

## 플래너 밀러 스피들의 재제조를 위한 최적설계 개선안에 관한 연구

### A Study on the Improvement of Optimal Design for the Re-Manufacturing of Planner Miller Spindle

이현준<sup>1</sup>, 김진우<sup>2</sup>, 김현수<sup>3</sup>, 이성원<sup>4</sup>, 공석환<sup>5</sup>, 정원지<sup>6\*</sup>

Hyun-Jun Lee<sup>1</sup>, Jin-Woo Kim<sup>2</sup>, Hyun-Su Kim<sup>3</sup>,  
Seong-Won Lee<sup>4</sup>, Seok-Whan Gong<sup>5</sup>, Won-Ji Chung<sup>6\*</sup>

#### 〈Abstract〉

The depletion of resources and waste disposal caused by the continuous development of industry have emphasized the need to reduce consumption and production, recycle and reuse, and the importance of remanufacturing has increased in recent years. The spindle part of the aging planner miller, which is currently being remanufactured, is one of the factors that has the greatest impact on the performance of the machine tool. When designing the spindle part of the spindle shaft, there are considerations such as the configuration size bearing performance of the main shaft, but the diameter of the main shaft, the dangerous speed bearing, and the arrangement that affect the machining accuracy should be basically considered. As such, various studies have been conducted on the design of machine tool spindle spindles, but research on the reverse engineering of existing aging machine tool spindle spindles is poor. Reverse engineering is designing in the direction of improving performance by extracting specifications from already finished products, and first scanning the reverse engineered object through a 3D scanner, 3D modeling

1 창원대학교 대학원 기계설계공학과 석사과정

2 창원대학교 대학원 기계설계공학과 석사과정

3 창원대학교 기계공학부 학사과정

4 경남테크노파크 기계소재부품센터

5 창원대학교 메카트로닉스 연구원

6\* 창원대학교 기계공학부 교수

E-mail: wjchung@changwon.ac.kr

1 Dept. of Mechanical Design Engineering, Graduate School of  
Changwon National University

2 Dept. of Mechanical Design Engineering, Graduate School of  
Changwon National University

3 Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University Bachelor

4 Dept. of Machinery Materials and Parts Center, Gyeongnam Technopark

5 Dept. Mechatronics Research Institute, Changwon National University

6\* Dept. of Mechanical Engineering, Changwon National University Professor

is performed based on the collected data, and then the process of deriving improvement plans by reverberating to improve performance by identifying wear and damage conditions is followed. Therefore, in this study, the purpose of this study is to provide data on reverse engineering by deriving improvement plans through optimal design for the bearing position of the aging planar Miller spindle spindle using central composite programming.

*Keywords : Planner Miller, Spindle, Re-Manufacturing, Central Composite Design Optimal Design*

### 1. 서론

공작기계는 대형구조물이 사용되므로 재제조(Remanufacturing) 효과를 크게 얻을 수 있는 장비이며 중, 대형 공작기계의 대부분을 차지한다. 그 중 플래너 밀러(Planner miller)는 크기가 매우 커 수십 톤에 이르기까지 재제조(Remanufacturing)를 통한 자원 및 에너지 저감 효과가 매우 높다. 플래너 밀러(Planner miller)는 스피들(Spindle)을 사용하여 공구를 회전시켜 가공물을 절삭 가공하지만 지속적인 가공에 따른 베어링과 공구 안내면의 불균일한 마모가 발생하고 그로 인해 가공정밀도가 떨어진다. 그리고 스피들(Spindle)과 같이 일부 기능이 저하되거나 노후화된 부품들은 교환 및 폐기 처리가 된다. 최근에는 부품들의 재활용 및 재사용 등의 필요성이 강조되고 있다[1].

스피들 회전에 따른 스피들 모터와 베어링의 발열특성을 예측할 필요가 있다. 공작기계용 스피들 모터는 구동 시 발생하는 전기적인 손실이 대부분 열로 환원되어 모터 내부의 온도가 상승하므로, 냉각자켓을 설계하여 온도 상승을 막는다. 따라서, 모터와 베어링의 발열량과 냉각자켓의 냉각특성을 함께 고려하여 스피들의 회전속도에 따른 시스템의 열 변형량을 해석해야 한다 [2-4].

본 연구에서는 역설계 과정을 Fig. 1과 같이 블록화하여 나타내었다. 플래너 밀러 스피들의 공진위험성과 발열 특성을 통해 상태분석을 진행하였고 실험계획법을 통해 설계 최적값을 도출하여 성능개선 프로세스 데이터 축적을 목적으로 한다.

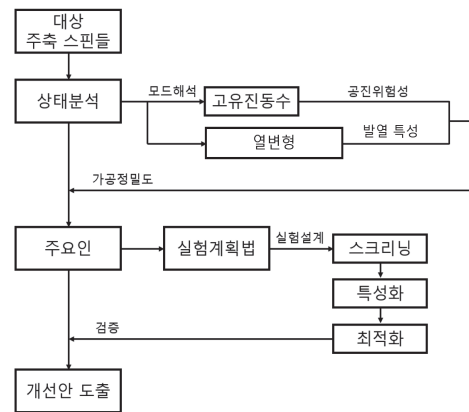


Fig. 1 The reverse engineering process

## 2. 재제조 플래너밀러 스피들 상태분석

### 2.1 유한요소모델 구축

재제조 대상인 노후화된 플래너 밀러(HF-3M)

의 스펀들의 유한요소모델 구축을 위해 3D 스캔을 실시하였다. 3D스캐너로 취득한 스캔데이터를 바탕으로 상용프로그램인 Geomagic Control X®를 사용하여 Fig. 2와 같이 유한요소모델을 구축하였다. 주축 구성요소 중 규격품 및 스펀들 제외 다른 구성품과 조립이 되는 부품은 치수 및 구조변경이 한정적이므로 스펀들 하우징, 스펀들 커버, 척 콜릿, 스펀들 케이스와 같은 부품은 설계대상에서 제외하였으며 스펀들 축과 베어링을 본 연구의 대상으로 선정하였다.

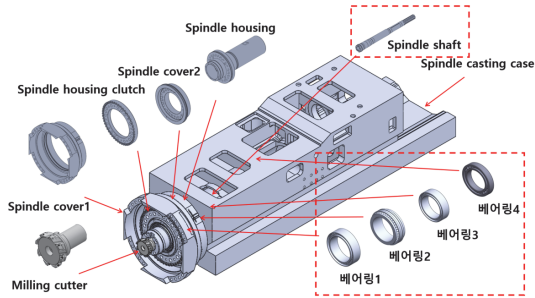


Fig. 2 A finite element model

본 연구의 대상인 스펀들 구조를 Fig. 3과 같이 나타냈으며 스펀들 부분에 대해 따로 2D 도면을 설계한 부분들을 확인해보며 스펀들의 샤프트의 어느 부분에 베어링이 위치하는지 확인하였다. 유한요소해석에 사용된 주축 물성치는 Table 1과 같다.

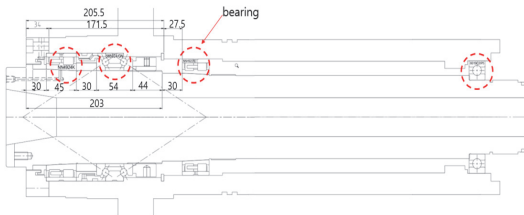


Fig. 3 The structure of the main spindle

Table 1. The properties of the main spindle

Parameter	Unit	Value
Shaft	-	SCM4
Housing		
Bearing	-	STB2
Bearing Stiffness	N/mm	$10^9$
rpm	rev/min	30~3,000

## 2.2 공진위험성에 의한 동특성 해석

스핀들의 기저속도에서 공진 위험성이 없음을 확인하기 위해 상용프로그램인 ANSYS Workbench®를 사용하여 진동 해석을 진행하였다.

해석 조건으로 회전속도는 스펀들의 회전범위인 30 ~ 3,000rpm, 베어링 강성 계수는  $10^9$  N/mm을 부여하였고 Fig. 4와 같이 주축 진동해석 모델에 적용된 해석조건이다.

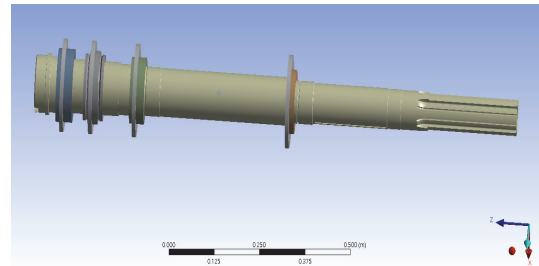


Fig. 4 The boundary condition of the main spindle for vibration analysis

주축에 대한 진동해석 결과를 각 모드별로 Table 2와 같이 나타내었으며 공진 위험성을 확인하기 위한 Campbell Diagram을 Fig. 5와 같이 나타내었다.

해석 결과 1차 모드 고유진동수는 0.12rpm으로 주 공진주파수가 아니므로 공진위험성이 적다고 판단하였고 2 ~ 6차 모드 고유진동수 13,226.4 ~ 58,060.8rpm은 스펀들의 회전범위인 30 ~

Table 2. Mode analysis results

Mode	Frequency[Hz]	rpm
1	1.9959e-003	0.12
2	220.44	13,226.4
3	222.16	13,329.6
4	310.07	18,604.2
5	959.34	57,560.4
6	967.68	58,060.8

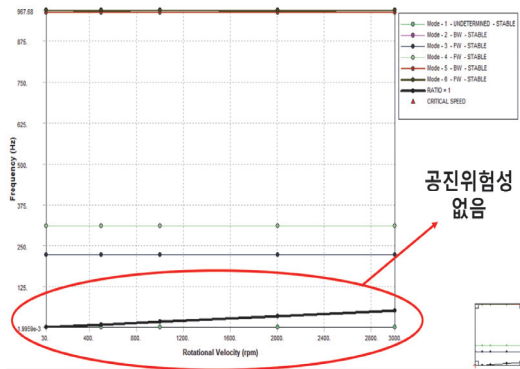


Fig. 5 The Campbell Diagram

3,000rpm보다 훨씬 높아 공진위험성이 없다고 판단된다. Campbell Diagram 또한 겹치는 부분이 없으므로 주축 스핀들 부는 공진 위험성이 없는 것으로 판단된다.

### 2.3 발열 특성에 의한 열변위 해석

베어링 위치에 따른 스핀들의 온도와 변위 변화를 확인하기 위해 스핀들에 대해 상용프로그램인 ANSYS Workbench®를 사용하여 열변위 해석을 진행하였다.

해석 조건으로 베어링 내부는 원활히 스핀들 축과 회전한다고 가정한 접촉조건을 부여하였고 베어링 외부는 충분히 고정되어 있음을 가정한 조건을 주었다. 고속 주축의 열원은 베어링과 내장

형 모터로 나누어지며, 베어링과 모터의 발열들은 상호 영향을 주기 때문에 모터의 발열은 베어링의 특성에 큰 영향을 미치게 된다.

주축계의 부품과 부품의 조립 부분을 생략하였고 베어링부와 모터부는 모델링을 생략하고 발열에 대한 경계조건을 부여하였다[2-4].

## 3. 실험계획법을 이용한 최적설계

### 3.1 설계변수

실험계획법은 해결하고자 하는 문제에 대해 실험을 어떻게 수행하고, 데이터는 어떤 방식으로 측정할지 정하고, 도출된 데이터를 어떤 통계적 방법으로 분석할지 계획을 수립하여 최소 실험으로 최대의 정보를 끌어내는 방법이다. 또한 실험 횟수를 최소화하고 인자와 반응의 함수관계를 규명할 수 있어 여러 인자들중에서 주요한 인자를 선별하여 주효과 및 교호작용을 파악할 수 있다. 주요한 인자가 선별이 되면 가장 좋은 반응을 얻기 위한 최적의 처리조합을 도출하고 설계공간을 얻을 수 있어 실험계획법은 널리 사용되고 있다[1].

본 연구에서는 실험 설계를 위해 상용프로그램인 MINITAB®을 사용하여 전산실험을 진행하였고 스핀들의 온도와 변위로 최소화를 목적으로 최적화를 진행하였다. 고려할 인자의 개수가 많지

Table 3. Key factor and setting range for specialization step

Parameter	Level[mm]		
	Lower	Initial	High
Bearing 1	0	10	20
Bearing 2	65	80	95
Bearing 3	193	208	223
Bearing 4	0	17	34

않아 스크리닝 단계를 생략하여 설계 가능한 영역 인 4개의 베어링 위치를 유의미한 인자로 선별하였다.

Fig. 6과 같이 베어링에 대해 구조 변경이 가능한 부분을 나타내었다. 베어링의 위치를 제외하 다른 인자들은 다른 부품들과 결합되거나 치수 및 구조변경에 대해 제한적이라 고려해야 할 인자에

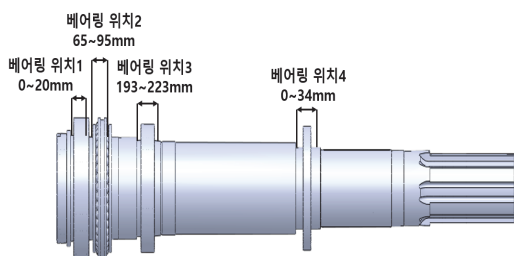


Fig. 6 Factors that can change the design of the main spindle

Table 4. Central composite design experimental table about key factors

Run order	Bearing location				Temperature [°C]	Displacement [μm]
	1	2	3	4		
1	0	65	193	34	25.731	33.489
2	20	95	223	0	25.692	34.291
3	0	95	223	34	25.613	33.553
4	0	65	193	0	25.674	33.613
5	0	65	223	0	25.659	33.297
6	20	65	223	34	25.692	33.706
7	0	95	193	34	25.611	33.724
8	20	95	193	0	25.657	33.564
9	0	95	193	0	25.748	33.846
10	0	65	223	34	25.999	33.691
11	0	95	223	0	25.649	33.679
12	20	95	193	34	25.726	34.124
13	20	65	193	0	25.695	33.249
14	20	65	223	0	25.717	33.401
15	20	65	193	34	25.644	33.991
16	20	95	223	34	25.701	33.677

서 제외하였다[1].

베어링 위치에 대한 완전요인설계법을 진행하였으며 2수준, 중앙점개수 0, 반복실험 횟수 1, 블록 수 1로 설계하였다. Table 3과 같이 실험에 사용된 각 인자 및 인자의 수준이다.

전산실험은 Table 4와 같이 반응요소인 온도와 변위에 대한 값은 상용프로그램인 ANSYS Workbench®를 사용하여 베어링 위치에 대한 전산실험을 진행하였다.

### 3.2 중심합성계획법 및 결과

ANSYS Workbench®의 열변위 해석의 함수표현으로 온도 및 변위를 계산했으며 계산값들을 MINTAB®을 통하여 통계 분석하여 최적화한 결과를 Fig. 7, Fig. 8과 같이 온도와 변위에 대한

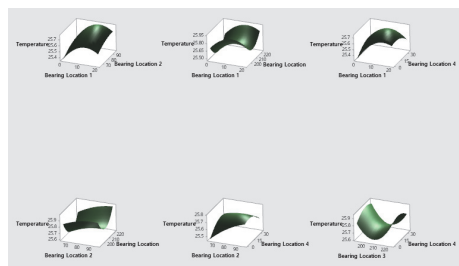


Fig. 7 Temperature surface diagrams between key factors

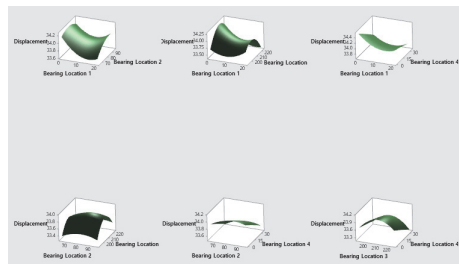


Fig. 8 Displacement surface diagrams between key factors

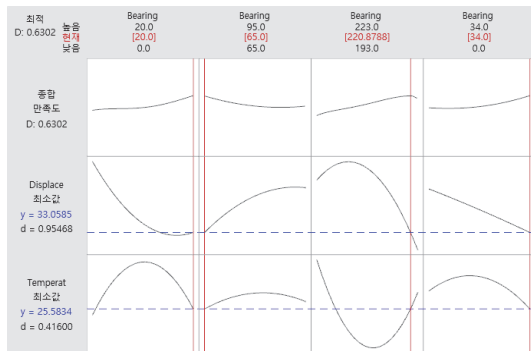


Fig. 9 Optimization result graph of key factors

Table 5. Optimization result of key factors

Parameter	Value [mm]	Temperature [°C]	Displacement [mm]
Bearing 1	20	25.5834	33.0585
Bearing 2	65		
Bearing 3	220.8788		
Bearing 4	34		

표면도, Fig. 9와 같이 온도와 변위에 대한 최적화 선도를 나타내었다.

Fig. 9와 같이 온도 및 변위를 최대화로 선정할 때 최적 설계값은 Bearing location 1 = 20mm, Bearing location 2 = 65mm, Bearing location 3 = 220.8788mm, Bearing location 4 = 34mm로 도출되었다.

각 요인의 경향성을 파악하기 위해 Fig. 7, Fig. 8과 같이 표면도를 나타냈으며 온도와 변위에 둘 다 상반되는 경향성을 보였다. Bearing location 2와 Bearing location 3이 고정일 경우, Bearing location 1과 Bearing location 4가 증가할수록 온도 및 변위가 가파르게 상승하는 구간을 확인하였고 Table 5와 같이 각 핵심요인의 최적화 값을 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 상용 프로그램인 ANSYS Workbench®, MINITAB®으로 모드 해석, 열변위 해석 및 중심합성계획법을 수행했으며 플래너 밀러 주축 스핀들 베어링 위치에 변화를 요인으로 최적설계를 실시하여 각 설계점에서의 온도 및 변형을 확인, 반응표면도 및 최적화 선도와 최적 설계 값을 도출하였다.

주축 스핀들의 재제조 프로세스의 성능개선에 관한 데이터를 제공하여 재제조 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 후 기

"본 연구는 2022년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20206310200010)"

## 참고문헌

- [1] H. R. Kim, H. J. Lee, "Reverse Engineering of Aged Planner Miller Main Spindle Using Central Composite Design", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 3, pp. 36-42(2022).
- [2] S. S. Park, W. J. Chung, "A Study on the Optimum Design of High Speed Built-In Spindle Considering the Thermo Behavior", Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol.20 No.6 2011. 12. pp. 767-772

- [3] S. W. Yoo, J. H. Lee, “A Study on the Thermally Stable Design of a Worn Lathe Spindle for Remanufacturing”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 31:1 (2022) 48-54.
- [4] H. H. Lee, S. B. Shin, “A Study on Thermal Deformation of Spindle for Five-axis Machine Tools”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, (2022) pp.298-299.

---

(접수: 2022.10.31. 수정: 2022.11.22. 게재확정: 2022.11.25.)