

3D적층/절삭 하이브리드가공기의 구조최적화에 관한 연구

박준구*, 김은중**, 이춘만***,#

*창원대학교 스마트제조융합협동, **창원대학교 기계설계공학과, ***창원대학교 기계공학부

Structural Optimization of Additive/Subtractive Hybrid Machines

Joon-Koo Park*, Eun-Jung Kim**, Choon-Man Lee***,#

*School of Smart Engineering, Changwon UNIV.,

**School of Mechanical design Engineering, Changwon UNIV.,

***School of Mechanical Engineering, Changwon UNIV.

(Received 12 August 2020; received in revised form 17 October 2020; accepted 23 October 2020)

ABSTRACT

In the recent fourth industrial revolution, the demand for additive processes has emerged rapidly in many mechanical industries, including the aircraft and automobile industries. Additive processes, in contrast to subtractive processes, can be used to produce complex-shaped products, such as three-dimensional cooling systems and aircraft parts that are difficult to produce using conventional production technologies. However, the limitations of additive processes include nonuniform surface quality, which necessitates the use of post-processing techniques such as subtractive methods and grinding. This has led to the need for hybrid machines that combine additive and subtractive processes. A hybrid machine uses additional additive and subtractive modules, so product deformation, for instance, deflection, is likely to occur. Therefore, structural analysis and design optimization of hybrid machines are essential because these defects cause multiple problems, such as reduced workpiece precision during processing. In this study, structural analysis was conducted before the development of an additive/subtractive hybrid processing machine. In addition, structural optimization was performed to improve the stability of the hybrid machine.

Key Words : Hybrid Machine(하이브리드 가공기), Structural Analysis(구조해석), Design Optimization(최적화 설계)

1. 서 론

최근 공작기계 산업에서는 4차 산업 혁명으로 인해 항공/우주 및 자동차 산업 등 복잡한 형상을 가진 제품에 대한 요구가 증가함에 따라 적층

(Additive manufacturing, AM과 절삭(Subtractive manufacturing, SM) 공정 및 기타 공정이 결합된 하이브리드 가공 장비의 개발이 이루어지고 있다^[1].

Son^[2] 등은 하이브리드 5축 모션 플랫폼을 설계 하였고, Choi^[3] 등은 하이브리드 수직 연삭 시스템 개발을 위해 유한요소 해석을 이용한 구조 해석과 진동 해석을 수행하였다. Wang^[4] 등은 3 자유도 병렬 조작기를 기반으로 한 4 자유도 하이브리드

Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

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

공작기구를 설계하였으며, Lee^[5] 등은 유한요소해석 시뮬레이션을 통해 직접 구동 모터를 이용한 텀팅 인덱스 테이블을 개발하였다.

적층 공정은 종래의 가공 방법과 달리 복잡한 형상이나 난삭재 가공에 강력한 방법이다. 하지만 적층공정을 수행한 직후에는 공작물의 표면 거칠기 및 표면 조도가 좋지 못하기 때문에 가압공정이나 절삭공정 등 표면 개질이 필수적이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 적층 공정과 절삭 공정을 동시에 수행할 수 있는 금속 분말 3D 적층 기반 하이브리드 공작기계를 제작하였다. 이로써 기존 절삭 가공 공정의 단점이었던 형상 자유도의 한계를 극복할 수 있고, 소재 낭비율을 절감할 수 있음과 동시에 적층 공정에 필수적인 표면 개질 또한 수행할 수 있다. 또한 스피ndl의 움직임을 제어하는 Z축 이송부와 별개로, 적층 모듈의 움직임만을 제어할 수 있는 Z'축 이송부를 추가로 부착하여 스피ndl과 적층 모듈간의 독립적인 움직임을 가능케 하였다.

하지만 적층 절삭 하이브리드 가공기는 기존 절삭 가공기에 적층을 위한 레이저 열원, 적층 헤드와 같은 장비를 부착하여 사용하기 때문에 추가적으로 가해지는 하중에 대한 안정성 평가는 필수적이다.

본 연구에서는 적층/절삭 하이브리드(Additive/subtractive hybrid machine) 공작기계의 구조 안정성 분석을 위해 구조해석을 수행하였고, Z'축 이송부의 독립적인 거동을 위한 C-형 지지부의 구조 안정화를 위하여 수치 최적화를 수행하였다.

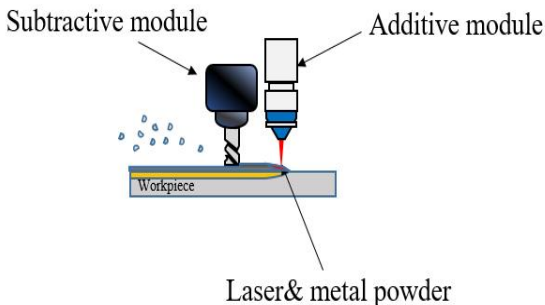
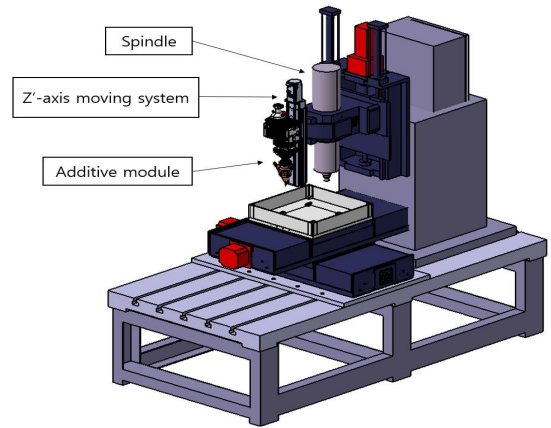
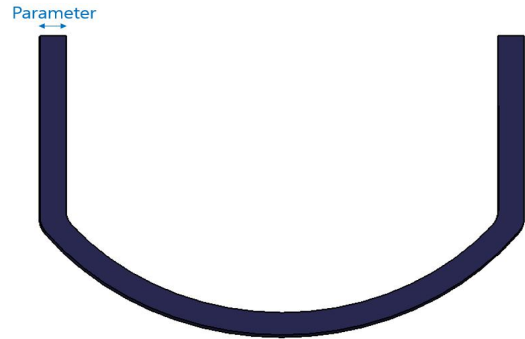


Fig. 1 Sketmatic diagram of additive/subtractive hybrid machine



(a) 3D model of additive/subtractive hybrid machine



(b) C-support of additive/subtractive hybrid machine

Fig. 2 Structure of additive/subtractive hybrid machine

2. 적층/절삭 하이브리드 가공기 구조

본 연구에서 제안된 적층/절삭 하이브리드 가공기는 베드와 바디, 절삭가공을 위한 스피ndl을 부착한 기존 절삭가공기에 추가로 Z'축 이송계와 적층 헤드를 부착하여 적층 공정과 동시에 절삭 공정을 수행할 수 있게 설계되었다. 스피ndl 지지부에 X축 이송계와 Z'축 이송계를 부착하여 스피ndl을 움직이지 않아도 적층 모듈을 X축, Z축 방향으로 움직일 수 있게 하였다. X축 이송계와 Z'축 이송계는 C-형 지지부에 부착되어 적층헤드를 이송하는 역할을 수행한다. C-형 지지부는 X축 이송계를 부착하여 적층 헤드의 거동을 돕는다. 또한 테이블은 X축과 Y축으로 이동하며 공작물을 이송할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 적층/절삭 가공기

의 개념도를 나타낸다. Fig. 2는 적층/절삭 가공기의 3D 모델과 C-형 지지부를 나타낸다.

2.1 유한요소모델

적층 모듈이 결합된 적층 절삭 하이브리드 가공기는 기존 절삭가공기 대비 적층 모듈 및 Z축 이송부가 부착되어 가공부에서 추가적인 하중을 받게 된다. 이는 자중에 의한 처짐이나 파손을 야기할 수 있으며, 처짐이나 파손이 발생할 시 적층 및 절삭 작업의 정확도와 표면 개질에 치명적인 결함을 발생시킬 수 있다. 따라서 유한요소해석을 통해 적층/절삭 가공기의 정적 안정성을 평가하기 위한 구조해석을 수행하였다. 해석하기에 앞서 구조해석의 오차 및 해석 시간 단축을 위하여 Fig. 3과 같이 실제 모델을 단순화하여 구조해석을 진행하였다.

적층 절삭가공기의 주요 구조물 중 X축 이송계 및 Z축 이송계, 적층모듈을 구조해석의 오차 및 해석 시간 단축을 위하여 단순화 하였다. 적층 절삭 가공기를 구성하는 부품 중 베드와 지지부, Z축 이송계에는 SM45C를 사용하였고, 스핀들 지지부와 C-형 지지부, 적층 모듈 및 Z'축 이송계에는 FC300을 사용하였다. 스핀들을 구성하는 소재는 SS400을 사용하였다. 하단 6개의 지지부에 하단 지지부(Fixed support) 조건을 적용하였고, 구조물 전체에 대하여 중력조건(Standard Earth gravity)을 적용하였다. 격자구조(Mesh)는 스위프 메쉬(Sweep method)와 헥사 메쉬(Hex dominant method)를 사용하였고, 기본 메쉬크기(default size)는 50 mm로 설정하였으며 크기가 작은 구조물에는 메쉬 크기(mesh size) 10 mm를 적용하였다. 구조해석은 상용 프로그램 ANSYS Workbench를 사용하여 수행

Table 1 Material of hybrid machine

Material	SM45C	SS400	FC300
Density (kg/m ³)	7,870	7,850	7,250
Modulus of Elasticity(GPa)	207	200	122.5
Poisson's ratio	0.29	0.3	0.25

하였으며 사용된 유한요소 모델은 104,298 개의 요소(Elements)와 511,499 개의 절점(Nodes)으로 구성되어 있다. Table. 1은 적층/절삭 가공기에 사용된 소재의 물성치를 나타낸다.^[6-9]

2.2 구조해석 결과

3D 적층 절삭 하이브리드 가공기에 대한 구조해석은 제안된 공작기계의 X축 이송계와 Z축 이송계의 안정성을 평가하기 위하여 최대 처짐이 발생할 것으로 예상되는 Z'축 이송계와 주변 장치를 중심으로 진행하였다. 구조해석 결과, 최대 응력은 C-형 지지부와 스핀들 지지부의 연결점에서 31.7 MPa로 나타났고, 최대 변형은 Z'축 이송계 끝단에서 0.087 mm로 나타났다. Fig. 4 (a)는 적층/절삭 하이브리드 가공기의 최대 응력을 나타낸다. Fig. 4 (b)는 적층/절삭 하이브리드 가공기의 최대 변형을 나타낸다.

3. C형 지지부(C-support) 수치 최적화

본 연구에서 제안된 적층 절삭 하이브리드 가공기는 적층과 동시에 절삭공정을 수행하는 장치로, 기존 스핀들만 부착하여 사용하였던 절삭 가공기와 달리 적층을 위한 적층 모듈 및 부가장치를 추가로 부착하여 사용하기 때문에 기존 절삭 가공기

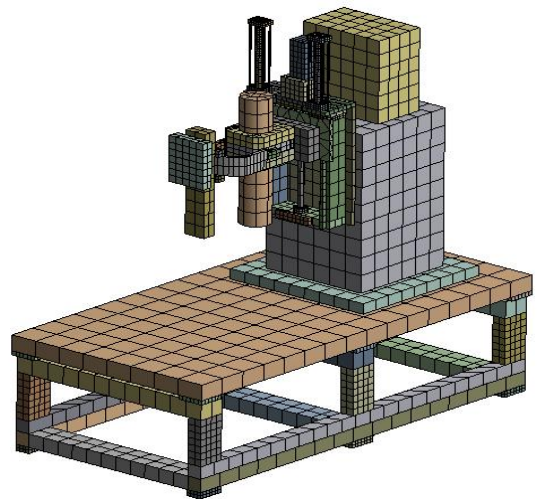


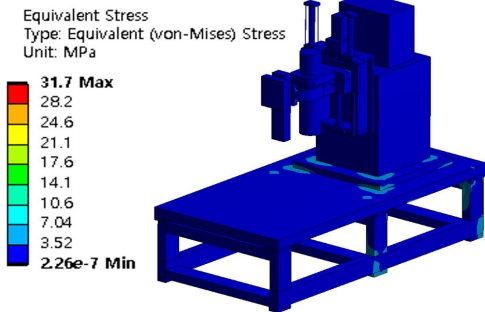
Fig. 3 FEM model of hybrid machine

보다 가공부에서 더 많은 하중을 받게 된다. 따라서 적층 절삭 하이브리드 가공기 구조물 전체의 안정성 증대를 위하여 C자형 지지부의 최적 두께를 산출하기 위하여 치수 최적화를 진행하였다.^[10-14]

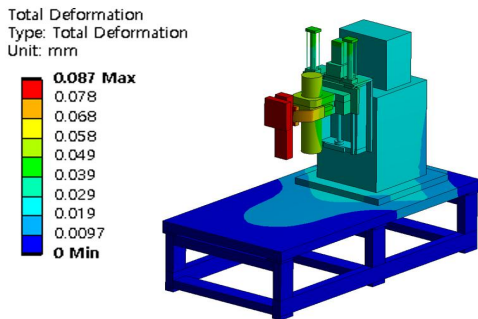
3.1 설계 변수 및 제한 조건

C-형 지지부는 스펀들 앞에 부착되어 Z'축 이송계의 X축 방향으로의 독립적인 거동을 담당하는 장치로서, 파손이 일어나거나 처짐이 발생할 때는 공작물 가공의 정밀도가 떨어지고, 장치의 역할을 수행할 수 없기 때문에 최대 처짐은 X축으로의 최대 이송 변위가 29 mm 인 것을 고려하여 캔틸레버 보의 처짐 한계식(식 1)에 따라 0.116 mm를 초과하지 않도록 하였다. 이송 변위(span)는 X축으로의 최대 이송 변위이다.

$$\text{Cantilever limit deformation} = \frac{\text{span}}{250} \quad (1)$$



(a) Equivalent stress



(b) Total deformation

Fig. 4 Analysis result of C-support

3.1.1 C-형 지지부 최적 두께 범위 설정

C-형 지지부의 최적화 설계는 상용 프로그램 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 적층 절삭 하이브리드 가공기의 구조 안정화를 위해 최대 변형이 나타난 부분인 적층모듈 이송을 위한 Z'축 이송계가 부착된 C-형 지지부의 두께를 설계 변수로 설정하여 초기 두께 20.5 mm에서 1 mm 씩 두께를 줄여가면서 구조해석을 진행하였다. Fig. 5에 해석 대상인 C-형 지지부를 나타내었다. 해석 결과를 Table. 2 에 나타내었다. Table. 2는 두께 감소에 따른 C-형 지지부의 최대 응력 및 최대 변형을 나타낸다. 두께 감소에 따른 최대 응력은 C-형 지지

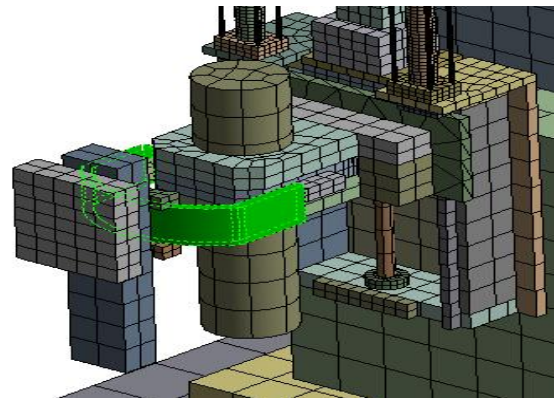


Fig. 5 C-support of additive/subtractive machine

Table 2 Analysis result of C-support

Thickness (mm)	Stress (MPa)	Deformation (mm)
20.5	31.7	0.087
19.5	25.6	0.086
18.5	25.7	0.089
17.5	27.3	0.088
16.5	25.4	0.089
15.5	23.3	0.091
14.5	24.2	0.094
13.5	24.4	0.097
12.5	32.5	0.105
11.5	30.9	0.139

부의 두께가 얇아질수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 최대 처짐은 두께가 감소할 수록 증가하는 것으로 나타났다. 해석 결과, 최대 응력은 12.5 mm에서 32.4 MPa로 나타났고, 최대 변형은 11.5 mm에서 제한조건 0.116 mm보다 높은 수치인 0.14 mm로 나타났다. C-형 지지부의 두께가 감소할수록 최대 응력은 감소하다가 임계점에 도달하면 두께를 얇게 할수록 다시 증가하고 있다. 이는 두께가 감소할수록 가해지는 하중도 감소하여 걸리는 응력이 감소하지만, 임계점에 도달하면 걸리는 하중에 비해 두께가 너무 얇기 때문인 것으로 판단된다. 또한 두께가 감소할수록 최대 변형은 증가하게 되고, 임계점을 넘게 되면 처짐량이 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 C-형 지지부의 최적 두께 수치는 11.5 mm 이상이어야 함을 유추할 수 있다.

3.1.2 C-형 지지부 최적 두께 선정

C-형 지지부의 두께 11.5 mm에서 제한조건보다 높은 수치의 변형량이 나타났고, 두께가 감소할수록 처짐량이 커지는 것을 확인하였다. 12.5 mm 부터 16.5 mm까지의 범위에서 변형량 제한조건 0.116 mm를 넘지 않았기 때문에, C-형 지지부의 최적 두께는 가해지는 최대 응력이 가장 작은 15.5 mm임을 확인하였다. 이 경우 C-형 지지부의 구조 안전율은 C-형 지지부를 구성하는 소재인 FC300의 항복강도(Yield strength)가 195 MPa인 것을 고려하였을 때, 8.4로 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 가공기 설계를 위한 하이브리드 가공 공정의 구조안정성을 확인하기 위하여 구조해석을 실시하였으며, 적층 헤드의 X 축 방향 이송을 담당하는 C-형 지지부의 수치 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 두 개의 Z축 이송계로 구성되는 가공부를 가진 적층/절삭 하이브리드 가공기 조립품 전체에

대한 구조해석 결과, 모든 구조물에서 제한 조건인 최대변형 0.116 mm를 초과하지 않는 것으로 나타나 구조물 전체에 대한 구조안정성을 검증하였다.

2. 적층 절삭 가공기의 C-형 지지부 수치 최적화를 위한 구조해석 결과, C-형 지지부의 두께가 얇아질수록 가해지는 응력은 임계점을 지나기 전에 감소하는 것을 확인하였다. C-형 지지부의 두께가 임계점을 지나면 최대 응력은 증가하는 것을 확인하였다.
3. C-형 지지부의 두께 감소에 따른 최대 변형의 변화는 두께가 감소할수록 증가하는 것을 확인하였다. 또한 두께 감소가 임계점을 지나게 되면 변형이 급격하게 증가하는 것을 확인하였다.
4. C-형 지지부의 수치 최적화에서 최적 두께는 제한 범위 내에서 최대 응력이 가장 낮은 15.5 mm임을 검증하였다. 이 경우 중량은 18.74kg를 감소시킬 수 있다. C형 지지부의 안전율은 8.4 이고, 최대 응력 및 최대 변형은 제한 조건보다 낮은 수치로 최적화 설계의 구조 안정성을 검증하였다.

후 기

“이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(No. 2019R1A2B5B0307020612.)

REFERENCES

1. Kim, Y. S., Choi, S. W. and Yang, S. W., “Investigation to Metal 3D Printing Additive Manufacturing (AM) Process Simulation Technology”, Journal of Drive and Control, Vol. 16, No. 3, pp. 42-50, 2019.
2. Son, S. K., Kim, T. J., Sarma, S. E. and Slocum, A., “A hybrid 5-axis CNC milling machine”, Precision Engineering, Vol. 33, No. 4, pp. 430-446, 2009.
3. Choi, S. K., Kim, S. H., Choi, W. K., Lee, E.

- S., Choi, J. H., Lee, S. J. and Kim, K. D., "The Development of Hybrid Vertical Grinding System", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 11, pp. 1139-1145, 2013.
4. Wang, J. and Tang, X., "Analysis and dimensional design of a novel hybrid machine tool", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 7, pp. 467-655, 2003.
 5. Lee, C. M. and Oh, W. J., "A Study on the Structure Analysis of Riveting Process for Aircraft Frame Manufacturing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 97-104, 2020.
 6. Chin, D., "Structural Analysis of Cold Drawn Bar Packaging Automation System", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 63-68, 2020.
 7. Lee, J. S., "Structural Analysis of High Pressure Cleaning Machine", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 10, pp. 4694-4699, 2013.
 8. Kang, D. S., Jung, E. I., Kim, K. H., Baek, I. C. and Yi, C. S., "Structural Analysis of a Carriage Shuttle System : A Material Supply Device for Small-Scale Machine Tools", Journal of The Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 4, pp. 62-68, 2019.
 9. Moon, D. J., Cho, J. H., Choi, Y. S., Hwang, I. H. and 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.
 10. Zhong, G., Liu, P., Mei, X., Wang, Y., Xu, F. and Yang, S., "Design optimization approach of a large-scale moving framework for a large 5-axis machining center", Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, 2018.
 11. Oh, H. I., Kwon, S. W., Park, W. S. and Hong, S. W., "Study on the Dynamic Characteristics and Fatigue Life of a Spindle-Bearing System for Large Machine Tools", Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 27, No. 6, pp. 591-599, 2018.
 12. Kim, S. G., Kim, J. H., Kim, S. H. and Youn, J. W., "Design Optimization of the Rib Structure of a 5-Axis Multi-functional Machine Tool Considering Static Stiffness", Journal of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 313-320, 2016.
 13. Yun, T. W. and Lee, S. S., "Topology Optimization Design of Machine Tools Head Frame Structures for the Machining of Aircraft Parts", Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 18-25, 2018.
 14. Han, H. W. and Han, S. H., "Optimal Shape Design of Supported Structure for Inner Race Track Grinding Machine", J. of ransactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 44, No. 3, pp. 221-227, 2020.