리브를 형상 세분화를 통한 위상 최적화 기법으로 수행한 결과로 도출된 리브 구조를 수평형 공작기계의 칼럼에 적용하여 경량화하고 강성을 증가시키고자 하였다. 연구 수행 결과는 다음과 같다.

최적화 수행 전 칼럼의 중량은 284.57 kg으로 구조해석 결과 최대응력은 9.723 MPa이며 X축 강성은 125.57 N/μm, Y축 강성은 142.36 N/μm, Z축 강성은 27.17 N/μm이다. 특히, Z축 강성은 X, Y축 강성에 비해 낮은 값을 보인다. 이는 볼 스크류가 설치된 지점에서 최대 응력 및 처짐이 발생하였기 때문이다. 따라서 초기 리브 구조가 적절하지 않다는 것을 확인할 수 있으므로 이를 최적화할 필요가 있었다.

위상 최적화 수행 후 칼럼의 중량은 256.73 kg으로 제약조건에 수렴하였으며 하단부에서 질량 감소가 크게 이루어져 초기 형상 대비 10.84% 감소하였다. 또한 상단부에서 최대응력 발생하였던 주변부에 질량이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 보강설계 후 1.75 MPa로 82% 감소하였으며, 이에 따라 Z축 강성이 275.97 N/μm로 915.8% 증가되었다. 그리고 X축 강성은 229.98 N/μm로 83.1% 증가하였으며 Y축 강성은 285.32 N/μm로 100.4% 증가하여 초기 형상 대비 경량화 및 강성 증가를 이루었음을 확인할 수 있었다.

이러한 위상 최적화 기법을 공작기계 산업에 접목한다면 최종 형상에 많은 부분을 결정하는 개념 설계단계에서 설계자가 고려하지 못한 리브 구조를 도출할 수 있게 하여 설계 방향을 합리적으로 제시할 수 있다. 그러므로 위상 최적화 기법을 효율적으로 활용한다면 적절한 리브 설계를 할 수 있으므로 공작기계의 강성 증가 및 원가절감에 크게 기여할 수 있을 것이라고 사료된다.

후 기

본 연구는 한국산업기술진흥원의 중소벤처기업부가 지원하는 지역특화산업육성사업(S3085315)으로 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] Kim, Y., Park, Y.-D., 2022, Joining Technologies and Solutions for Aluminum-based Battery Case Manufacturing, *Journal of Welding and Joining*, 40:1 54-73, <https://doi.org/10.5781/JWJ>.
- [2] Chung, J., Lee, K., 1996, Optimal Topology Design of Structures and Ribs Using Density Distribution, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, 13:7 66-77.
- [3] Kim, S.-G., Kim, J.-H., Kim, S.-H., Youn, S.-H., 2016, Design Optimization of the Rib Structure of a 5-Axis Multi-functional Machine Tool Considering Static Stiffness, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 25:5 313-320, <https://doi.org/10.7735/ksmte>. 2016.25.5.313.
- [4] Wu, B. C., Young, G. S., Huang, T. Y., 2000, Application of a Two-level Optimization Process to Conceptual Structural Design of a Machine Tool, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 40:6 783-794, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00113-3).
- [5] Li, B., Hong, J., Wang, Z., Wu, W., Chen, Y., 2012, Optimal Design of Machine Tool Bed by Load Bearing Topology Identification with Weight Distribution Criterion, *Procedia CIRP*, 3 626-631, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.107>.
- [6] Moon, D.-J., Cho, J.-H., Choi, Y.-S., Hwang, I.-H., Lee, J.-C., 2016, High-Stiffness Structure Design of 8-Axis Multi-tasking Machine for Automotive Powertrain Shafts, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 15:2 78-83, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.2.078>.
- [7] Kim, S.-I., Lee, W.-J., 2007, Structural Characteristic Analysis of an Ultra-precision Machine for Machining Large-surface Micro-features, *Proc. Korean Soc. Mech. Eng. Spring Conf. 2007*, 1469-1474.
- [8] Park, S. H., Ko, H. B., Kang, H. L., Han, S. H., 2022, Size Optimal Design of an Internal Grinding Machine based on Stiffness Analysis, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 46:5 461-469, <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2022.46.5.461>.
- [9] Park, J.-K., Kim, E.-J., Lee, C.-M., 2021, Structural Optimization of Additive/Subtractive Hybrid Machines, *J. Korean Soc. Manuf. Process Eng.*, 20:2 45-50, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.02.045>.
- [10] Kim, J.-S., Lee, M.-H., Youn, J.-W., 2021, A Study on the Design Optimization of the Head Structure of 5-axis Machining Center using Finite Element Analysis, *Journal of the Korea Convergence Society*, 12:9 161-168, <https://doi.org/10.15207/JKCS.2021.12.9.161>.
- [11] Yun, T., Lee, S., 2018, Topology Optimization Design of Machine Tools Head Frame Structures for the Machining of Aircraft Parts, *Journal of Aerospace System Engineering*, 12:4 2022.40.1.7.

18-25, <https://doi.org/10.20910/JASE.2018.12.4.18>.

- [12] Lee, G., Yoon, J., Yoon, J., Heo, S., Rhie, C., 2016, Hood Inner Panel Minimization Design Using Topology Optimization, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 28:11 765-770, <https://doi.org/10.7467/KSAE.2020.28.11.765>.
- [13] Im, J. M., Kim, J. Y., Shin, K. B., Kim, D. Y., 2018, Lightweight Design of Link Structures for Amphibious Boat using Topology Optimization Method, J. Korean Soc. Precis. Eng., 35:11 1085-1092, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2018.35.11.1085>.
- [14] Cho, Y., Yoon, W., 2020, Optimal Design for Strength Improvement of Support Bracket for Sanding Device of Railway Vehicle Using Topology Optimization, J. Korean Soc. Precis. Eng., 37:4 263-270, <https://doi.org/10.7736/JKSPE.019.114>.
- [15] Tamta, S., Saxena, R., 2016, Topological Optimization of Continuum Structures Using Optimality Criterion in ANSYS, International Research Journal of Engineering and Technology, 3:07 1483-1488.
- [16] Tyflopoulos, E., Steinert, M., 2022, A Comparative Study of the Application of Different Commercial Software for Topology Optimization, Appl. Sci., 12:2 611, <https://doi.org/10.3390/app12020611>.
- [17] Hwang, J.-S., Kim, S.-J., Sung, C.-H., 2022, A Study on the Topology Optimization of Machine Tool Column Rib, Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf. 2022, 239.



Ji-Sang Hwang

Master course in the Department of Mechanical Engineering, Dong-A University. His research interest is Machine Tool Analysis.

E-mail: abiding0107@naver.com



Sung-Jae Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dong-A University. His research interest is Material Strength and Fatigue Failure.

E-mail: sjkim641@dau.ac.kr



Chul-Hoon Sung

Director in the Department of Institute of Technology, Sungsan Amdeco Inc.. His research interest is Electric Vehicle Parts and Machine Tool.

E-mail: chelhoon.sung@amdeco.com