

복합형상 부품 가공용 라인센터의 경량화를 위한 형상 최적화에 관한 연구

박도현*, 정호인*, 김상원**, 이춘만***.#

*창원대학교 메카트로닉스공학부, **덕흥(주), ***창원대학교 기계공학부

Shape Optimization for Lightweight of the Line Center for Processing Complex Shape Parts

Do-Hyun Park*, Ho-In Jeong*, Sang-Won Kim**, Choon-Man Lee***.#

*Mechanical Design and Manufacturing, School of Mechatronics Engineering, Changwon National University

**DUCK HEUNG Co., Ltd

***Dept. of Mechanical Engineering, College of Mechatronics, Changwon National University

(Received 24 June 2021; received in revised form 29 June 2021; accepted 06 July 2021)

ABSTRACT

As interest and demand for high value-added industries, including the global automobile and aerospace industries, have increased recently, demand for line centers with excellent performance that can respond to the production system for producing high value-added products is also rapidly increasing. A line center improves productivity based on the installed area using a multi-spindle compared to a conventional machining center. However, as the number of spindles increases, the weight increases and results in structural problems owing to the heat and vibration generated by each spindle. Therefore, it is necessary to improve machining precision through the structural improvement of the line center. This study presents research on the stabilization design of the line center through structural stability analysis through structural analysis to develop a compact multi-axis line center. An optimization model of the line center has been proposed to improve the processing precision and increase the rigidity by performing weight reduction based on the structural analysis results.

Key Words : Line Center(라인센터), Structural Analysis(구조해석), Shape Optimization(형상 최적화), Topology Optimization(위상 최적화), Light Weight(경량화)

1. 서 론

최근, 세계 자동차 및 항공우주 산업을 포함한 고부가가치 산업에 대한 관심 및 수요 증가로 고부

가가치 제품을 생산하기 위한 생산체계에 대응할 수 있는 우수한 성능을 가지는 라인센터(line center)에 대한 수요가 급증하고 있다. 또한, 인도, 중국, 베트남 등의 신흥국들에서는 고부가가치 제품 생산을 위해 스마트공장 설비에 투자하고 있으며, 특히 컴팩트(compact)하며 우수한 성능을 가지는 라인센터를 수입하여 생산 라인에 핵심 장비로 사용하고

Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

있다⁴⁾.

라인센터는 수평형 머시닝센터의 일종으로 수직 머시닝센터의 단점인 라인 자동화 로봇의 이송반경에 대한 제약을 극복할 수 있으며, 높은 공간 활용도 및 칩(chip) 배출성을 통해 공장 설비에 최적화되어 있다. 이러한 라인센터는 다축의 형태를 주로 사용하여 획기적인 생산성의 향상이 가능하지만, 주축 개수가 증가함에 따라 중량이 증가하고 각 주축에서 발생하는 발열 및 진동 등으로 인해 가공정밀도가 떨어지는 문제가 발생하여 구조적인 개선을 통한 가공정밀도 향상에 대한 연구가 필요하다²⁻⁵⁾.

따라서, 본 연구에서는 콤팩트형 다축 라인센터의 개발을 위하여 구조해석을 통한 구조적 안정성 분석을 통해 라인센터의 안정화 설계에 대한 연구를 수행하였다. 가공정밀도와 같은 주요 가공 결과는 변형에 의해 큰 영향을 받기 때문에 개발 전 구조해석을 통해 기구부의 구조적 특성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 또한, 구조 최적화를 수행하여 라인센터의 경량화와 가공정밀도 향상 및 강성증대를 구현 가능한 설계안을 제안하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델 및 경계조건

Fig. 1은 라인센터의 3D 모델을 나타낸다. 라인센터의 개발 사양을 토대로 각 부품의 물성치를 선정하였으며, 구조물은 GC300 소재를 적용하였고 구성 부품의 소재는 SS400 및 SM45C 소재를 적용하였다. Table 1은 각 재료의 물성치를 나타낸다.

유한요소모델 구축 시 구조 안정성에 영향을 미치지 않는 부품은 간략화하여 해석시간을 감소시켰다. Fig. 2는 라인센터의 유한요소모델을 나타낸다. 유한요소모델은 3,103,717개의 절점 (node)과 1,650,130개의 요소 (element)로 구성되어 있다. 해석을 위한 각각의 경계조건으로 바닥 부분을 고정하고, 공작물의 무게를 고려하여 이송 테이블의 상면에 5,000 N의 하중을 적용하였다. 또한, 자중에 따른 구조 안정성을 분석하기 위해 머시닝센터에 전체에 중력조건을 적용하였다. Fig 3은 유한요소해석을 위한 경계조건을 나타낸다.

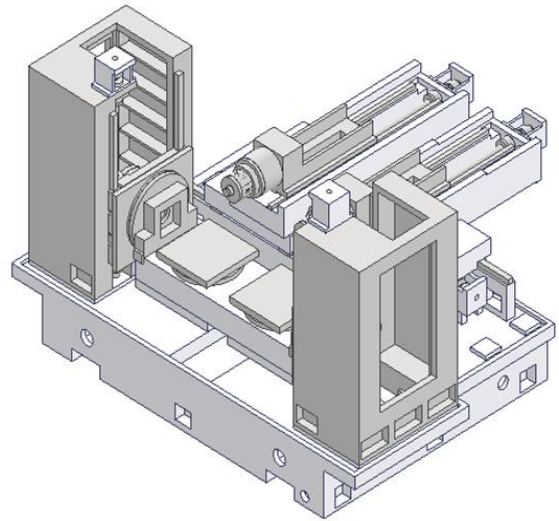


Fig. 1 3D model of the line center

Table 1 Mechanical properties according to material

Material	GC300	SS400	SM45C
Density(kg/m ³)	7,300	7,800	7,850
Young's Modulus(GPa)	125	205	206
Poisson's Ratio	0.3	0.29	0.29
Tensile Yield Strength(MPa)	195	230	530

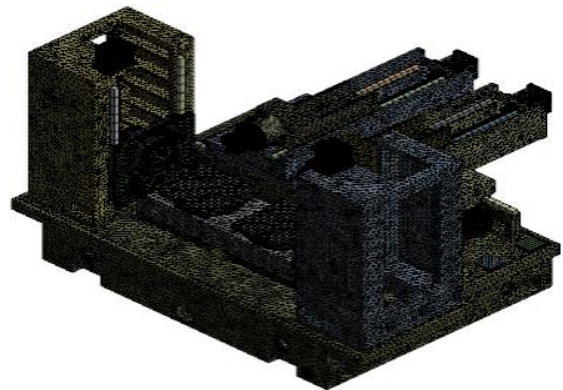


Fig. 2 Mesh of the line center

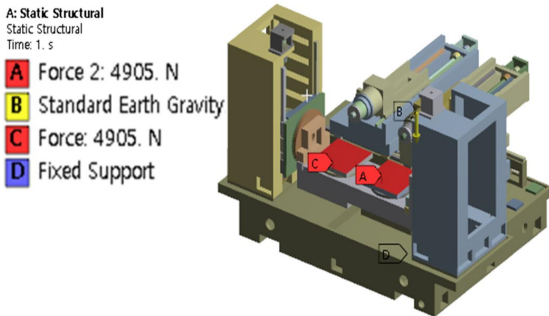


Fig. 3 Boundary conditions for FEM

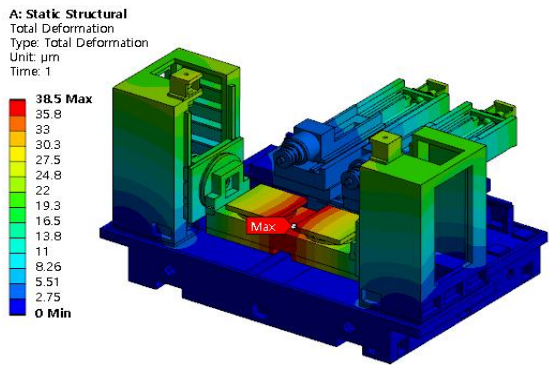


Fig. 4 Deformation distribution of the line center

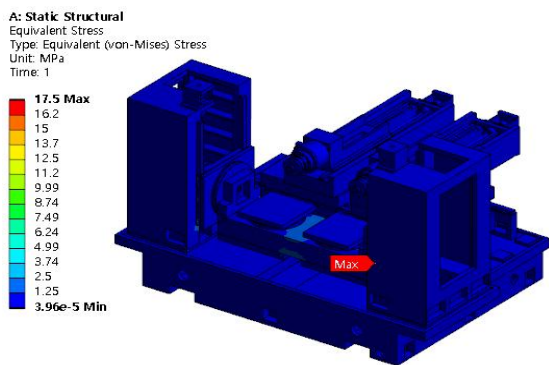


Fig. 5 Stress distribution of the line center

2.2 구조해석 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 라인센터의 구조해석 결과를 변형분포와 응력분포로 나타낸다. 최대 변형은 라인센터의 테이블에서 38.5 μm로 발생하는 것을 확인하였으며, 최대 응력은 테이블을 지지하는

컬럼(column)에서 17.5 MPa로 발생하였다. 라인센터의 구조물의 재료로 사용된 GC300의 항복강도가 195 MPa인 것을 고려하였을 때 라인센터의 안전율은 11.14로 나타났다.

3. 형상 최적화

3.1 라인센터 베드의 형상수정

라인센터의 설치면적 감소 및 공간 활용성을 향상 위해 핵심기구부인 베드의 설치면적을 축소시켰으며, 축소된 베드에 따라 베드 상면에 위치한 컬럼의 폭을 감소시켜 형상을 개선하였다. 베드의 폭은 기존 3,300 mm에서 2,860 mm로 감소하였으며, 컬럼의 폭은 기존 633 mm에서 395 mm로 감소하였다. 베드의 설치면적은 베드 폭 감소에 따라 7,144,500 mm² 에서 6,191,900 mm² 으로 952,600 mm² 감소하였으며, 라인센터의 설치면적 축소율은 13.33%로 나타났다. Fig. 6은 라인센터의 베드 설치면적 감소에 따른 구조 변경에 대한 개념도를 나타내며, Fig. 7은 라인센터의 베드 설치면적 변경 모델의 3D 모델을 나타낸다.

3.2 라인센터 컬럼의 형상수정

베드 설치면적 감소를 위해 베드의 설계가 수정됨에 따라 컬럼의 폭도 수정되었으며, 수정된 형상을 최적화하기 위해 컬럼을 대상으로 위상최적화를 수행하였다. 컬럼의 위상최적화는 변형량 저감과 동시에 경량화를 목적으로 수행하였으며, 목적함수는 컬럼의 변형량으로 설정하였다. 위상최적화는 컬럼의 무게를 50% 경량화하도록 수행하였으며, Fig. 8은 컬럼의 위상최적화 결과를 나타낸다⁷⁾.

3.3 라인센터 컬럼의 형상최적화

컬럼의 위상최적화 모델을 실제 환경에서 가공하기 위해 형상을 변형시켰으며, 구조물 안정성 향상 및 경량화를 위해 컬럼의 작업홀을 형성하였다. 작업홀의 치수(D)를 변수로 설정하여 작업홀의 크기를 일정 비율로 줄여가며 해석을 진행하였다. 컬럼의 작업홀 크기가 증가에 따라 컬럼의 무게는 감소하나 최대 변형이 소폭 증가한다.

작업홀은 컬럼의 폭 및 위상최적화 결과에 따라

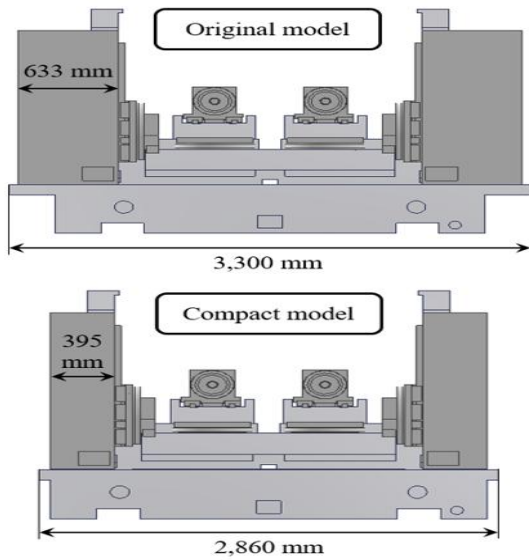


Fig. 6 Conceptual diagram of the bed installation area of the line center

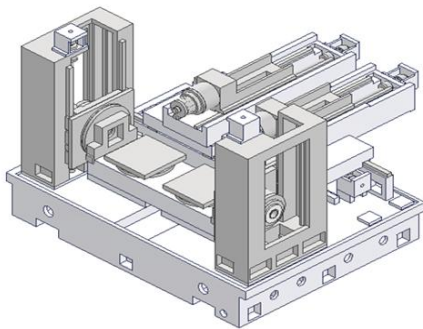


Fig. 7 3D model of the line center on decrease bed width

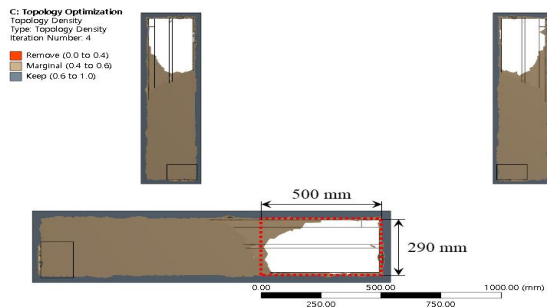


Fig. 8 Shape optimization result of the column

작업홀이 3 ~ 5 개일 때 3가지 케이스로 나누어 해석을 수행하였다. 작업홀이 3개일 때는 작업홀의 직경과 컬럼의 폭의 상관관계에 따라 직경이 $125 < D \leq 135$ 로 형성되었으며, 4개일 때는 $100 < D \leq 125$, 5개일 때는 $83 < D \leq 100$ 로 형성되었다. Fig. 9는 작업홀의 크기에 따른 케이스의 개념도를 나타낸다.

컬럼의 형상최적화에서는 컬럼의 경량화에 초점을 맞췄기 때문에 제거영역 대비 작업홀의 면적이 50% 미만인 조건은 해석에 포함시키지 않았다. 면적비를 고려한 케이스별 직경은 작업홀이 3개일 때 $126 \leq D \leq 135$ 로 형성되었으며, 4개일 때는 $104 \leq D \leq 125$, 5개일 때는 $93 \leq D \leq 100$ 로 형성되었다. 작업홀이 6 개 이상일 때부터는 면적비가 모든 경우에서 50% 미만으로 나타났다. Fig. 10은 작업홀의 면적비에 대한 개념도를 나타낸다.

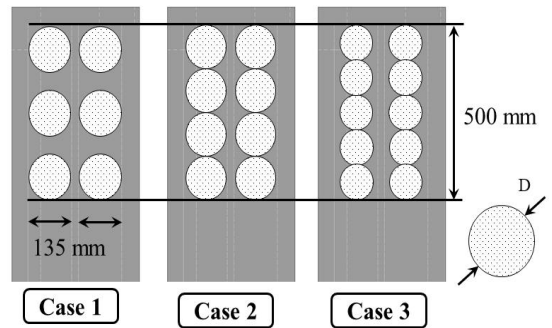


Fig. 9 Conceptual diagram of the case according to the size of the working hole

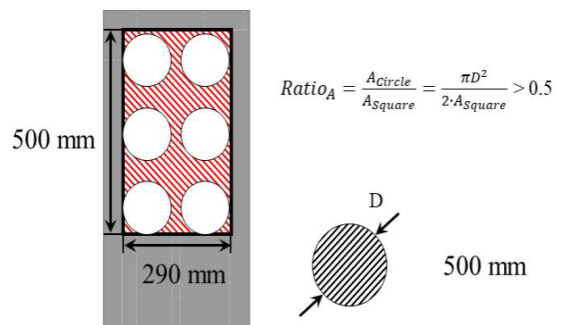


Fig. 10 Conceptual diagram of area ratio of working hole

3.4 라인센터 컬럼의 형상최적화 결과

컬럼의 형상 최적화를 위하여 무게와 변위를 목적함수로 설정하였으며, 최적화는 두 목적함수가 최소값을 가지도록 설정하여 진행하였다. 응력은 모든 케이스에서 낮은 값을 나타내어 목적함수에서 제외하였다. 본 연구에서는 형상 최적화를 위하여 상용 해석 프로그램인 ANSYS Workbench 2020 R1을 이용하였으며, 반응표면법을 통해 메타모델(Meta model)을 만들어 조건에 맞는 최적값을 구하였다. Fig. 11은 형상 최적화가 진행된 과정을 나타낸다 [8~10].

형상 최적화를 진행한 결과, 최적해는 작업홀의 직경이 126mm 일때로 나타났다. Fig. 12는 초기

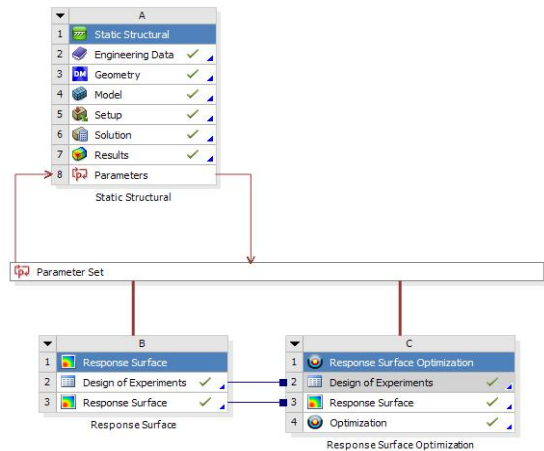


Fig. 11 Process of optimization using the ANSYS

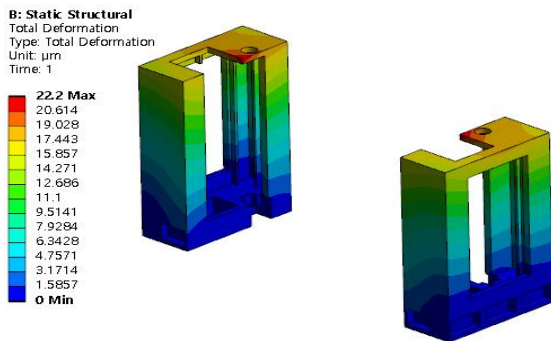


Fig. 12 Deformation distribution of the original column

컬럼의 최대 변형을 나타내며, Fig. 13은 형상최적화 된 컬럼의 최대 변형을 나타낸다. 형상 최적화가 진행된 컬럼의 무게는 1928.9 kg으로 기존 컬럼의 무게 1972.7kg보다 2.27% 감소하였으며, 최대 변형은 22.2 μm으로 기존의 최대 변형인 22.8 μm보다 약 0.6 μm 증가하였다. Fig. 14는 형상최적화가 수행된 라인센터의 3D 모델을 나타낸다.

4. 형상 최적화 모델의 검증

4.1 형상 최적화 모델

라인센터의 설치면적 감소 및 경량화를 위해 라인센터의 베드와 컬럼을 대상으로 형상 최적화 수행결과, 라인센터의 설치면적은 약 13.33% 감소하

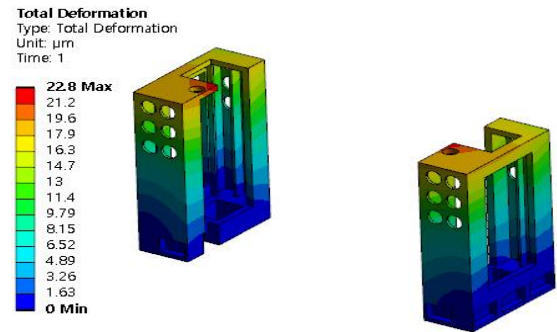


Fig. 13 Deformation distribution of the optimization column

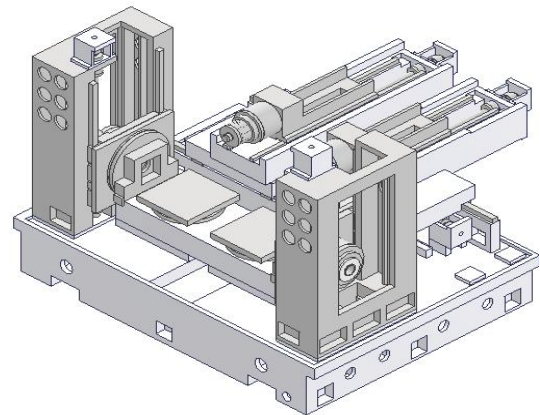


Fig. 14 Optimization model of the line center

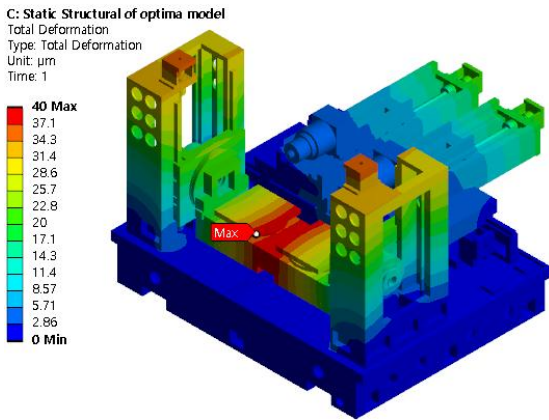


Fig. 15 Deformation distribution in the optimization model of line center

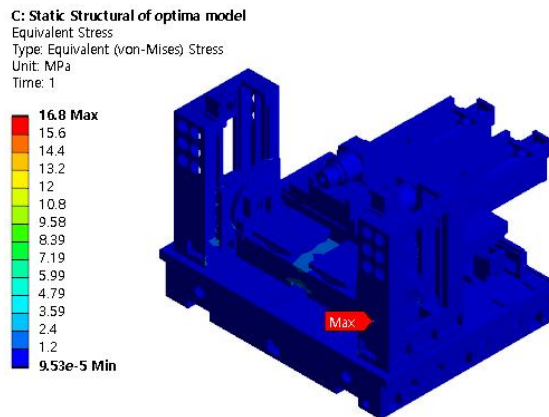


Fig. 16 Stress distribution in the optimization model of the line center

였다. 또한, 라인센터의 중량은 17,438kg에서 16,326kg으로 약 1,112kg의 중량 감소를 이루었으며, 라인센터의 형상최적화 모델은 약 6.37%의 중량감소를 나타냈다.

4.2 형상 최적화 모델의 구조해석 결과

라인센터의 형상최적화 결과에 대한 구조적 안정성을 분석하기 위해 구조해석을 수행하였으며, 해석 모델의 형성부터 경계조건 설정까지의 과정은 초기 구조해석과 동일하게 수행하였다.

Fig. 15와 Fig. 16에 라인센터 최적화 모델의 구

조해석 결과를 변형과 응력분포로 각각 나타내었다. 최대 변형은 라인센터의 테이블에서 40 µm로 발생하는 것을 확인하였으며, 최대 응력은 테이블을 지지하는 컬럼에서 16.8 MPa로 발생하였다. 라인센터의 구조물의 재료로 사용된 GC300의 항복강도가 195 MPa인 것을 고려하였을 때 라인센터의 안전율은 11.61로 나타난다.

형상최적화 결과, 라인센터의 최대 변형은 38.5 µm에서 40 µm로 약 1.5 µm 증가하였으며, 최대 응력은 17.5 MPa에서 16.8 MPa로 약 0.7 MPa 감소하였다. 또한, 형상최적화를 통한 강성증대로 안전율은 11.14에서 11.61로 약 0.47 증가하여 라인센터는 구조적으로 안정하다 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 라인센터의 개발에 앞서 구조 안정성 검증을 위한 구조해석을 수행하였으며, 안정성 향상 및 경량화를 위해 베드의 형상수정 및 컬럼의 위상최적화를 통한 형상최적화를 수행하였다.

형상최적화를 통해 경량화, 및 강성증대를 이루었으며, 구조적 안정성을 개선한 최적 모델을 제시하였다. 최종적으로 검증 해석을 통해 최적화 모델의 구조 안정성을 검증하였다. 본 연구에서 수행한 각각의 내용은 다음에 제시한 바와 같다.

- (1) 라인센터의 구조해석을 수행하였으며, 라인센터의 경량화 및 구조개선을 위해 라인센터의 베드 형상수정 및 위상최적화를 적용하여 컬럼의 형상최적화를 수행하였다.
- (2) 위상최적화를 통한 컬럼의 최적화 모델을 제시하였으며, 형상최적화를 통해 기존 라인센터의 중량 17,438 kg에서 16,326 kg으로 1,112 kg의 중량 감소를 이룬 최적화 모델을 제시하였다.
- (3) 최적화 모델의 구조적 안정성 검증을 위해 구조해석을 수행하였으며, 구조해석결과 최적화 모델은 기존 라인센터 대비 약 3.75% 증가한 최대 변형을 나타냈으나, 최대 변형량이

40.0 μm 로 낮은 값을 나타냈다. 또한, 강성증대를 통해 안전율이 0.47 증가하여 11.61의 높은 안전율을 나타내, 최적화 모델은 구조적으로 안정함을 검증하였다.

본 연구의 결과는 개발하고자 하는 라인센터 안정성 향상과 경량화 설계 및 개발에 적용될 것이다.

후 기

“본 연구는 산업통산자원부의 산업기술혁신사업의 지원으로 수행하였음 (“복합형상 부품 가공용 IoT/AI 스마트 상태 진단/보정 및 듀얼헤드 적용 컴팩트화 지수 15% 이상 라인센터 개발”, No. 20003806).”

REFERENCES

1. Lee, C. M. and Jeong, H. I., "An Analytical Study on the Thermal-Structure Stability Evaluation of Mill-Turn Spindle with Curvic Coupling," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 1, pp. 100-107, 2020.
2. Cheong, S. H., Choi, S. D., Kweon, H. K., Choi, U. D. and Shon, J. Y., "Structural Design for Performance Improvement of Line Center," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 2, No. 3, pp. 76-83, 2003.
3. Wang, J. and Tang, X., "Analysis and dimensional design of a novel hybrid machine tool," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, pp. 647-655, 2003.
4. Kim, D. H. and Lee, C. M., "A Study on the Thermal Stabilization Design of a New Concept Compact Machining Center," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 12, pp. 119-124, 2010.
5. Maeng, H. Y., Park, J. W. and Park, H. K., "Design of Special-purpose Machine Tool Based on a Multi-spindle Head," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No. 6, pp. 675-681, 2015.
6. Yoo, D. S., "A Study on Optimization for Static Characteristics Analysis of Gantry-Type Machining Centers," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 122-128, 2015.
7. Park J. K., Kim, E. J. and Lee, C. M., "Structural Optimization of Additive/Subtractive Hybrid Machines," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 45-50, 2021.
8. Jeong, W. Y., Jeong, H. I. and Lee, C. M., "Shape Optimization for Lightweight of the Metal 3D Printing Based Hybrid Machining Center," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 80-85, 2021.
9. Lee, C. M., Jeong, H. I., Kim, E. J. and Shin, S. W., "A Study on the Shape Optimization and Structural Analysis of Turret Center for Powder Metallurgy Material Machining before Sintering," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 36, No. 2, pp. 127-134, 2019.
10. Lee, C. M., Ha, J. H., Woo, W. S. and Kim, E. J., "A Study on the Shape Optimization and Structural Analysis of the Suction Chamber for an ECO Vacuum Filter System," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 33, No. 12, pp. 971-977, 2016.