

## 유한요소 해석을 이용한 경사베드 구조의 램 탑 수직형 머시닝센터 가공 정밀도 향상 연구<sup>§</sup>

송영준\* · 김성도\* · 노창일\* · 김 산\*\* · 원종범\*\*\* · 박재상\*\*\* · 송철기\*\*\*\*†

\* 경상국립대학교 대학원 기계항공공학부, \*\* 경상국립대학교 기계융합공학과,  
\*\*\* (주)스마트공작기계 코리아, \*\*\*\* 경상국립대학교 기계공학부, 공학연구원

### Improving Precision of a Ram-Type Vertical Machining Center Using Finite Element Analysis

Young Jun Song\*, Seong Do Kim\*, Chang Il Roh\*, San Kim\*\*,  
Jong Bum Won\*\*\*, Jae Sang Park\*\*\* and Chul Ki Song\*\*\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Gyeongsang National Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Gyeongsang National Univ.,

\*\*\* Smart Machine Tool Korea Co.,

\*\*\*\* School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National Univ.

(Received August 31, 2022 ; Revised February 22, 2023 ; Accepted February 27, 2023)

**Key Words:** Finite Element Analysis(유한요소 해석), Machine Tool(공작기계), Ram-type Head Structure(램 형 헤드 구조)

**초록:** 기존까지 해외 고생산성의 공작기계들이 세계시장을 선도하고 있고 국내에서도 공작기계를 수입하는 경우가 대부분이다. 소재, 부품, 장비의 국산화가 시급한 장비이며 고속, 고정밀화 IT 기술을 융합한 기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 기존 C형 헤드를 가진 수직 머시닝센터에서 컬럼 고정의 램형 헤드 구조의 신개념 머시닝센터의 유한요소 해석을 진행하고자 한다. 정면에서 장비의 교체 및 관리가 가능한 ATC & Magazine이 부착되어 있으며 싸이클론과 원심분리기가 합쳐진 수평형 원심분리 기술이 적용된 공작기계이다. 국내 최초의 경사베드 구조의 x축 이송기구와 y, z축 분리 이송 구조이다. 유한요소 해석을 위해 ANSYS 프로그램을 이용하여 기구부의 하중에 의한 최대 등가응력 및 변형량이 발생하는 위치를 찾아 기구부에 보완이 필요한 곳을 제시한다.

**Abstract:** To date, the global market for high-productivity machine tools has been dominated by overseas imports, and in most cases, domestic machine tools are also imported. Hence, there is an urgent need to develop domestic production capabilities for materials, parts, and equipment, and to integrate high-speed, high-precision IT technology for technological advancement. In this study, we conduct finite element analysis on a new concept machining center with a column-fixed ram-type head structure in a vertical machining center, which is equipped with an existing C-shaped head. This machine tool features an ATC and Magazine that allows equipment to be exchanged and managed from the front, as well as a horizontal centrifugal separation technology that combines a cyclone and centrifuge. This is the first tilting bed structure in the country with an x-axis transfer mechanism and a separate y- and z-axis transfer structure. Using the ANSYS program for finite element analysis, we identify the position where the maximum equivalent stress and deformation of the mechanical part occur because of the load, and present the area where the mechanical part should be reinforced.

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2022년 춘계 학술 대회(2022. 3. 23-25., 제주오리엔탈호텔) 발표 논문임.

† Corresponding Author, cksong@gnu.ac.kr

© 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

4차 산업혁명 이후 머시닝센터는 생산제조업계

분야의 필수 요소 중 하나이다. 머시닝센터는 고속, 고강성, 고성능, 높은 정밀도 등을 고려하여 생산성을 극대화하며 개발하는 추세이다. 경사베드 구조의 램 타입 수직형 머시닝센터는 공작기계의 굴곡과 비틀림 강성을 개량해주는 관형 중공 구조를 통해 프로그래밍, 구조, 작동 등 높은 수준의 자동화 특성을 가진다.

특히 ATC(automatic tool changer)에 의해 자동으로 공구를 교체하여 가공하며 복잡하고 번거로운 작업 과정을 줄여 무인화 운영, 비용 절감, 생산성 향상 등의 이점이 있다. 이러한 머시닝센터의 개발에 맞춰 공작물의 고정밀도를 위해서는 설계 시 발생하는 부하, 진동, 회전 등을 고려한 구조적 안전성을 확보해야 한다.

공작물의 가공 정밀도는 수직형 머시닝센터에서 중요한 요소이며, 공작물을 정밀하게 가공하기 위해서는 머시닝센터가 정밀하게 만들어져야 한다. 머시닝센터에 대한 정밀도는 만들어지는 기계에 직접적인 영향을 미친다. 가공 정밀도가 떨어진다면 머시닝센터 부품에도 영향을 주면서 더 큰 문제를 초래할 것이다. 따라서 머시닝센터 제조업체는 장비 제조 과정에 있어 매우 신중해야 하며, 제조 완료된 머시닝센터를 최종 평가 및 보정 후 판매해야 한다.

또한 정밀하게 제작된 장비라도 외부의 힘, 마찰력의 차이, 구동 시의 장력 등 다양한 이유에서 오차와 장비 자체의 기구적인 공차가 발생한다. 이러한 가공 정밀도에 영향을 미치는 많은 원인 중 무거운 무게를 가지는 머시닝센터의 자중에 의한 오차 발생을 줄인다.

경사베드 구조의 램 타입 수직형 머시닝센터의 테이블은 x축, y축의 수평 방향으로 이동하고 회전축이 수직 방향으로 이동하여 3축에 의해 공작물을 가공한다. x축으로 이동시킬 때 새들 어세이(saddle assy)와 헤드 어세이(head assy)가 움직이며 많은 하중이 이동한다. 이 경우 콜럼베이스(column base)에 자중이 가해지며 변형량이 발생하게 된다.

본 연구에서는 이를 개선하기 위해서 경사베드 구조의 램 타입(ram type) 수직형 머시닝센터의 유한요소 해석을 진행한다. 최대 등가응력의 경우 31.823 MPa이 발생했고 이는 안전율이 1 이상인 7.86임을 확인하여 자중에 의한 쳐짐량 측정과 실제 쳐짐량을 비교, 분석을 중점으로 분석한

다. 그 후 경사가공을 통한 보상가공으로 보완한 후 쳐짐량을 확인한다.<sup>(1~3)</sup>

## 2. 수직형 머시닝센터 모델

본 연구의 경사베드 구조의 램 타입 수직형 머시닝센터는 Fig. 1과 같은 모델 형상을 가진다. Fig. 1과 같이 실제 형상과 흡사한 수직형 머시닝 센터의 3D 모델링 형상으로는 유한요소 해석을 진행하기에 많은 시간과 오류가 발생할 수 있다. 해석 결과에 영향이 미치지 않는 볼트 체결부, 모터 등의 부위를 생략하여 Fig. 2와 같이 3D 모델의 단순화를 하여 유한요소 해석을 진행하였다. 단순화 과정을 통해 제거된 각 파트들의 질량을 카티아(CATIA V5)와 앤시스(ANSYS) 프로그램을 통해 구하여 포인트 매스(point mass)로 추가해 주었다. Fig. 1의 ATC & Magazine은 공작

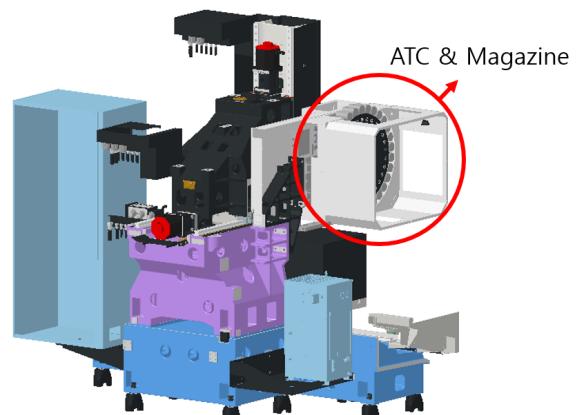


Fig. 1 Modeling of ram-type vertical machining center with slope bed structure

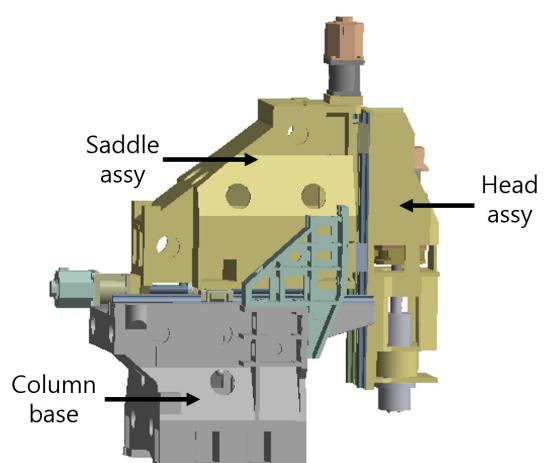


Fig. 2 Simplified model

물 가공 시 치공구를 자동으로 교체해주는 기구이다. ATC & Magazine은 플라스틱 소재이며 형상이 복잡해 해석 시 모델링을 제거 후 경계조건에서 원격 힘(remote force)을 주었다.

Fig. 2에서 아래 지면과 연결되어 있는 파트는 콜럼베이스이며 치공구가 연결된 부분은 스피드 노즈(spindle nose), z축으로 가공을 할 수 있게 헤드 어세이가 새들 어세이에 연결되어 있다.

### 3. 수직형 머시닝센터 구조해석

#### 3.1 유한요소 해석 방법

경사베드 구조의 램 탑입 수직형 머시닝센터는 x축, y축, z축으로 이동하며 공작물을 가공한다. 본 연구에서는 x축으로 공작물을 가공하기 위해

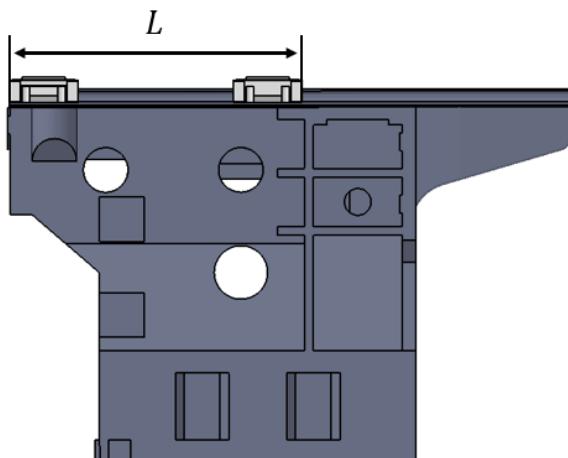


Fig. 3 Distance between the LM guide and the end of column base

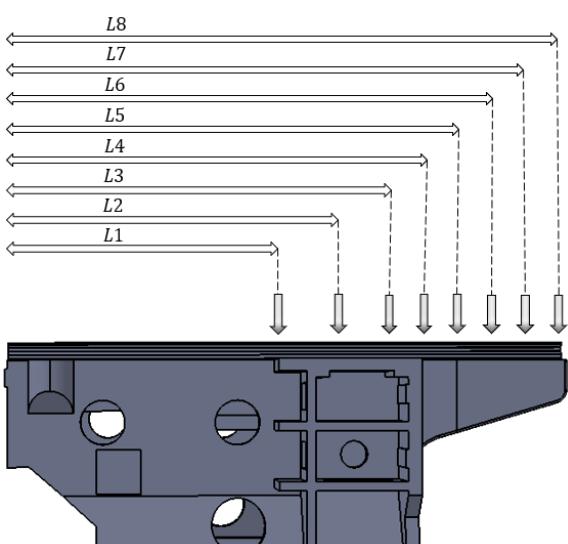


Fig. 4 Position reference point from L1 to L8

이동할 때 Fig. 3과 같이 새들 어세이와 콜럼베이스를 연결하는 엘엠 가이드(LM guide)의 왼쪽 끝을 기준점으로 한다. Fig. 4와 같이 위치별로 유한요소 해석을 진행하여 결과값을 확인한다. 경사베드 구조의 램 탑입 수직형 머니싱센터의 자중에 의한 처짐량을 구하여 유한요소 해석값과 측정값을 비교 및 분석하여 보상가공의 양을 정한다.

유한요소 해석을 위한 유한요소망(mesh)의 구성에 따라 세밀한 결과값을 얻을 수 있으므로 각 파트들에 가장 작은 유한요소망 크기(element size)를 적용하였다. 해석에 사용된 절점의 수는 4,820,333개, 요소의 수는 2,937,882개이다. 수직형 머시닝센터 모델에 사용된 재료는 일반적인 철인 structural steel이며, 재료의 물성치는 Table 1에 표기하였다.(4~6)

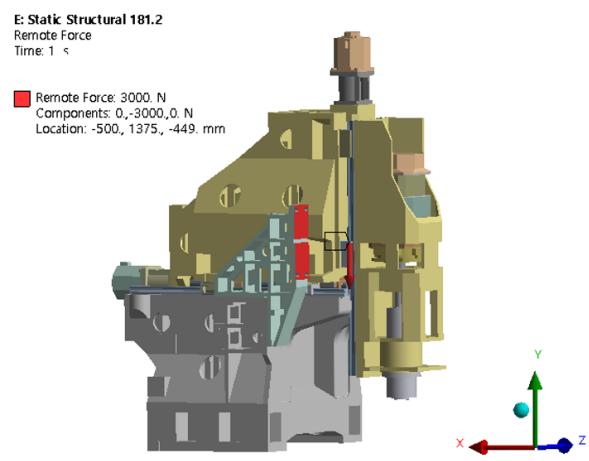
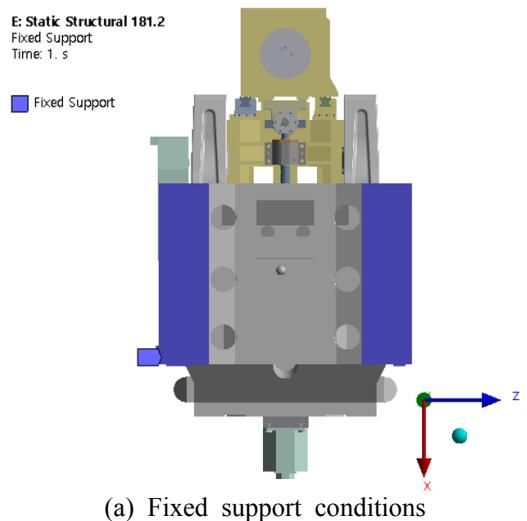
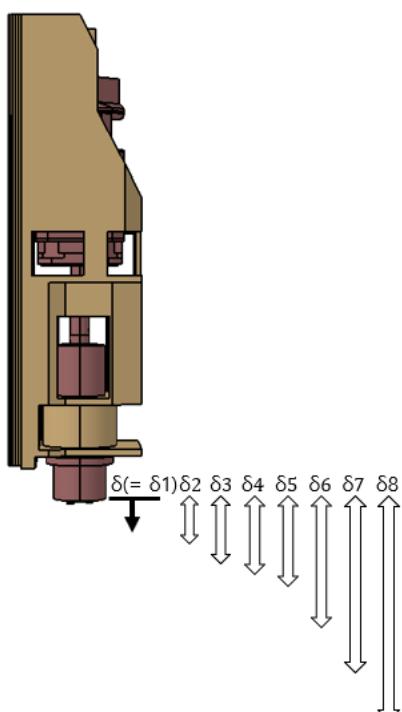


Fig. 5 Boundary conditions for models

**Table 1** Mechanical properties of structural steel

| Item list       | Description             |
|-----------------|-------------------------|
| Yield strength  | 250 MPa                 |
| Young's modulus | 200 GPa                 |
| Poisson's ratio | 0.3                     |
| Density         | 7,850 kg/m <sup>3</sup> |

**Fig. 6** Deflection amount of spindle nose

### 3.2 경계조건 및 하중조건

경사베드 구조의 램 타입 수직형 머시닝센터는 공작가공물을 가공할 때 중력의 힘을 받는다. 이를 중력이 작용하는 방향인 -y축으로  $9.81 \text{ m/s}^2$  만큼 적용한다. 콜럼베이스는 지면과 고정되어 있기에 Fig. 5의 (a)와 같이 두 면을 고정시켰다. 그리고 Fig. 5의 (b)와 같이 ATC & Magazine은 약 306 kg이며 이를 대체해 원격 힘(remote force)를 무게중심에서 -y축으로 3,000 N을 적용하였다.

### 3.3 해석 결과

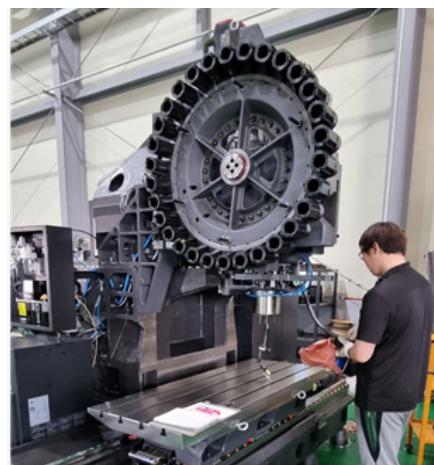
경사베드 구조의 램 타입 수직형 머시닝센터의 유한요소 해석 결과의 측정 방법은 치공구가 들어가는 스픈들 노즈(spindle nose)의 하단 끝을 기준으로 진행하였다. Fig. 6에서 정상 상태의 스픈들 노즈 끝과 처짐이 발생한 스픈들 노즈의 끝 사이의 거리를  $\delta$ 로 나타내었다. 위치별로  $\delta$ 는

**Table 2** Comparison of measurements and finite element analysis values

| Position reference point from I to VIII |      | Finite element analysis value | Actual measurements |
|---|------|-------------------------------|---------------------|
|   | x mm | μm                            | μm                  |
| I                                       | L1   | 655.76                        | -23.43              |
| II                                      | L2   | 806.9                         | -26.46              |
| III                                     | L3   | 958.1                         | -30.58              |
| IV                                      | L4   | 1,018.8                       | -32.09              |
| V                                       | L5   | 1,079.2                       | -34.81              |
| VI                                      | L6   | 1,139.6                       | -42.33              |
| VII                                     | L7   | 1,200                         | -49.72              |
| VIII                                    | L8   | 1,260.4                       | -58.02              |



(a) Expansion of measurement methods



(b) Full background

**Fig. 7** Measurement of deflection using indicators

Table 2에 나타내었다.

Fig. 7은 다이얼 테스트 인디케이터를 통해 측정값을 측정하는 것이다. Fig. 7의 (a)는 확대한 상태에서 측정 중이며, (b)는 수직형 머시닝센터의 전체 모습을 나타내며 측정 중인 모습이다. 측정

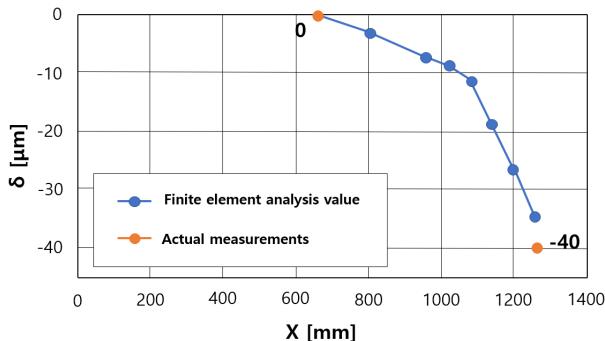


Fig. 8 Comparison of actual measurements and FEM

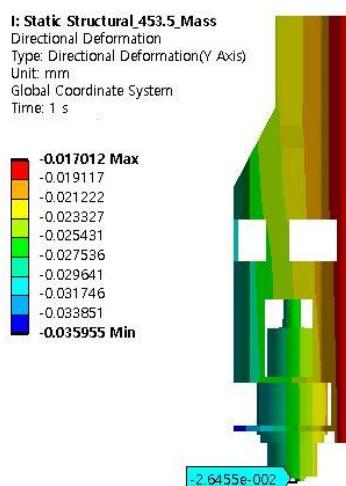


Fig. 9 Y-directional deformation in position II

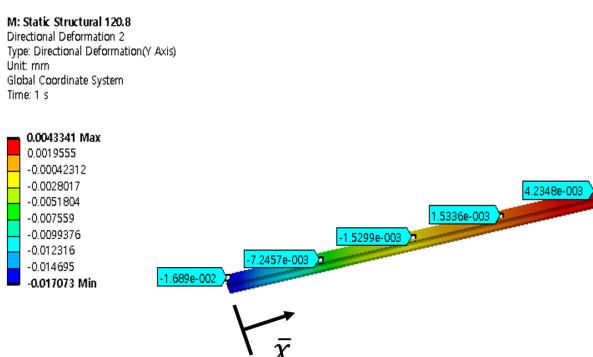


Fig. 10 Directional deformation of rail in position VI

값은 L1 위치에서  $0 \mu\text{m}$ , L8 위치에서  $-40 \mu\text{m}$ 이다. L1 위치를 기준으로 측정했기 때문에 L1과 L8 위치는  $40 \mu\text{m}$ 의 차이를 가진다. Table 2에 나타냈듯이 유한요소 해석 결과값은 L1과 L8 위치에서의 차이는 약  $35 \mu\text{m}$ 을 가지며 측정값과 해석 결과값의 유사함을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 8과 Fig. 9로 그래프와 해석 결과 사진을 통해 확

Table 3 Measurements by position I to VIII of the rail

| Position reference point from I to VIII | Measurements by position of rail |       |       |       |       |      |
|---|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
|   | mm                               |       | μ m   |       |       |      |
|   | mm                               | -1.98 | -2.03 | -4.03 | -1.89 | 0.18 |
| I                                       | 655.76                           | -1.98 | -2.03 | -4.03 | -1.89 | 0.18 |
| II                                      | 806.9                            | -4.1  | -3.18 | -3.03 | -0.64 | 1.29 |
| III                                     | 958.1                            | -8.19 | -5.14 | -1.9  | 0.84  | 2.58 |
| IV                                      | 1,018.8                          | -10.4 | -6.07 | -1.67 | 1.05  | 3.12 |
| V                                       | 1,079.2                          | -13.3 | -6.99 | -1.63 | 1.29  | 3.69 |
| VI                                      | 1,139.6                          | -16.9 | -7.25 | -1.53 | 1.54  | 4.23 |
| VII                                     | 1,200                            | -21.4 | -8.02 | -0.98 | 1.87  | 4.85 |
| VIII                                    | 1,260.4                          | -23.8 | -8.27 | -0.34 | 2.09  | 5.24 |

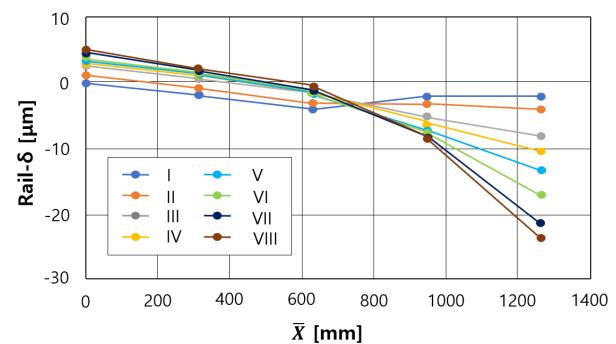


Fig. 11 Measurements by the position I to VIII of the rail

인 할 수 있다.

콜롬베이스와 새들 어세이 사이에 연결된 엘엠 가이드가 움직이는 경로인 레일(rail) 부분에 가장 크게 처짐량이 발생한다고 판단하여 레일의 y축 처짐량을 확인하였다. Fig. 10과 같이 결과를 확인하고 Table 3으로 결과값들을 나타내었다. Fig. 10에서는 Fig. 3과 같이 왼쪽 끝을 기준으로  $0 \text{ mm}$ 이다. 이를 Fig. 11의 그래프로 나타내어 레일의 처짐을 비교해 L1~L8 위치할 때  $400 \sim 500 \text{ mm}$  구간에서 레일의 y축 처짐량은  $0 \mu\text{m}$ 가 되는 것을 확인하였다. 또한  $800 \text{ mm}$  이후 구간에서 처짐량이 높아졌고 이 결과를 토대로 보상가공을 진행하였다.<sup>(7,8)</sup>

#### 4. 수직형 머시닝센터의 보상가공

유한요소 해석 결과를 통해 경사베드 구조의 램 탑입 수직형 머시닝센터에서 보완이 필요한 부분

은 콜롬베이스이다. 수직형 머시닝센터에 보상가공을 진행할 시 해석값의 결과와 같이 곡선형태로 가공이 불가능하기 때문에 결과값을 참고하여 사선으로 보상가공을 진행하였다. 보상가공은 크라운가공(경사가공)으로 진행되었으며 유한요소해석 결과값을 통해 새로운 머시닝센터를 제작할 때 시행되었다. Fig. 12와 같이 L8를 기준으로 440 mm만큼 0.04의 기울기로 보상가공을 진행하였다. Fig. 12는 40  $\mu\text{m}$ 의 높이이지만 보상가공 방법을 보여주기 위해 그림으로는 과장되게 표현하였다. 보상가공이 수행된 값을 표기하기 위해 실제 보상은  $+y$ 의 값을 가지지만 그래프상에서  $-y$

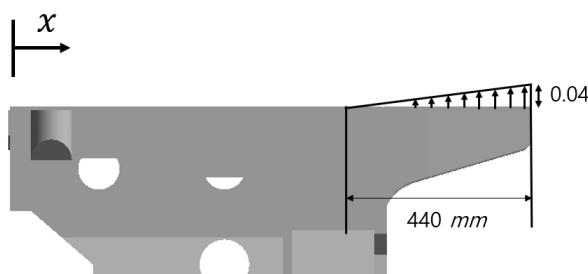


Fig. 12 Shape with compensated machining figures

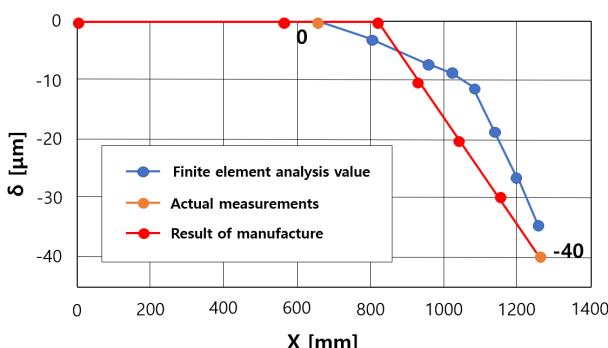


Fig. 13 Comparison of compensated processed values with Fig. 8

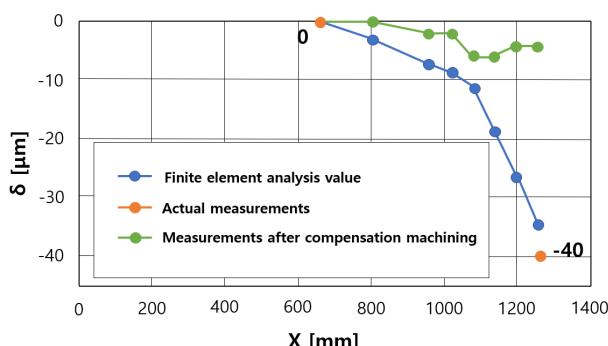


Fig. 14 Comparison of measurements and FEM after compensation processing

축으로 설정하여 Fig. 13에서 해석값과 측정값과 함께 비교하였다.

보상가공을 수행한 수직형 머시닝센터를 앞선 Fig. 4와 같이 L1~L8 위치에서 측정하여 0, 0, -2, -2, -6, -4, -4  $\mu\text{m}$ 의 처짐량을 확인하였다. 이 결과를 Fig. 14와 같이 나타내었다.

## 5. 결 론

수직형 머시닝센터가 공작물을 가공하는 작업 할 때 가장 중요한 것은 정밀도이며  $\mu\text{m}$  단위의 오차를 줄이기 위해 본 연구를 진행하였다. 수직형 머시닝센터의 콜롬베이스 위에서 움직이는 부품들의 자중으로 인해서 레일 끝단에 위치할 때 처짐량이 발생한다. 이를 ANSYS Workbench를 이용한 유한요소 해석을 통해서 파악하였으며, 레일의 보상가공 범위와 수치를 결정하였다. 레일의 보상가공을 통해서 스판들 노즈의 처짐량을 -40  $\mu\text{m}$ 에서 -4  $\mu\text{m}$ 까지 절감하였으며, 이를 통해 경사베드 구조의 램 탑업 수직형 머시닝센터의 작업 오차율을 줄이며 가공 정밀도 향상을 기대할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2022년도 한국에너지기술평가원에서 시행한 자원순환(재제조)산업 고도화 인력양성사업의 지원과 GNU 기계항공 미래인재 교육연구단의 지원을 받아 수행되었음.

## 참고문헌 (References)

- (1) Yun, T. W. and Lee, S. S., 2018, "Topology Optimization Design of Machine Tools Head," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 18~25.
- (2) Choi, J. W. and Lee, T. H., 2010, "Finite Element Analysis for Dynamic Behavior of a Machine Tool Structure Fed in Open Loop Control," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 596~602.
- (3) Choi, T. H. and Hong, S. W., 2009, "Application of CAE Technology in the Field of Machine Tool Structural Design," *Journal of the*

- Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 442~457.
- (4) Kim, M. S., Shin, Y. I. and Song, C. K., 2013, "Structural Analysis for a 70/15 ton×105 m Level Luffing Crane," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 30, No. 9, pp. 983~990.
- (5) Kim, M. S., Lee, J. C., Jeong, S. Y., Ahn, S. H., Son, J. W., Cho, K. J., Song, C. K., Park, S. R. and Bae, T. H., 2008, "Structure Evaluation for the Level Luffing Crane' Boom," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers A*, Vol. 32, No. 6, pp. 526~ 532.
- (6) Cho, J. U. and Han, M. S., 2013, "Structural Analysis on Durability of Forklift due to Opening and Closing Between Forks," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 199~205.
- (7) Shin, S. H., Kim, J. K., Song, C. K., Kim, B. K., Bae, T. H. and Kim, J. M., 2011, "Structural Evaluation of the 300 Ton Goliath Crane," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1515~1520.
- (8) Lee, J. G., Kim, S. H., Han, S. G., Shin, Y. I. and Song, C. K., 2020, "Design of a Reducer Gear for Small Electric Vehicles," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 9, pp. 116~121.