

# 공구 중심점의 변위 최소화를 위한 문형 공작기계의 크로스레일 개선 연구

이명규\*, 송기형<sup>+</sup>, 최학봉<sup>++</sup>, 이동윤<sup>+++</sup>

(논문접수일 2011. 05. 04, 심사완료일 2011. 06. 01)

## The Displacement Minimization of the tool Center Point by the Crossrail Structure Improvement of the Portal Machine

Myung-Gyu Lee\*, Ki-Hyeong Song<sup>+</sup>, Hag-Bong Choi<sup>++</sup>, Dong-Yoon Lee<sup>+++</sup>

### Abstract

General portal machine represents a distinct weak spot concerning their structural behavior because of long protruding structure components, such as saddles and rams. The weak point causes the deformation of the machine tool and consequently rises a severe machining error. The purpose of this study is to improve the structural design of crossrail in order to minimize it's distortion. Tool Center Point (TCP) was chosen as a reference point for evaluating the distortion effect of a crossrail and topological optimization was adopted as a method of structural design improvement. The displacements of TCP according to the machining positions were investigated by structural analyses for both of original crossrail design and the improved one. The comparing results showed that the displacement of TCP could be reduced about 55% maximum.

**Key Words :** Portal machine(문형 공작기계), TCP(Tool center point, 공구 중심점), Structural Analysis(구조해석), Topology optimization(위상최적화)

## 1. 서론

대형 풍력 발전기에 사용되는 수 미터급의 Yaw & Pitch 베어링은 회전과 각도를 조절하는 부품으로 베어링의 정밀도와 수명 유지를 위해 고경도의 표면 경화 열처리(HrC60)가 되어 있기 때문에 하드 터닝과 밀링, 드릴링 등의 가공 작업이 가능하도록 복합 기능을 갖춘 문형 공작기계가 요구되고 있다. 문형 공작기계는 두 개의 칼럼 위에 크로스레일이 고정되고, 새들과

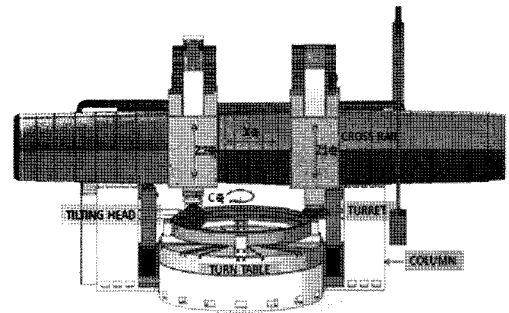


Fig. 1. 3D model of portal machine

\* 한국생산기술연구원  
+ 한국생산기술연구원  
++ (주)기흥기계  
+++ 교신저자, 한국생산기술연구원 (dylee@kitech.re.kr)  
주소: 426-910 경기도 안산시 상록구 사3동 1271-18

램이 크로스레일에 장착되어 좌우로 이동하게 된다. 램의 하부에 유니버설헤드(Universal Head), 킬팅헤드 및 터렛이 부착되어 테이블위에 고정된 공작물을 가공하도록 설계되어 있다 (Fig. 1).

고경도의 베어링을 가공하기 위한 장비는 고강성화가 요구됨에 따라 구조물의 중량이 증가하게 되고 변형이 발생하여 위치 정밀도의 왜곡을 초래하게 된다. 특히 램과 같이 길게 돌출된 무거운 구조물은 공작기계의 구조적 변화를 심화시켜 가공정밀도를 저해하기도 한다<sup>(1,2)</sup>. 왜곡현상과 구조적 변화를 방지하기 위해 구조물의 루프강성을 고려하여 구조적으로 취약한 부위를 개선하는 설계 연구와 크로스레일의 처짐 오차를 보상하는 연구가 이루어진바 있다<sup>(3,4)</sup>. 본 논문에서 다루고 있는 문형 공작기계에서는 돌출된 새들과 램의 자중(4.4ton)에 의해 크로스레일에 뒤틀림이 발생하게 되는데, 이러한 뒤틀림을 방지하기 위해 일반적으로 사용하는 방법인 균형 무게추를 사용하게 되면 결과적으로 무게가 2배 증가함과 동시에 구조적으로 취약점이 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 균형무게추의 사용을 배제하고 크로스레일 자체의 구조 개선을 통하여 뒤틀림을 최소화하고자한다.

## 2. 문형 공작기계의 구조해석

### 2.1 크로스레일 설계

Case 1 모델은 주물 후 흠 제거를 위한 hole이 상/하면부 2열과 후면부 1열이 있으며, Y축과 Z축 단면에 리브는 길이와 두께가 동일하며 뒤틀림과 처짐을 방지하기 위하여 모서리 부분에 45° 방향으로 리브를 설계하였다(Fig. 2).

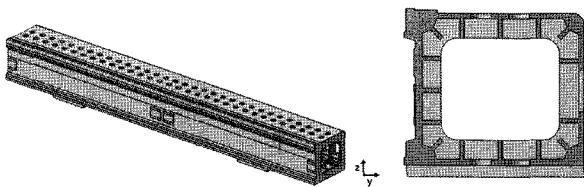


Fig. 2. 3D Model and cross section(Y-Z) of Case 1

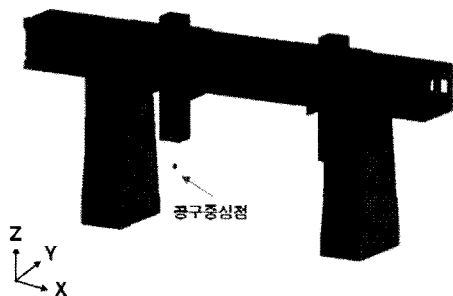


Fig. 3. FEM Model7

Table 1 Mesh result and Weight for each part

	Element	Node	Weight (ton)
Case 1	100,568	189,900	26.1
컬럼(좌)/(우)	21,167	34,560	20.4
새들(좌)/(우)	123,176	201,414	2.5
램(좌)/(우)	72,742	127,705	1.9

### 2.2 변위 판단 기준점 선정 및 구조해석

새들과 램의 자중에 의해 크로스레일에 발생하는 뒤틀림의 영향을 분석하기 위하여 램의 끝단으로부터 650mm 떨어진 위치에 공구 중심점을 선정하고 구조해석을 수행하여 공구 중심점의 변위를 비교하였다(Fig. 3).

문형 공작기계의 구조해석을 위해서 10절점 사면체 요소(10-tetra mesh)를 사용하여 유한요소 모델링을 하였고 Table 1에 요소 수와 절점 수를 나타내었다.

해석에 사용된 경계조건으로는 칼럼의 바닥면을 회전과 이동이 없도록 구속하였고, 하중조건은 구조물 전체에 대하여 중력 가속도를 적용하였다. 해석에 사용된 재료는 회주철(GC300)이며, 물성치는 탄성계수 90GPa, 포와송 비 0.25, 밀도 7,250 Kg/m<sup>3</sup>이다.

### 2.3 가공 위치에 따른 공구중심점(TCP) 변위

가공 위치에 따른 크로스레일의 뒤틀림 및 그에 따른 공구

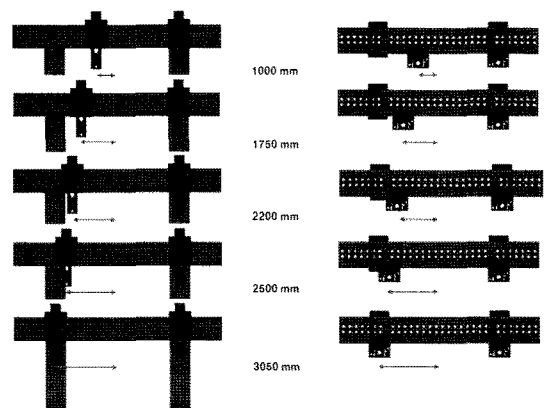


Fig. 4 Machining position of TCP - case 1

Table 2 TCP displacement(μm) of Case 1

	X	Y	Z	ISO
1000mm	-40.2	52.5	-117.1	134.5
1750mm	-50.0	43.8	-84.8	107.7
2200mm	-43.4	27.6	-58.4	77.8
2500mm	-33.1	26.3	-48.1	64.0
3050mm	-12.3	26.1	-38.5	48.1

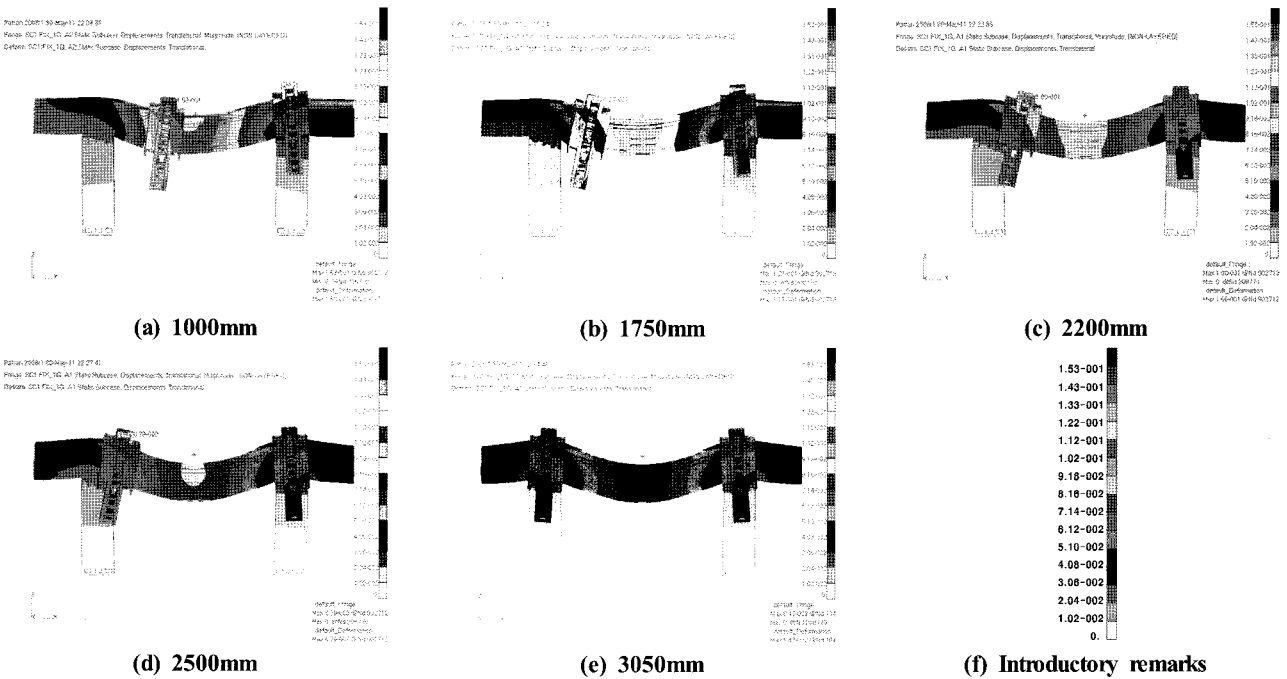


Fig. 5 Displacement of portal machine(ISO) - case 1

가공 위치에 따른 공구중심점(TCP) 변위 - Case 1

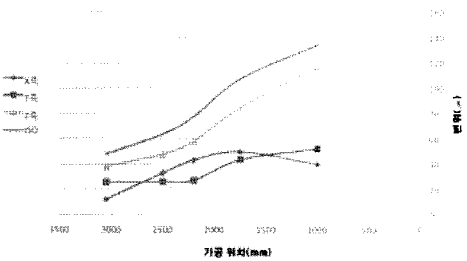


Fig. 6 3axis and ISO displacement of TCP - case 1

위치의 변화를 분석하기 위하여 Fig. 4와 같이 새들과 램의 위치를 크로스레일의 중심으로부터 각각 1000mm, 1750mm, 2200mm, 2500mm, 3050mm 이격된 유한요소 모델을 만들었다. Fig. 5는 가공위치에 따른 공구중심점(TCP)의 변위를 구하기 위해 구조해석을 수행한 결과이며, 왼쪽의 새들과 램이 가공 위치에 있을 때 구조물의 변위 분포를 보여주고 있다. 그리고 Fig. 5로부터 구한 공구중심점의 변위 결과를 Table 2와 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 그래프 중 크로스레일의 뒤틀림에 영향을 받는 Y축 방향의 결과를 살펴보면 새들과 램이 칼럼 앞에서 위치한 3050mm와 칼럼과 근접한 위치인 2500mm, 2200mm에서  $26\mu\text{m} \sim 28\mu\text{m}$ 로 변위 결과가 비슷하게 나타났고, 크로스레일의 중심에 가까워지는 1750mm와 1000mm에서는 각각  $43.8\mu\text{m}$ 와  $52.5\mu\text{m}$ 로 나타났다. 공구가 가공을 위해 칼럼 앞에서 크로스레일 중심부로 이동하게 되면 Y축 방향에 대해서 약  $26.4\mu\text{m}$ 의 변위차가 발생하게 된다.

## 2.4 크로스레일의 구조개선 필요성

크로스레일 Case 1모델의 가공 위치에 따른 공구중심점(TCP) 구조해석을 통하여 크로스레일에 뒤틀림이 발생함을 확인하였고, 이는 크로스레일 전면에 설치된 새들과 램의 자중(4.4ton)에 의해 발생하는 현상으로 판단된다. 크로스레일의 뒤틀림 발생은 공구의 위치 정밀도에 큰 영향을 미치므로 각 축에 대한 변위의 보정값을 찾아 위치정밀도를 맞추는 보정작업이 필수적이나 본 연구에서 다루는 복합 수직선반은 Y축 이동이 불가능한 고정 구조로 되어 있어 보정이 어려운 상황이므로 뒤틀림 발생을 개선하기 위해서는 크로스레일 자체의 구조적인 개선이 필요하다.

## 3. 크로스레일 단순모델의 위상최적화

크로스레일 Case 1 모델의 형태와 규격을 토대로 크로스레일 1/2 모델을 만들고(Fig. 7(a)), 새들과 램의 무게에 해당하는 4.4ton이 C점에 작용할 때 크로스레일에 미치는 영향을 알아보기 위해 구조해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료는 회주철(GC300)이며, 경계조건으로는 칼럼 연결부를 회전과 이동이 없도록 구속하였고, 중심부는 대칭구조이므로 X축 방향에 대해서만 이동이 없도록 구속하였다. 구조해석 결과 Y축 변위는 새들과 램의 무게중심에 해당하는 C점에서  $-4.9\mu\text{m}$ , 크로스레일 상단부인 A점에서  $-14\mu\text{m}$ , 크로스레일 하단부인 B점에서  $4.3\mu\text{m}$ 의 변위가 발생함을 확인하였다(Fig. 7(b)).

위상최적화는 상용화 프로그램인 Altair사의 Optstruct 10.0

을 사용하였으며, 구조해석으로 구한 변위 결과를 토대로 위상 최적화를 위한 경계조건을 설정하였다<sup>(5)</sup>. 첫 번째 제한조건은 Y축 변위의 최대값(A)과 최소값(B)의 절대값 차가 0.5 $\mu$ m보다 작은 값이 나오도록 하였다. 두 번째 조건은 mass point 변위(C)가 Y축 방향으로 -0.5 $\mu$ m를 넘지 않게 제한 조건을 설정하였다(Fig. 8(a)).

$$|A'-B'| < 0.5\mu m \quad (1)$$

$$C > -0.5\mu m \quad (2)$$

다음으로 크로스레일의 외형과 칼럼 연결부위를 비설계 영역으로 설정하였고, 내부 공간을 설계영역으로 설정하였다. 비설계영역(non-design domain)이란 최적화 수행 시 설계 변수에 의한 형상의 변화가 없는 영역을 의미하며, 설계 영역(design domain)이란 위상 최적화를 통하여 형상이 변화되는 영역을 의미한다(Fig. 8(b)).

비설계 영역인 크로스레일의 외형과 칼럼 연결부위는 형상의 변화가 없고, 설계 영역으로 정의했던 내부 공간에서는 크로스레일 상단부와 앞면을 제외한 나머지 영역에서 구조물이 제거되었다. 이는 뒤틀림에 대해 “ $\pi$ ” 또는 “ $\pi$ ”형태가 뒤틀림을 방지하는 구조임을 의미한다(Fig. 9).

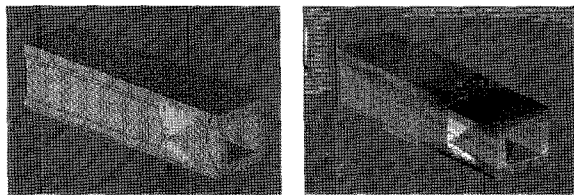


Fig. 7 (a) Boundary condition & (b) result of FEM

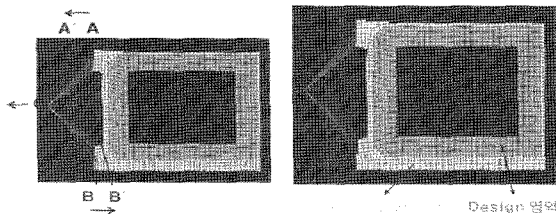


Fig. 8 (a) constraints and (b) design/ non-design domain

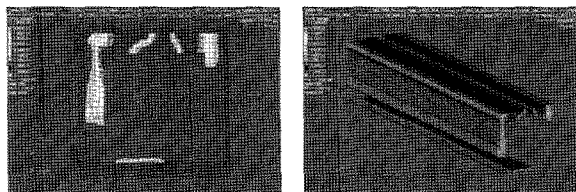


Fig. 9 Topology optimization of crossrail

## 4. 크로스레일의 최적형상 설계

### 4.1 최적형상을 적용한 크로스레일 설계

Case 2 모델은 주물 후 흠 제거를 위한 hole이 상면부 4열, 후면부 3열이 있으며, Y축과 Z축 단면에 대하여 ‘ $\pi$ ’자 형태로 단면 두께를 보강하였으며, 하단부는 아치형으로 설계하였다.

### 4.2 가공 위치에 따른 공구중심점(TCP) 변위

Case 2 모델의 뒤틀림 개선 여부를 분석하기 위하여 크로스레일 중심으로부터 1000mm, 1750mm, 2200mm, 2500mm, 3050mm 이격된 유한요소 모델을 만들었고, Case 1의 해석과 동일한 조건으로 구조해석을 수행하였다. Case 2 모델은 10절점 사면체 요소(10-tetra mesh)를 사용하였으며, 요소 수는 224,836개, 노드 수는 423,602개이며 무게는 29.5ton이다.

Fig. 11은 공구중심점의 변위를 구하기 위한 구조해석 결과이며 Fig. 5와 같은 방식으로 나타내었다. Fig. 11로부터 구한 공구중심점 변위를 Tabel 3과 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서 구조해석으로 구한 공구중심점(TCP)의 변위 결과 중 Y축 변위는 새들과 램이 컬럼과 근접한 위치인 3050mm에서 25.2 $\mu$ m, 2500mm에서 22.1 $\mu$ m, 2200mm에서 20.6 $\mu$ m, 1750mm에서 24.1 $\mu$ m, 1000mm에서는 23.8 $\mu$ m로 나타났다. 즉 공구가 가공을 위해 컬럼에서 크로스레일 중심부 사이를 이동할 때 Y축에 대해서 20.6 $\mu$ m부터 25.2 $\mu$ m 사이의 4.6 $\mu$ m의 범위 내에서 움직임을 알 수 있었다.

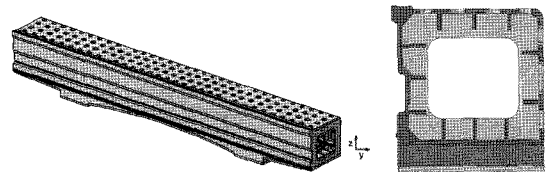


Fig. 10 3D Model and cross section(Y-Z) of Case 2

Table 3 TCP displacement( $\mu$ m) of Case 2

	X	Y	Z	ISO
1000mm	-36.6	23.8	-112.0	120.2
1750mm	-41.9	24.1	-81.7	94.9
2200mm	-36.4	20.6	-62.0	74.8
2500mm	-29.5	22.1	-53.3	64.8
3050mm	-14.2	25.2	-45.2	53.7

Table 4 TCP displacement( $\mu$ m) of Case 1 & Case 2

	Case 1	Case 2	향상 정도
X	-40.2	-36.6	9%
Y	52.5	23.8	55%
Z	-117.1	-112.0	4%
ISO	134.5	120.2	10%

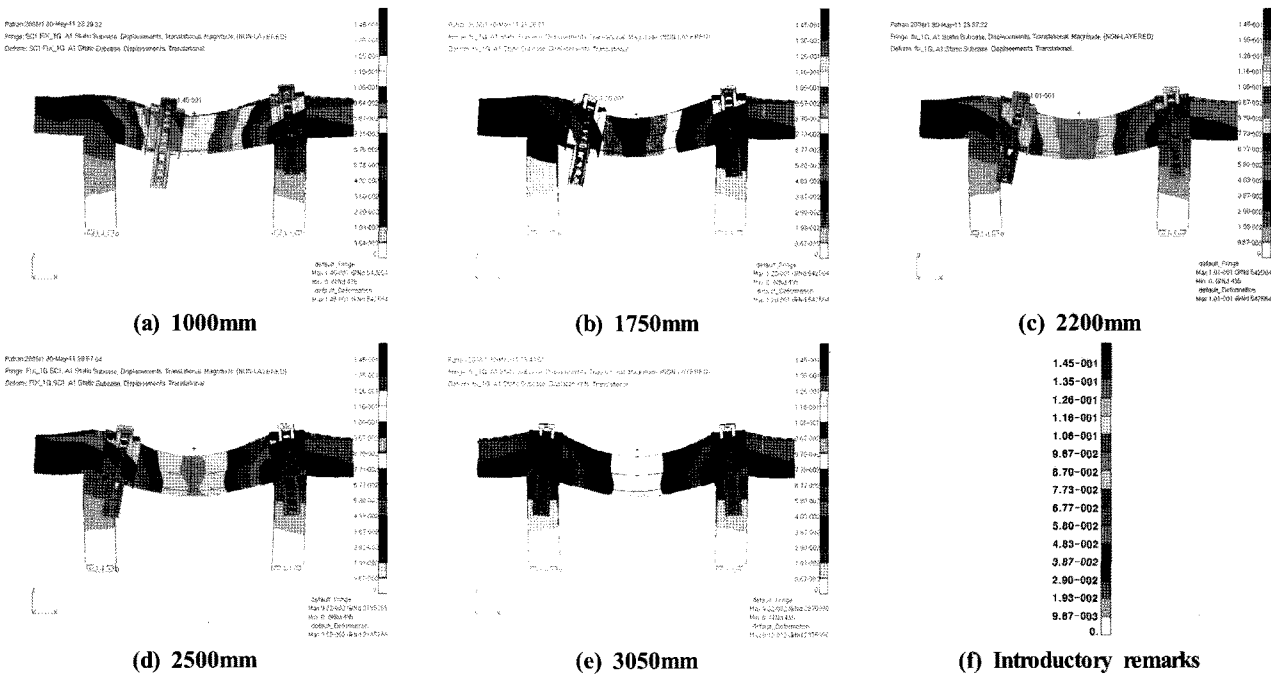


Fig. 11 Displacement of portal machine(ISO) - case 2

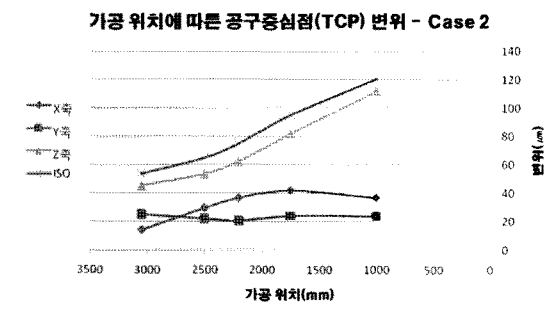


Fig. 12 3axis and ISO displacement of TCP - case 2

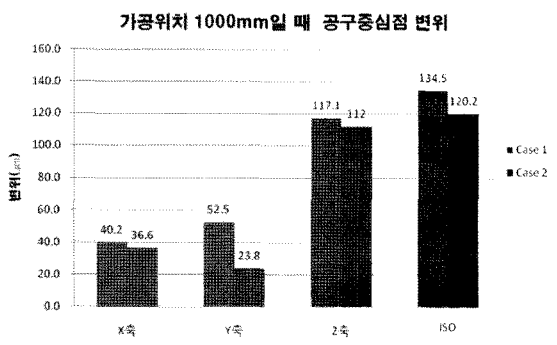


Fig. 13 TCP displacement at Machining point - 1000mm

### 4.3 Case 1과 Case 2의 공구중심점(TCP) 변위 비교

Fig. 13은 가공 위치가 1000mm에서의 공구중심점 변위 비교 그래프이며 Case 1 모델의 Y축의 공구중심점(TCP) 변위가

52.5 $\mu\text{m}$ 로 가장 크게 나타났다. 반면 Case 2 모델의 경우는 가공 위치가 1000mm일 때 공구중심점(TCP)의 Y축 변위는 23.8 $\mu\text{m}$ 로 나타났다. Case 1과 Case 2의 X축과 Z축의 변위차는 3.6 $\mu\text{m}$ 과 5.1 $\mu\text{m}$ 로 큰 변화가 없으나 Y축의 변위 차는 28.7 $\mu\text{m}$ 로 Case 2 모델이 약 55% 개선되었음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문은 풍력발전기에 사용되는 대형 베어링을 하나의 공작기계에서 제작하기 위해 개발 중인 문형타입의 대형 복합수직선반의 설계단계에 있어 가공정밀도에 영향을 미치는 크로스스레이일의 뒤틀림을 최소화하기 위한 최적 설계안 도출에 대해서 다루고 있으며, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Case 1 모델에서 1000mm와 3050mm의 Y축 변위차는 26.4 $\mu\text{m}$ 로 뒤틀림이 발생하고 있음을 확인하였으나, 수직선반의 구조상(Y축 고정) 일반적인 가공오차 보상방법을 적용할 수 없어 크로스스레이일의 자체적인 구조 개선이 필요함을 확인하였다.
- (2) 위상최적화를 수행한 결과, 크로스스레이일의 상단부와 앞면을 제외한 나머지 영역에서 구조물이 제거됨으로써 “ $\cap$ ” 또는 “ $\sqsubset$ ”형태가 뒤틀림을 방지하는 구조임을 알 수 있었다.
- (3) 위상최적화 결과를 적용한 Case 2 모델의 1000mm와 3050mm의 Y축 변위차는 4.6 $\mu\text{m}$ 로 나타났으며, 가공 위치가 1000mm일 때 두 모델의 Y축 변위를 비교해 본 결과

Case 2 모델이 Case 1보다 약 55% 개선되었음을 확인할 수 있었으며, Case 2 모델에 적용된 “ㄷ”자 형태의 보강이 뒤틀림 개선에 효과가 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천기술개발사업인 “풍력 발전기 부품가공용 복합수직선반 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Brecher. C., Manoharan. D., and Klein. W., 2010, “Active Compensation for Portal Machines,” *Production Engineering*, Vol. 4, No. 2-3, pp. 255 ~ 260.
- (2) Brecher. C., Manoharan. D., and Stephan Witt. E. W. E., 2008, “Structure Integrated Adaptronic Systems for Machine Tools,” *Production Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 219 ~ 223.
- (3) Choi. Y. H., Jang. S. H., Kim. I. S., Cho. Y. J., and Oh. C. W., 2006, “Structural Layout Design Alternative of a 5-Axes Multi-tasking Machine Considering Loop Stiffness,” *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 226 ~ 231.
- (4) Lee. M. K., Park. J. B., Kim. N. S., Min. D. L., and Lee. E. S., 2010, “Deflection Measurement and Analysis of the Cross Rail for Gantry type Machine Tools,” *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference*, pp. 78 ~ 82.
- (5) Optistruct, 2010, *Optistruct 10.0 Reference*, Altair Engineering Inc.