

# 중심합성계획법을 이용한 노후 플래너 밀러 주축 스피ndl의 역설계에 관한 연구

김홍록\*, 정원지\*<sup>#</sup>, 설상석\*, 홍대선\*, 공석환\*, 이현준\*, 이성원\*\*

\*창원대학교, \*\*경남테크노파크

## Reverse Engineering of Aged Planner Miller Main Spindle Using Central Composite Design

Hong-Rok Kim\*, Won-Jee Chung\*<sup>#</sup>, Sang-Seok Seol\*, Dae-Sun Hong\*, Seok-Whan Gong\*,  
Hyun-Jun Lee\*, Seong-Won Lee\*\*

\*Changwon National University, \*\*Technology park

(Received 18 November 2021; received in revised form 22 December 2021; accepted 7 January 2022)

### ABSTRACT

Whereas the necessity for recycling and reuse is being emphasized owing to the depletion of resources and waste disposal problems caused by the continuous development of the industry, the importance of remanufacturing has been highlighted recently. Re-manufacturing involves a series of processes in which failed disposal or aging goods are recovered to a state similar to that of a new product. In this regard, machine tools, which are large structures, can achieve the effect of remanufacturing. Among the various elements constituting the machine tool, the main spindle portion that affects the processing precision is critical. Therefore, this study is conducted to derive improvement measures for the main axis of an old Miller planner via reverse engineering and central composite design, which is one of the core processes of remanufacturing.

**Keywords :** Planner Miller(플래너 밀러), Main Spindle(주축 스피ndl), Central Composite Design(중심합성설계), Reverse Engineering(역설계), Optimization(최적화)

## 1. 서 론

산업의 지속적인 발전으로 발생하는 자원의 고갈과 폐기물 처리 문제로 인해 소비 및 생산 감축, 재활용 및 재사용 등의 필요성이 강조되고 있는 가운데, 최근 들어서는 재제조(Re-manufacturing)의 중

요성이 확대되고 있다.<sup>[1-4]</sup> 재제조란 고장 폐기 또는 노후화된 물건을 회수하여 신제품에 가까운 상태로 회복시키는 일련의 과정을 의미하며 공작기계의 대부분을 차지하는 플래너 밀러는 대형구조물이 사용되므로 재제조 효과를 크게 얻을 수 있는 장비 중 하나이다. 현재 재제조 대상으로 진행되고 있는 노후화된 주축 NT 50급인 플래너 밀러(HF-3M)의 주요 구성요소를 Figure 1에 나타내었다. 그 중 플래너 밀러의 주축 스피ndl을 부는 공작기계의 성능에 가

# Corresponding Author : wjchung@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3624, Fax: +82-55-263-5221

장 큰 영향을 끼치는 요소 중 하나이다. 주축 스피indle 부를 설계할 때 고려해야 할 사항으로는 주축의 구성, 사이즈, 베어링 성능 등이 있지만 가공 정밀도에 영향을 주는 주축의 지름, 위험속도, 베어링 배열은 기본적으로 고려되어야 한다. 현재 공작기계의 주축 스피indle 설계에 대한 연구로는 오남석 등은 정, 동적 해석을 통한 스피indle 설계에 관한 연구<sup>[5]</sup>를, 임정숙 등은 다구찌 방법을 사용한 베어링 위치와 강성에 따른 고속스피indle의 최적화에 대한 연구<sup>[6]</sup>를, 신재호 등은 실험계획법을 이용한 주축 스피indle의 위험속도와 중량 개선에 대한 연구<sup>[7]</sup> 등이 있다. 이와 같이 공작기계 주축 스피indle 설계에 대한 여러 연구가 진행된 상태이지만 기존 노후화된 공작기계 주축 스피indle의 역설계에 대한 연구는 저조하다. 역설계란 이미 완성되어 있는 제품으로부터 스펙을 추출하여 성능을 향상시키는 방향으로 설계하는 것으로 먼저 3D스캐너를 통해 역설계 대상을 스캔하여 수집된 데이터를 바탕으로 3D모델링화를 한 후 마모 및 손상상태를 파악하여 성능을 향상시키는 방향으로 개선안을 도출하는 과정을 따른다. 이러한 역설계는 재제조에서 빠져서는 안되는 중요한 과정이다.

따라서 본 연구에서는 중심합성계획법을 사용하여 노후화된 플래너 밀러 주축 스피indle의 가공정밀도에 영향을 주는 외경 및 베어링 위치에 대한 최적 설계를 통해 개선안을 도출하여 역설계에 대한 데이터를 제공하는 것을 목적으로 한다.

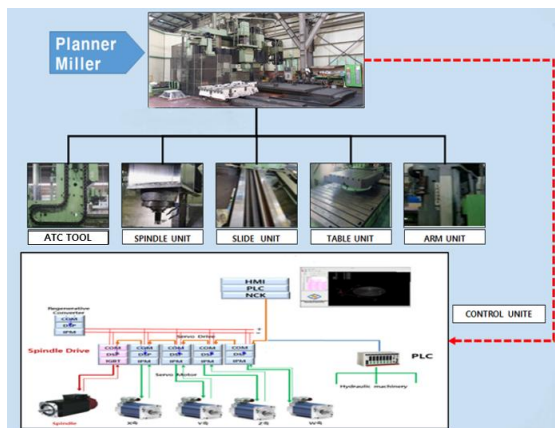


Fig. 1 The main component of the planner miller

## 2. 노후 플래너밀러 주축 스피indle 상태 분석

### 2.1 주축 스피indle 공진위험성

역설계를 하기 앞서 노후화된 주축 스피indle의 상태를 분석하였다. 주축 스피indle부는 헨디타입 레이저스캐너로 스캔을 진행하여 얻은 스캔데이터를 바탕으로 상용프로그램인 Geomagic Control X®를 사용하여 3D모델링화를 진행하였으며 Figure 2에 나타내었다. 기저속도 30 ~ 3,000rpm인 주축 스피indle의 공진위험성을 분석하기 위해 상용 프로그램인 ANSYS®를 사용하여 모드해석을 실시하였다. 해석에 사용된 물성치와 부여 조건은 Table 1에 나타내었다.

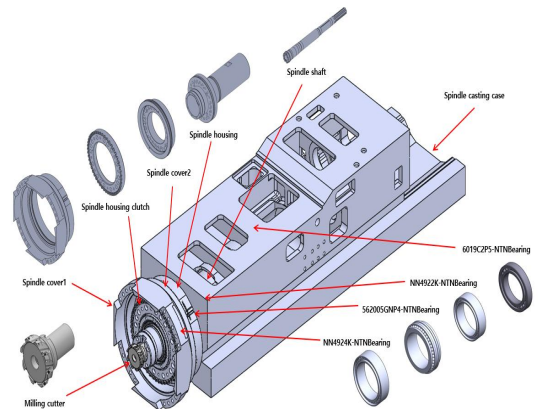


Fig. 2 A finite element model using Geomagic Control X®

Table 1 The properties of the main spindle

Parameter	Unit	Value
Shaft	-	SCM4
Housing		
Clutch		
Cover		
Bearing	-	STB2
Case	-	FC250
RPM	rev/min	30-3000
Bearing Stiffness	N/mm	10 <sup>9</sup>

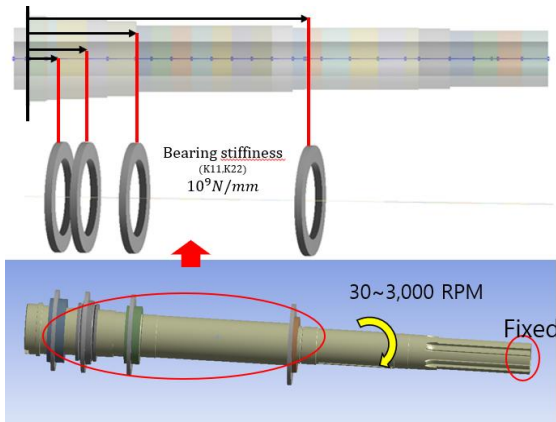


Fig. 3 Boundary condition of the main spindle for modal analysis

Table 2 Result of the modal analysis

Mode	Frequency(Hz)
1st	233.16
2nd	234.65
3rd	1,014.8
4th	1,017.3
5th	1,533.9
6th	1,793

해석조건으로 Table 1을 참조하여 Figure 3에 나타내었다. 회전속도 30 ~ 3,000rpm 부여하였고 베어링 강성 계수는 위험속도를 알아보기 위함으로 스피ndl 위험속도에 영향을 미치지 않도록 각 베어링 위치에  $10^9 N/mm$ 을 부여하였다. Table 2는 진동 모드해석 결과이며 도출된 1~6차 모드의 고유진동수를 환산하면 13,989.6~107,580rpm에 해당하므로 주축 회전속도인 30~3,000rpm보다 훨씬 높은 범위이다. 따라서 주축 스피ndl 부는 공진위험성이 없는 것으로 판단된다.

## 2.2 주축 스피ndl 작용 반력

주축 스피ndl의 모드해석결과 공진위험성은 없는 것으로 확인되었다. 다음으로 공구 가공시 스피ndl에 작용하는 반력을 구하기 위해 상용프로그램인 RecurDyn®을 사용하여 동해석을 진행하였다.

Figure 4는 동해석에 사용된 주축 스피ndl 모델과 가공조건을 나타내었다. 절삭조건은 Table 3을 참조하여 부여하였으며 해석에 부여한 접촉조건으로는, 주축케이스와 커버를 그라운드와 고정, 베어링 외경을 스피ndl 하우징과 고정하였고 주축을 X축 방향으로 7,200mm/min만큼 이송속도를 부여하였다. 또한 스피ndl 축에 회전속도 3,000rpm을 부여하였으며 공구가 X축 방향으로 이동하면서 스피ndl 축이 회전할 때 공구와 절삭물의 접촉면에 발생하는 반력을 알아보기 위해 공구와 절삭물의 접촉면에 Solid Contact조건을 부여하여 동해석을 진행하였다.

Figure 5는 주축 스피ndl 가공시 공구와 절삭물의 접촉면에서 공구에 작용하는 반력을 X, Y, Z축에 대해 나타낸 그래프이고 Table 4는 구간별 최대 반력

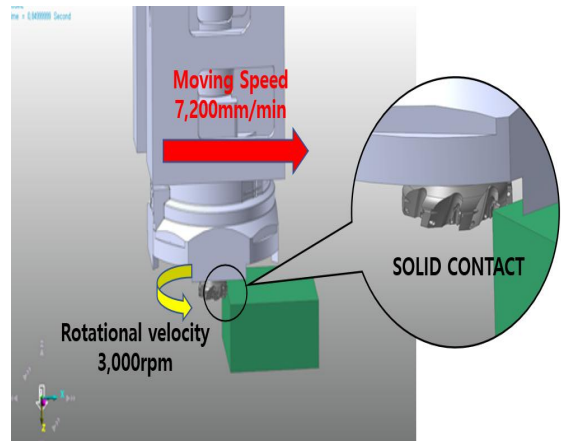


Fig. 4 Boundary and cutting conditons for Dynamic analysis

Table 3 Cutting conditions for Dynamic analysis

Parameter	Unit	Value
RPM	rev/min	3,000
Cutting Speed	m/min	0.9425
Feed per min	mm/min	7,200
Diameter of the Milling Cutter	mm	100
Depth of Cut	mm	15
Feed per Tooth	mm/tooth	0.3

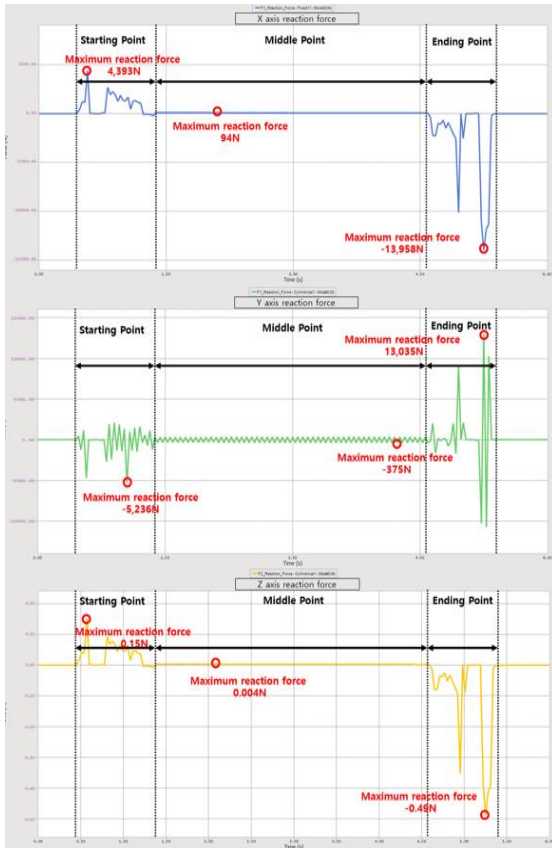


Fig. 5 The reaction force of dynamic analysis(Each X,Y,Z-axis)

Table 4 Cutting conditions for dynamic analysis

RPM	Section	Maximum reaction force [N]		
		X	Y	Z
3,000	Start	4,393	-5,236	0.15
	Middle	94	-375	0.004
	End	-13,958	13,035	-0.49

을 나타낸 것으로 주축 스피들이 3,000rpm으로 공작물을 가공할 때 가공시작부에서 반력을 어느정도 받다가 가공중간부에 들어서는 줄어들어 안정적이고 가공종료부에서 큰 반력을 받는 경향을 보였다.

### 3. 노후 플래너밀러 주축 스피들 역설계

#### 3.1 중심합성계획법

실험계획법은 해결하고자하는 문제에 대해 실험을 어떻게 수행하고, 데이터는 어떤 방식으로 측정할지, 도출된 데이터를 어떤 통계적 방법으로 분석할지 계획을 수립하여 최소 실험으로 최대의 정보를 끌어내는 방법으로 그 중에서도 중심합성계획법은 주요 인자에 대해 가장 좋은 반응을 얻기 위한 최적의 처리조합을 도출할 수 있어 널리 사용되고 있다.[8]

서론에서 논의하였듯이 주축 스피들은 공작기계의 가공정밀도에 영향을 미친다. 또한 가공시 반력이 가해지는 경우 스피들의 변위, 응력에 변화가 발생하며 이는 가공정밀도와 밀접한 관계를 가진다. Figure 6은 주축 스피들의 구조와 치수 및 구조변경이 가능한 부분을 나타내었으며 Table 5에 각 인자 및 인자의 수준을 나타내었다.

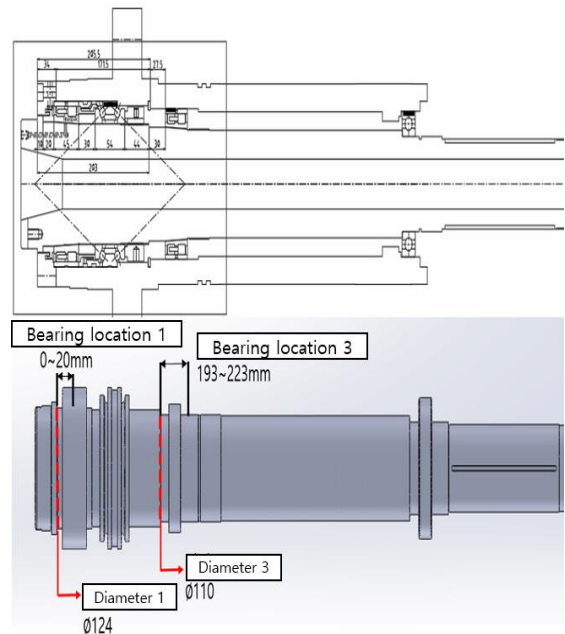


Fig. 6 Factors that can change the design of the main Spindle

**Table 5 Setting factor and setting range for Central Composite design**

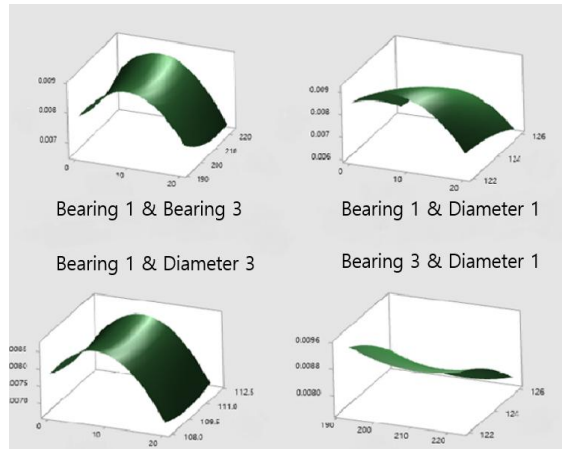
Factor	Range [mm]		
	Low	Initial	High
Diameter 1	122	124	126
Diameter 3	108	110	112
Bearing Location 1	0	10	20
Bearing Location 3	193	208	223

노후화된 주축 스피ndl의 역설계 개선안을 제시하기 위해 상용프로그램인 MINITAB®을 사용하여 중심합성계획법을 수행하였다. 주요인 및 설정범위로 Table 5값을 사용하였고 반응요소인 변위, 응력값은 상용프로그램인 ANSYS®를 사용하여 과도해석을 통해 도출하였다. Figure 7은 스피ndl에 적용한 해석 조건으로 베어링 외경은 하우징과 고정이 잘 되어 있음을 가정하여 고정조건을 부여하였으며 내경은 스피ndl과 원활히 회전한다고 가정하여 접촉조건을 부여하였다. 힘 조건으로는 Table 4의 가공시 스피ndl이 받는 반력 중 가장 큰 가공 종료부값을 부여하였다. 중심합성계획법을 이용한 총 26회의 전산 실험을 진행한 결과 Figure 8과 Figure 9에 변위, 응력에 대한 각 주요인들간의 경향을 알아보기 위해 표면도를 나타내었다.

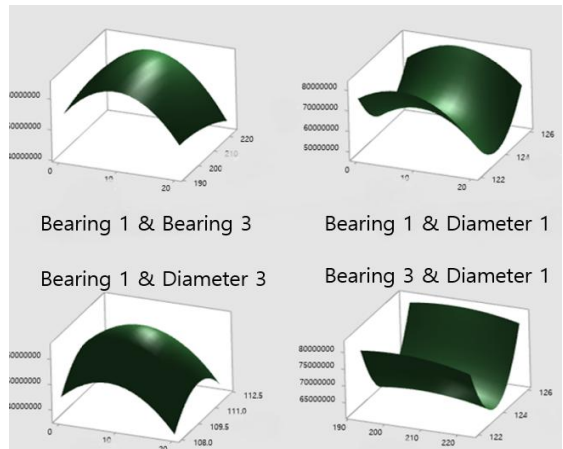
- A Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s<sup>2</sup>
- B Rotational Velocity: 3000 RPM
- C Fixed Support
- D Remote Force: 19089 N



**Fig. 7 Boundary and force condition of the main spindle for transient analysis**



**Fig. 8 Displacement Surface diagrams between key factors**



**Fig. 9 Stress Surface diagrams between key factors**

베어링 위치1의 경우 위치가 설정범위의 양쪽 끝으로 갈수록 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보이며 베어링 위치3의 경우 설정범위의 중간에서 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보인다. 외경1의 경우는 외경의 크기가 클수록 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보이며 외경3의 경우는 설정범위의 중간에서 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보인다. 다음으로 반응 최적화 도구를 이용하여 각 요인에 대해 변위, 응력의 최소화를 목적으로 최적화를 진행하여 Figure 10에 결과 그래프와 Table 6에 최적화 결과값을 나타내었다.



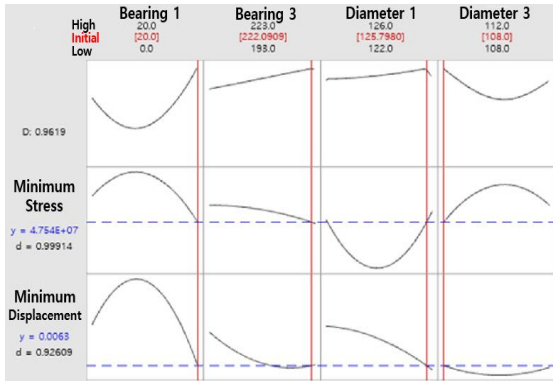


Fig. 10 Optimization result graph of key factors

Table 6 Setting factor and setting range for Central Composite design

Factor	Value [mm]	Displacement [mm]	Stress [MPa]
Diameter 1	20	0.0063	47.54
Diameter 3	222.0909		
Bearing Location 1	125.798		
Bearing Location 3	108		

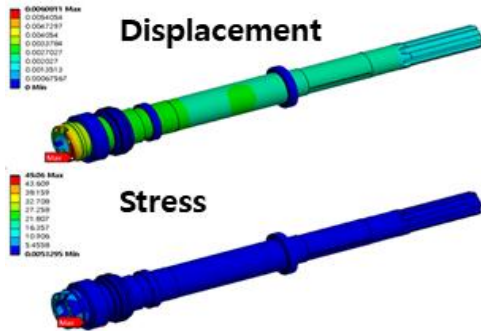


Fig. 11 Result of transient analysis(Displacement, Stress)

전산실험으로 도출된 최적값에 대해 검증이 필요하므로 실제 해석을 진행하였다. 도출된 최적화 값을 적용한 스핀들 축의 형상은 상용프로그램인 SolidWorkk®를 사용하여 구축하였으며 변위, 응력에 대한 과도해석은 최적화 값을 제외한 모든 조건은 동일하게 설정하여 진행하였다. Figure 11은 최적화 값이 적용된 주축 스핀들의 과도해석 결과이다.

Table 7 Comparison between the computational experiment value and the actual analysis value

Parameter	Displacement [mm]	Stress [MPa]	Error factor [%]
Computational experiment	0.0063	47.54	3.5
Actual analysis	0.00608	49.06	3.1

Table 8 A Comparison table between existing and improved models

Parameter	Existing Model	Improved Model	Decreasing rate [%]
Displacement [mm]	0.0086	0.0063	26.32
Stress [MPa]	62.37	47.54	23.78

Table 7은 전산실험을 통해 도출된 최적값과 실제 해석을 통해 도출된 변위, 응력값이다. 오차율은 변위의 경우 3.5%이고, 응력의 경우 3.1%로써 SolidWorkk®를 사용하여 최적화된 스핀들 형상을 구축할 때 프로그램상 소수 둘째자리까지 적용되는 것을 고려한다면 신뢰성이 있다고 판단된다.

Table 8은 최적화를 통해 도출된 주축 스핀들의 역설계 개선안과 기존 노후화된 스핀들의 변위, 응력 실험 결과를 비교하여 나타낸 것으로 역설계 개선안은 기존 스핀들보다 변위 26.32%, 응력 23.78%의 감소효과를 보였다.

#### 4. 결론

본 연구는 노후화된 플래너 밀러 주축 스핀들의 역설계 개선안을 제시하는 것을 목적으로 진행되었다. 역설계에 앞서 노후화된 주축 스핀들의 상태를 분석하기 위해 상용프로그램인 ANSYS®를 사용하여 모드해석을 진행하였다. 모드해석 결과 주축 스핀들의 기저속도인 30~3,000rpm에서 공진위험성이 없는 것을 확인하였다. 다음으로 주축 스핀들에 작용하는 반력을 구하기 위해 상용프로그램인

RecurDyn®을 사용하여 동해석을 진행하였다. 동해석 결과 주축 스피ndl이 3,000rpm으로 공작물을 가공할 때 가공시작부에서 반력을 어느정도 받다가 가공중간부에 들어서는 줄어들어 안정적이고 가공종료부에서 큰 반력을 받는 경향을 보였다. 스피ndl이 가공시 반력을 받을 경우 스피ndl의 변위, 응력이 변하며 이는 가공정밀도에 영향을 미친므로 스피ndl의 변위, 응력에 영향을 주는 요소 중 외경과 베어링 위치를 주요인으로 역설계를 진행하였다. 상용프로그램인 Geomagic Control X®를 사용하여 유한요소모델을 생성하였으며 MINITAB®을 사용하여 중심합성계획법을 진행하였다. 그 결과 베어링 위치1의 경우 위치가 설정범위의 양쪽 끝으로 갈수록 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보이며 베어링 위치3의 경우 설정범위의 중간에서 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보인다. 외경1의 경우는 외경의 크기가 클수록 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보이며 외경3의 경우는 설정범위의 중간에서 변위, 응력이 줄어드는 경향을 보였다. 마지막으로 전산실험을 통해 도출된 최적화 역설계 개선안을 실제 해석과 비교하여 신뢰성을 확인하였으며 역설계 개선안과 기존 노후화된 주축 스피ndl과의 비교 결과 변위에서 26.32%, 응력에서 23.78%의 감소효과를 보였다.

본 연구에서는 노후 플래너 밀러 주축 스피ndl의 베어링 위치 및 외경을 고려한 개선안을 제시하여 역설계 데이터를 제공함으로써 재제조 산업에 영향을 미칠것으로 판단된다.

## 후 기

“본 논문의 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업 과제인 ‘국산 CNC기반 산업기계 재제조 스펙업 및 보급·확산 기반조성’(20206310200010)의 일환으로 수행되었음.”

## REFERENCES

1. Jo, J. J., Kim, S. I. and Choi, D. B., “Dynamic Analysis of a High Speed Spindle System for

Lathes”. Korean Society for Precision Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 5-12, 1994.

2. Song, C. K., Shin, Y. J., “Effect of Preload on Running Accuracy of High Speed Spindle”, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 65-70, 2002.

3. Choi, D. B., Jo, J. J. and Kim, S. I., “Dynamic Characteristics of Spindle with a Built-in Motor”, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 184-190, 1994.

4. Kim, B. S., Kim, J. K., “A Study on the Static Stiffness in the Main Spindle Tpaer of Machine Tool”, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Spring Conference, pp. 149-154, 2001.

5. Oh, N. S., Kim, D. H. and Lee, C. M., “A Study on the Analysis of 20,000rpm Heavy-Cutting Spindle for Precision Machining”, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 57-61, 2015.

6. Lim, J. S., Lee, J. H. and Lee C. M., “Selection of Bearing Position to Improve 40,000rpm Spindle Stiffness”, Korean Society for Precision Engineering, pp. 441-442, 2006.

7. Shin, J. H., and Lee, C. M., “A Study on Spindle Shape Design using Design Experiments”, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 120-127, 2009.

8. Park, S. H., “Modern experimental planning method”, Co.MINYOUNGSA, pp. 453-490, 2005.