

## 문형 공작기계의 Zig-Zag 오차 분석

이응석\*† · 이승범\*\* · 김기환\* · 민들레\* · 박종범\* · 박민수\* · 진이림\* · 김태성\*\*\*

\* 충북대학교 기계공학부, \*\* 충북대학교 정밀기계공학과, \*\*\* (주) 남선기공

### Analysis of Zig-Zag Error in Gantry Type Machine

Eung Suk Lee\*†, Seung Bum Lee\*\*, Gi Hwan Kim\*, Deul Le Min\*, Jong Bum Park\*,  
Min Su Park\*, E Lim Jin\* and Tae Sung Kim\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Precision Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

\*\*\* Namsun Machinery Corporation

(Received June 16, 2014 ; Revised August 27, 2014 ; Accepted November 22, 2014)

**Key Words:** ANSYS Analysis(유한요소해석), Gantry Type Machine(문형공작기계), Laser Interferometer(레이저간섭계), Zig-Zag 오차(지그재그 운동)

**초록:** 대형 5축 문형공작기계는 Gantry가 bed를 따라 절삭, 급송 이송하면서 가공을 수행 한다. 가공을 수행하는 중에 발생하는 오차(Zig-Zag)원인으로써 1) 양쪽 X축 이송모터의 위치오차 제어차이 2) 양쪽 Column의 무게차이에 의해 발생하는 마찰력에 대한 오차 3) spindle 회전력에 따른 오차 3가지의 원인이 있다. 3가지 오차원인을 분석하여 문형공작기계성능을 향상시키기 위해 연구를 진행 하였다. 연구결과로는 첫 번째로 양쪽 Column이 동일한 무게를 갖는 Gantry 구조에서 한쪽 축의 무게를 변경함으로써 마찰력이 미치는 영향을 확인하였다. 두 번째로 우리는 스피들 회전이 미치는 영향을 해석 및 실험하였다. 그리고 우리는 스피들 회전이 Gantry이송에 미치는 영향을 확인하였다.

**Abstract:** A large five-axis gantry-type machine performs cutting operations by moving the gantry, along with a bed. During operation, there are three sources of position (zig-zag) errors: 1) the position difference between two control motors on the X axis, 2) friction difference from the different column weights, and 3) torque of the rotating spindle. This study improved the performance of a gantry-type machine by analyzing these three error sources. We changed the mass of a column in the gantry structure and measured the effect on the friction result. We also studied the spindle torque influences on the movement performance of the gantry in relation to the spindle rotation.

### 1. 서 론

공작기계산업이 발전하여야만 제작 및 가공기술이 발달할 수 있다. 대형 5축 문형공작기계는 Gantry가 bed를 따라 절삭, 급송 이송하면서 가공을 수행한다. 풍력발전기의 블레이드, 선박용 대형 프로펠러, 항공기 부품들을 가공하기 위한 대형 Gantry 이송 형 5축 복합 가공기이다. 일반적인 대형 5축 가공기는 테이블 이동 형으로서 설치공

간을 많이 차지하는 단점을 갖고 있다. 따라서 Gantry 이송 형 5축 가공기를 개발 한다면, 설치공간이 테이블 이동 형에 비하여 1/2로 축소될 뿐만 아니라, 가공 길이방향에 대한 확장이 용이하여 테이블 이동 형보다 저가로 제작이 가능하다.<sup>(1)</sup> 가공을 수행하는 중에 발생하는 오차의 원인으로써 1) 양쪽 X축 이송모터의 제어 차이에 의해 발생하는 오차 2) 양 지지대의 무게차이에 의해 발생하는 마찰력에 의한 오차 3) 스피들 회전력에 따른 오차 3가지의 원인이 있다. 3가지의 오차원인을 측정하기 위해 Gantry 이송장치를 설

† Corresponding Author, eungsuk@cgnu.ac.kr

계 제작하였다.<sup>(2)</sup> 2012년도 한국정밀공학회지 제 29권 2호의 논문인 “Gantry Type 대형 공작기계의 Cross Rail 설계 및 좌우 이송 편차에 관한 해석”에 대한 논문에서 Spindle의 회전이 Gantry 구조에 미치는 영향을 더욱 연구를 진행하여 문형 공작기계의 이송정밀도를 높이기 위한 연구로 진행되었다.

## 2. Gantry 공작기계의 측정 및 분석

### 2.1 Gantry 이송오차 측정 실험

본 실험의 목적인 Zig-Zag 오차를 측정하기위해 Gantry 이송 장치를 설계, 제작하였다. Fig. 1은 제작한 Gantry 이송 장치의 사진이며 양 지지대는 볼 스크루 와 LM가이드에 의해 직선 이송되고, 회전 동력원은 AC Servo Motor를 사용하였다. 이송 제어 시스템으로는 4축 제어보드 PCI-N404를 사용하였고, 구간별 이송거리와 속도제어가 가능하도록 Microsoft Visual C#을 이용하여 소프트웨어를 구성하였다. 실험에서 사용된 레이저 간섭계는 Renishaw사의 ML10 model을 사용하였으며, 변위측정 분해능 1nm의 해상도를 지니고 있고 인터페이스 카드를 통하여 컴퓨터와 최대 50kHz로 통신한다. Table 1에 레이저 간섭계의 사양을 나타내었다. 실험은 Fig. 1과 같이 지지대 하단부에 반사경을 설치하고 레이저를 조사하여 Gantry 이송 시 지지대 하단부의 이송 시 위치오차를 측정하였으며, 각 지지대를 X1, X2 축으로 정의하였다.

#### 2.1.1 X1, X2 축 개별 이송 시 각 축의 위치오차 측정

Gantry 이송 시 발생하는 Zig-Zag 오차의 측정

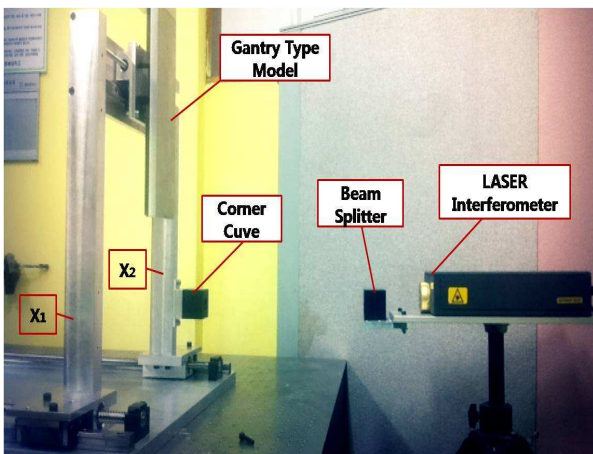


Fig. 1 Measurement system of Gantry moving type model

에 앞서서 X1, X2 각 축의 위치 결정 정밀도를 알아보기 위해 크로스 레일이 지지대에 체결되어 있지 않은 상태에서 각 지지대를 이송시켜 위치 오차를 측정하였다. Fig. 2는 X1축의 측정사진이다. X1축을 15mm/s의 속도로 총 435mm를 이송시켰으며 X1축의 지지대 하단부에 반사경을 설치하고 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다. 15mm 간격으로 위치오차를 측정하여 30개의 데이터를

Table 1 Specifications of Renishaw-ML10 Laser Interferometer

Item	Description
Range	40m
Laser frequency accuracy	0.05ppm
Resolution	0.001μm
Max. count rate	50KHz
Measurement speed	60m/min

Table 2 Experimental model of 5-axes Gantry type machine

Part	Length(mm)
Guide Rail	820
Column	480
Cross Rail	427
Z axis	362

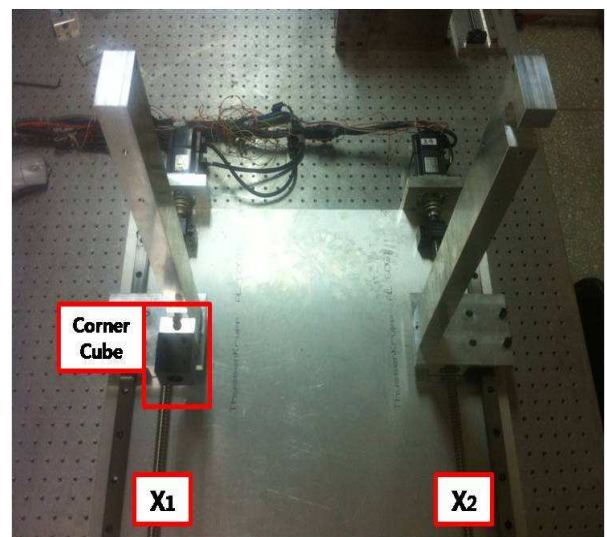
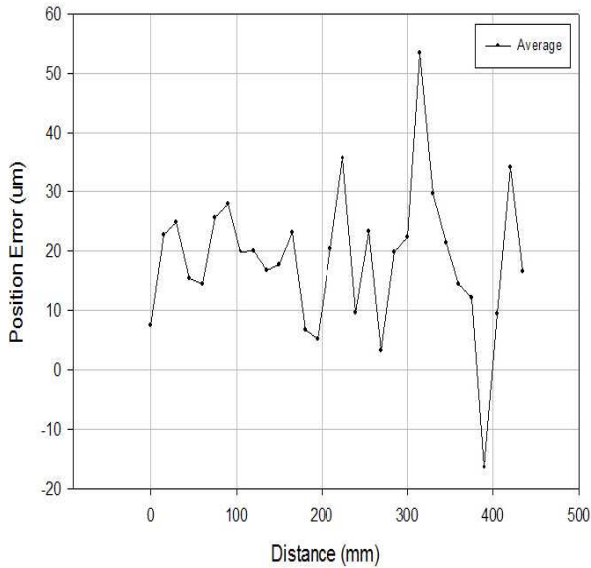
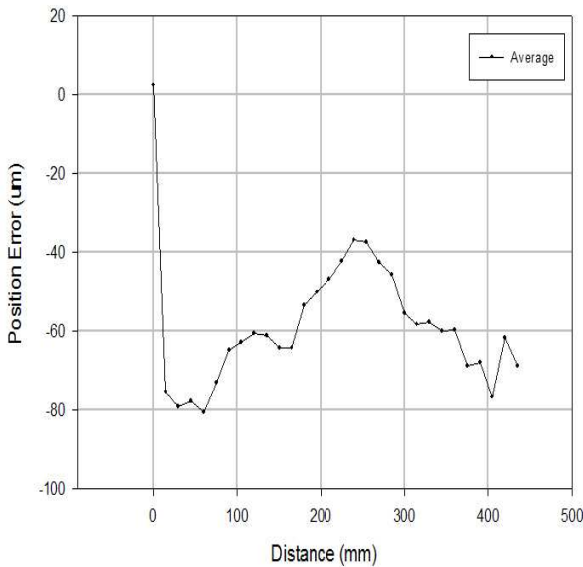


Fig. 2 Measurement of X1 axis position error



(a) X1 axis measured 6 times average



(b) X2 axis measured 6 times average

Fig. 3 Measured data of X1, X2 axis position error

얻었으며 6회 반복 측정하였다. Fig. 3(a)에 6회 측정 평균 데이터를 그래프로 나타내었다. X1축과 동일한 측정조건으로 X2축의 위치오차를 측정하여 Fig. 3(b)에 6회 측정 평균 데이터의 그래프를 나타내었다. 측정결과를 분석해보면 X1축의 단방향 이송의 6회 반복 측정을 통한 위치오차의 반복정밀도 값은  $18\mu\text{m}$ 로써 측정 시 마다 위치오차 값의 편차가 크게 측정되었다. 그 원인은 각 요소 부품들의 가공 및 조립오차가 있으며 실제로 볼 스크루와 제작된 Gantry 모델과의 조립오차에 의해 X1축의 진직도 오차가 발생하였을 것이다. X2 축 단방향 이송의 6회 반복

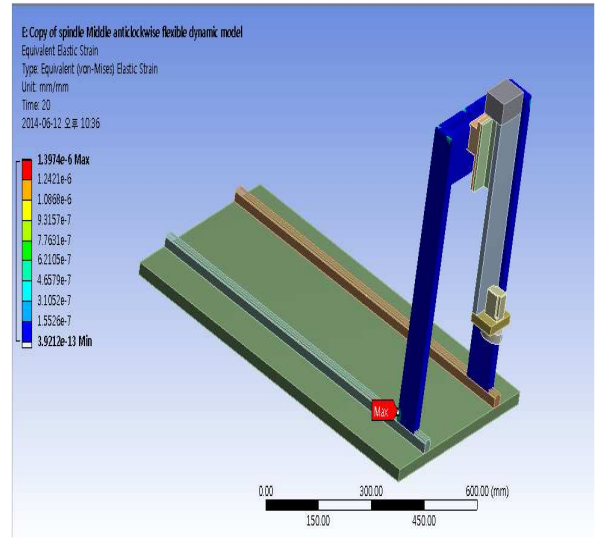


Fig. 4 Analysis of the Zig-Zag different weight in Gantry machine at a column

측정을 통한 위치오차의 반복정밀도는  $6.8\mu\text{m}$ 로써 Fig. 3(b)의 그래프를 보면 위치오차의 편차가 적은 것을 확인하였다. 각 축의 위치오차의 발생 원인으로서는 볼 스크루의 피치가공 오차와 백래쉬 오차, 구동축의 가속 구간에서 발생하는 슬립 현상, 각 장치들의 조립오차 등이 있으며 이는 크로스 레일이 체결된 상태의 Gantry 이송에서 Zig-Zag 오차 발생의 원인이 될 것이다.

2.1.2 크로스 레일 체결 후 Gantry 이송시 X1, X2 축의 위치오차 측정

Gantry 이송 시 Zig-Zag 오차를 확인하기 위해 X1, X2 축의 양 지지대가 크로스 레일을 지지한 상태로 Gantry의 이송 시 각축을 측정하였다. X1 축은 Main 모터, X2 축은 Slave 모터를 정의를 한다. Gantry를  $15\text{mm/s}$ 의 속도로 총  $435\text{mm}$ 를 이송시키고 각 축의 지지대 하단부에 반사경을 설치하고 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다.  $15\text{mm}$ 간격으로 위치오차를 측정하여 30개의 데이터를 얻었으며 5회 반복 측정하였다. X1, X2 축의 5회 측정 반복정밀도는 각각  $8\mu\text{m}$ ,  $6.5\mu\text{m}$ 로 각 축의 지지대에 크로스 레일이 체결된 상태로 이송함에 따라 5회 측정한 위치오차의 편차가 감소하였음을 확인하였으며, 각 축의 5회 측정 평균 데이터 그래프인 Fig. 6(a)에서 이송 초기에는 X1축이 X2축에 끌려가다가 점점 앞서나감을 보였고, 측정 위치에서의 X1, X2 축 각각의 위치오차 차이의 변화로 Zig-Zag 오차가 발생한다.

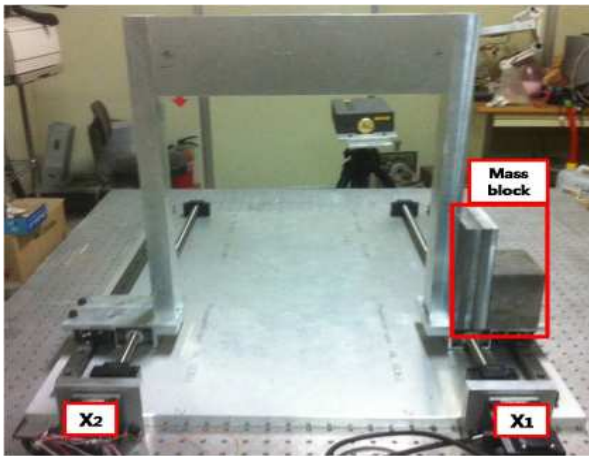


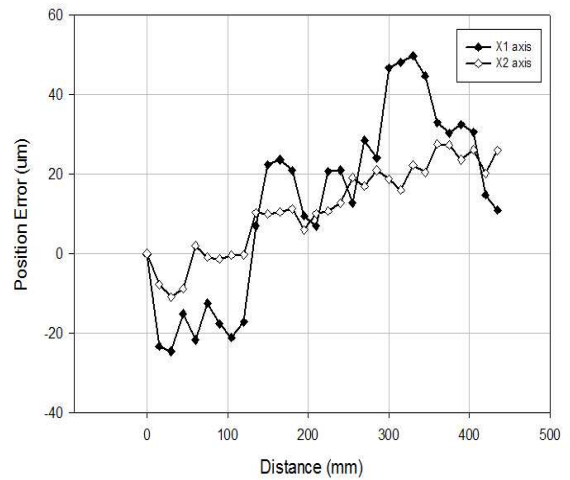
Fig. 5 Measurement of the Gantry moving with mass block at the right column (8kg)

2.2 양쪽 지지대 무게차이 분석

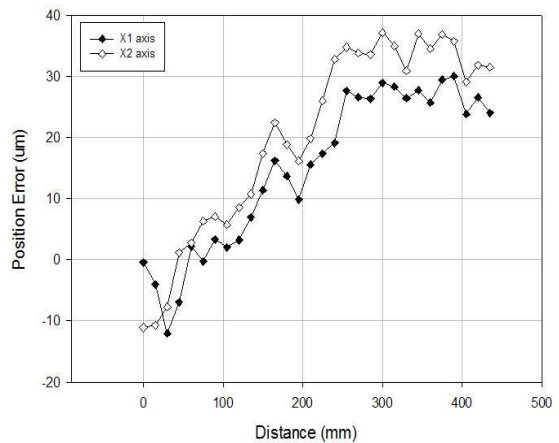
Gantry의 이송 시 각도 오차 및 양쪽 지지대의 무게차이로 인한 좌우 지지대의 이송오차가 Zig-Zag 오차를 일으키게 된다. Fig. 4는 양 지지대의 무게를 달리하여 해석한 것이다 X1축의 무게는 2kg, X2축은 3kg로 모델링하여 양 지지대의 무게차이를 두고 이송속도 10mm/s를 주어 해석하였다. 최대 변형률  $1.3974e^6\text{mm/mm}$ 가 X1축 지지대하단에 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 4는 양 지지대의 무게를 달리하여 해석한 것이다. X1축의 무게는 2kg, X2축은 3kg로 모델링하여 양 지지대의 무게차이를 두고 이송속도 10mm/s를 주어 해석하였다. 최대 변형률  $1.3974e^6\text{mm/mm}$ 가 X1축 지지대하단에 발생하는 것을 확인하였다.

2.2.1 Gantry 이송 시 무게 변화에 따른 양쪽 지지대 위치 오차 측정

Gantry 이송 시 각 축에서 발생하는 마찰력에 의해서도 Zig-Zag 오차가 발생할 수 있다. 실험에서는 각 축이 동일한 마찰이송장치를 갖는 실험에서는 각 축이 동일한 마찰이송장치를 갖는 Gantry에서 한 쪽 지지대의 무게를 변경하여, Gantry 이송 시 위치오차를 측정함으로써 Zig-Zag 오차에 대한 마찰력의 영향을 알아보는 실험을 하였다. Fig. 5와 같이 X1축에 8kg의 추를 추가하여 측정하였다. Gantry 이송 시 위치오차를 측정하여 Zig-Zag 오차에 대한 마찰력의 영향을 알아보았다. 각 축의 5회 측정 평균 데이터 그래프인 Fig. 6(b)에서 X2축이 6 $\mu\text{m}$ 가 X1축보다 앞서서 이송되는 것을 확인하였다. 이는 무게를 추가함



(a) Without mass block



(b) With mass block

Fig. 6 X1, X2 axis position error (Gantry moving with mass block, 8kg)

에 따라 X1축의 볼 스크루 및 LM가이드의 마찰력이 증가하여 이송 시 마찰력이 적은 X2축에 끌려가는 것으로 볼 수 있다. 따라서 양 지지대에 무게차이를 두어 설계하여 Gantry 이송 시 한쪽 지지대가 일정한 거리로 이끌려가는 운동을 하게 된다면 그 거리를 NC제어기에서 위치오차 보상값으로 적용할 수 있을 것이다.<sup>(3)</sup>

2.3 스피들 회전을 고려한 오차

2.3.1 스피들 회전을 고려한 오차 해석

Gantry 이송 시 발생하는 Zig-Zag 오차와 스피들이 회전을 하면서 이송 시 발생하는 Zig-Zag 오차를 Fig. 7과 같이 ANSYS WORKBENCH를 이용하여 해석하였다. Fig. 7은 문형공작기계의 실제 모델을 모델링한 것을 사용하였다. Gantry 가속도  $600\text{mm/s}^2$  스피들은  $300\text{rad/s}^2$ 의 회전을 주어 해석한 결과 스

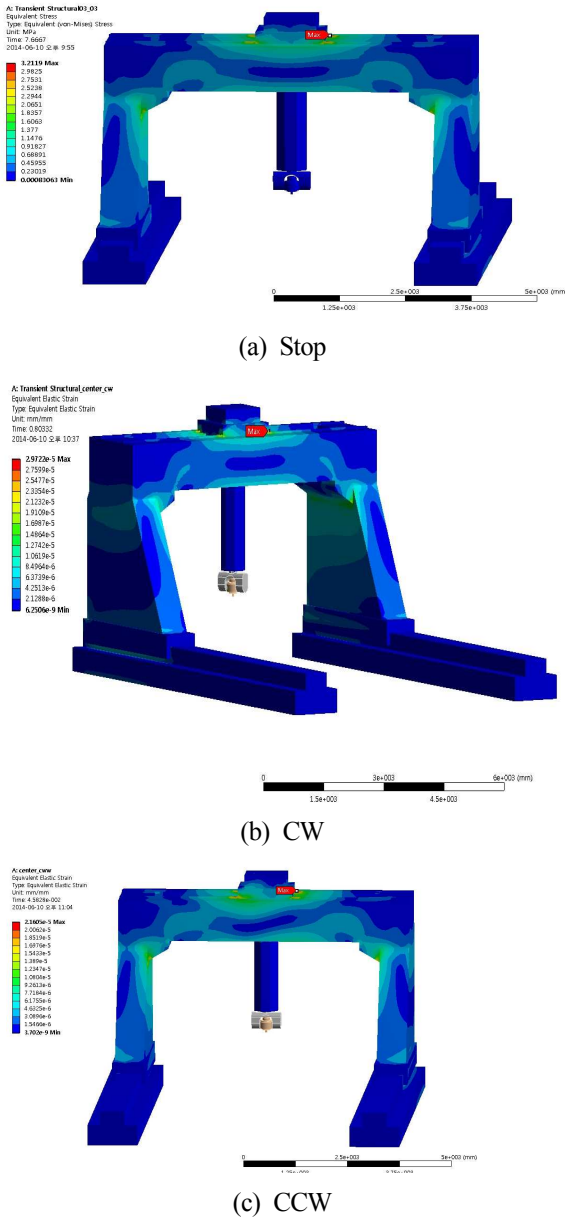


Fig. 7 ANSYS Analysis for Gantry type machine with maximum strain

핀들이 정지하였을 때 최대 변형률은  $2.4e^{-5}mm/mm$ , 시계 방향은  $2.9e^{-5}mm/mm$ , 반 시계방향은  $2.1e^{-5}mm/mm$ 으로 확인되었다.

2.3.2 스피들 회전을 고려한 실험

Fig. 8은 레이저 간섭계를 이용하여 문형공작기계에서 발생하는 오차를 확인하기 위하여 그림 Fig. 8과 같이 실험 장치를 제작하였다. 본 실험에서 사용된 레이저 간섭계는 Renishaw사의 XL-80 model을 사용하였으며 사양은 분해능이 1nm 측정 속도는 4m/s 이다. 스피들의 회전을 포함한 오차를 보

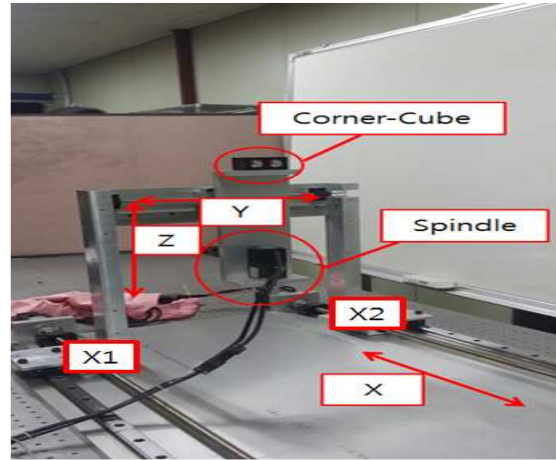


Fig. 8 Experimental model of 5-axes Gantry type machine

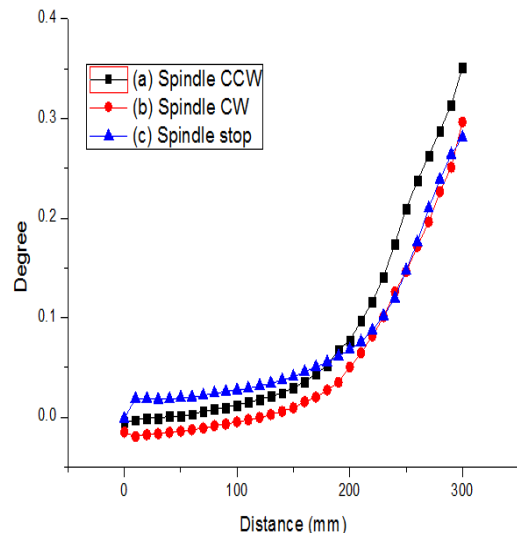


Fig. 9 Zig-Zag error measurement for spindle rotation by Laser Interferometer

기 위하여 Fig. 8과 같이 Z축을 추가 제작을 하고 상단에 반사경을 부착하여 실험하였다.<sup>(4)</sup> Fig. 8을 보면 X1축이 Main축이고 X2축은 slave축이다. 스피들의 회전이 고려된 Zig-Zag 오차를 측정하기 위하여 Z축 하단에 스피들을 부착을 하였다. Fig. 9는 레이저 간섭계를 이용하여 측정한 data를 평균화 하여 그래프로 나타내었다. 실험에서는 스피들을 시계 방향, 반시계방향 및 스피들을 정지를 한 후 측정하였다. Fig. 9는 Gantry의 이송거리는 300mm, 이송 속도는 10mm/s로 측정하였다. 초기에는 스피들이 정지하였을 때 Zig-Zag 오차가 발생을 하였고 200mm 이송 후 시계방향의 Zig-Zag 오차가 적어지는 것을 볼 수 있고 반시계방향의 Zig-Zag 오차가 더욱 커져 스피들의 회전이 Gantry이송 시 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

### 3. 결론 및 향후 연구

Gantry 이송 시 이송오차, 마찰력에 의해 Zig-Zag 오차가 생기는 것을 확인하였고, 무게차이에 의해 오차가 생기는 것을 확인하였다. 실제 제작 시 정량적인, 무게차이가 큰 차이가 없으므로 이 효과는 무시해도 될 것으로 판단된다. 스피들 회전이 포함된 경우 스피들 회전의 효과는 적지만 Zig-Zag 오차에 영향이 있다. 가공 시 시계방향, 반시계 방향의 고려가 필요한 것으로 판단되었다. 이러한 Zig-Zag 오차는 레이저 간섭계를 이용하여 측정가능하며, 이 측정 오차를 보상하게 되면 문형공작기계의 이송특성이 향상하면서 가공 정밀도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 문형 5축 가공기의 Zig-Zag 오차를 분석하여 문형 5축 공작 기계의 정밀도를 높여주는 연구를 진행 할 것이다.

### 후 기

이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work

was supported by the research grant of Chungbuk National University in 2013).

### 참고문헌 (References)

- (1) Jang, S. H., Choi, Y. H., Kim, S. T., An, H. S., Choi, H. B. and Hong, J. S., 2012, "Development of Core Technologies of Multi-tasking Machine Tools for Machining Highly Precision Large Parts," of the *KSPE*, Vol. 29(2), pp. 129~138.
- (2) Lee, E. S., Lee, S. B., Kim, G. H., Min, D. R., Park, M. S. and Jin, E. L., 2014, " Zig-Zag Error Analysis in the Gantry Type Machine with Spindle Rotation," *KSMTE*, p. 6.
- (3) Park, J. B., 2013, "A Study on the Structure Design and Geometric Error Calibration of a Large Gantry Type 5-Axis Machine Tool," *Mechanical Engineering*, Master's Degree, CBNU, pp. 39~42.
- (4) Park, J. H., 1999, "Precision Measurement System Engineering," Yajeong Book co., pp. 201~202.