

## ◆ 특집 ◆ 5 축 가공기술

# 5 축 가공기 · 시험 및 평가기술

## Five-Axis Machine Tools – Test and Evaluation Technology

김태원<sup>1,✉</sup>, 하재용<sup>1</sup>, 김태형<sup>1</sup>  
Tae Weon Gim<sup>1,✉</sup>, Jae Yong Ha<sup>1</sup> and Tae Hyung Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 두산인프라코어 공작기계 연구개발실 (Machine Tool Development Center, Doosan Infracore)  
✉ Corresponding author: taeweon.gim@doosan.com, Tel: 055-280-4324

Key Words: Five-axis Machine Tools (5 축 가공기), Geometric Accuracy (기하학적 정확도), Kinematic Accuracy (운동 정확도), Machining Test (가공 시험)

### 기호설명

$X, Y, Z, A, C$  = axis name or travel distance  
 $e$  = location deviation  
 $X_T$  = center offset between C-axis and ball bar  
 $r$  = ball bar length

### 1. 서론

5 축 가공은 가공 품질의 향상과 가공시간 단축, 그리고 공정집약을 통한 생산성 향상을 목적으로 활용되고 있다. 한번의 공작물 셋업으로 복잡한 형상의 다공정 가공이 가능하여 재공품의 대기시간 및 재고 감소로 가공 리드타임 단축이 가능하다. 또한, 공구강성 증대 효과에 의한 가공품질 향상이 기대되는데, 공구 길이의 단축에 따른 강성증대로 인한 진동저감효과 및 공구 끝 절삭속도의 일정한 유지를 통한 가공면 품질 향상에 의한다. 회전 이송축을 이용하면 가공시간 단축도 꾀할 수 있으며, 각도조정에 의해 공구와 공작물의 접근각을 제어하는 등의 최적 공구 경로 선정이 용이하기 때문이다.

가공 품질 개선과 생산성 향상이 기대되는 5 축 가공기는 직선축과 회전축의 조합으로 인한 구조적인 복잡성과 상대적으로 취약한 회전축 때문

에 기존 머시닝 센터에 적용되는 시험 평가 기술 외에 다양한 항목에 대한 평가 기술이 추가적으로 필요하게 된다.

### 2. 기하학적 정확도

기하학적 정확도는 기능점이나 대표점 혹은 기능면의 형상, 자세, 위치에 대한 편차 범위이며 직도, 각도편차, 직각도, 평행도 등이 대표적인 시험 평가 항목이다.<sup>1</sup> 그림 1 과 같은 틸팅 회전테이블형 5 축 가공기의 경우를 예로 들면 회전축과 직선축간의 아래와 같은 기하학적 정확도가 중요한 평가항목이 된다:

- 회전축과 직선축 혹은 두 회전축 상호간의 평행도, 직각도
- 기계좌표계와 회전축 좌표계 간의 오프셋
- A 축 중심선과 테이블 상면간의 거리

첫번째 항목들의 경우 기하학적 정렬관계를 시험 평가하는 것으로 공작물 가공 정확도에 직접적인 영향을 미치므로 기계 조립시에 100% 검사되고 허용값을 넘을 경우 수정작업이 이루어 지게 된다. 일례로 C 축 중심선과 Z 축과의 평행도를 측정하는 방법이 그림 2 에 나타나 있다. 주축에 정

밀 볼을 설치하고 회전테이블 상면에 인디케이터를 90 도 방향으로 두개 부착하여 Z 축 높이 두곳에서 런아웃을 읽음으로써 평행도를 평가하는 방법이다.

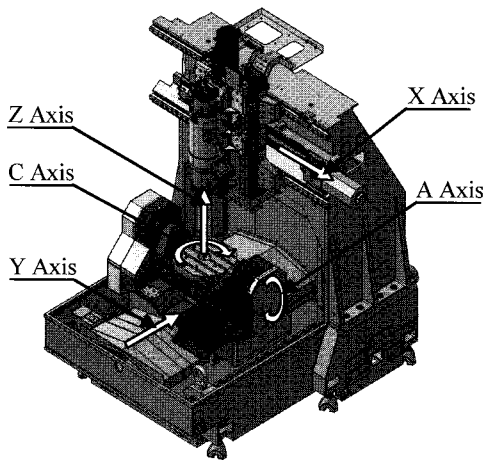


Fig. 1 Tilting rotary table type five-axis machine tool

회전테이블에 부착되어 C 축과 같이 회전하는 인디케이터에 의해 C 축의 가상 중심선이 구해지는 원리이며 평행도가 좋을수록 Z 축 높이 2 곳에서 런아웃값 상대편차가 작아진다. 일반적인 허용값은 측정길이 300mm 에 대하여 15 $\mu$ m 수준이다.

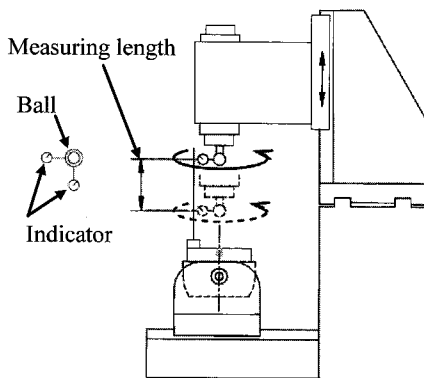


Fig. 2 Test method of parallelism between C-axis and Z-axis

기계좌표계와 회전축 좌표계 간의 오프셋은 작동 공간내에서 회전축의 위치를 의미하는 것으로 5 축가공 CAM 을 사용하거나 회전테이블에 고정된 공작물 좌표계를 사용하는 공구선단점제어 기

능에 반드시 필요한 값이다. 직선축과 회전축간의 오프셋 거리는 측정이 용이하지만, A 축과 C 축간의 오프셋 거리 즉, A 축과 C 축의 Y 방향 위치 편차  $e$  는 측정이 용이하지 않다.

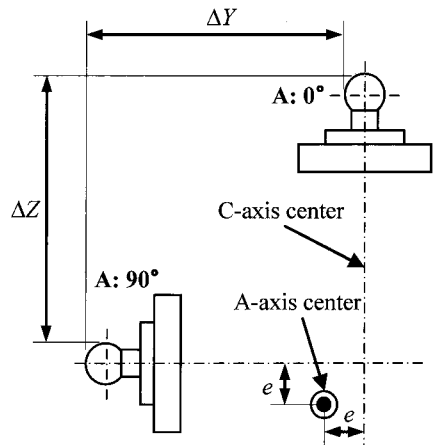


Fig. 3 Evaluation of offset between A-axis and C-axis

이 경우 그림 3 과 같이 테이블 중심에 볼을 설치하고 A 축을 90 도 회전시키면서 Y 방향, Z 방향 거리차  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  를 가지고 기하학적인 관계에서 유도되는 아래식을 가지고 오프셋 거리를 구할 수 있다.

$$e = \frac{1}{2}(\Delta Z - \Delta Y)$$

특히 테이블 상면이 A 축 중심선보다 위에 있어 측정기준을 A 축 중심선상에 위치시키기 힘들 경우에 유용하다. A 축과 C 축과의 오프셋은 두 축선이 교차하는 구성의 5 축기의 경우 일반적으로 30 $\mu$ m 를 허용값으로 한다.

A 축 중심선과 테이블 상면간의 거리 또한 볼을 사용하여 값을 구할 수 있으며, CAM 사용이나 공구선단점제어 기능을 위해서 필요한 값이다.

진직도, 직각도, 평행도, 위치편차 등 기하학적 정확도가 5 축가공에 있어 중요한 이유는 회전축에 공작물이 장착되어 각위치결정이 이루어져서 작은 편차 성분도 회전축의 중심에서 멀어질수록 크게 나타나기 때문이다. 그러므로, 정밀한 부품을 가공하기 위한 5 축기의 경우 3 축 머시닝센터에 비하여 기하학적 편차를 엄격히 규제하여야 한다.

### 3. 운동 정확도

직선축 상호간 및 회전축과의 최대 동시 5 축 제어시 궤적 편차를 평가하는 항목이 운동 정확도 시험이며, 기하학적 편차도 추정 가능하다.<sup>2</sup> 직선축과 회전축을 동기운동 시켰을 때의 운동정확도, 회전축과 직선축사이의 동기정확도를 평가하기 위한 것이다. 헬리컬 보간 기능을 사용한 X/Y/C 운동정확도 시험 혹은 Y/Z/A 운동정확도 시험 등 다양한 형태의 시험방법이 있지만, 직선축과 회전축간의 동기제어 성능 특성을 평가하기 용이한 직선축/회전축 2 축 동기제어에 의한 측정방법을 살펴본다.

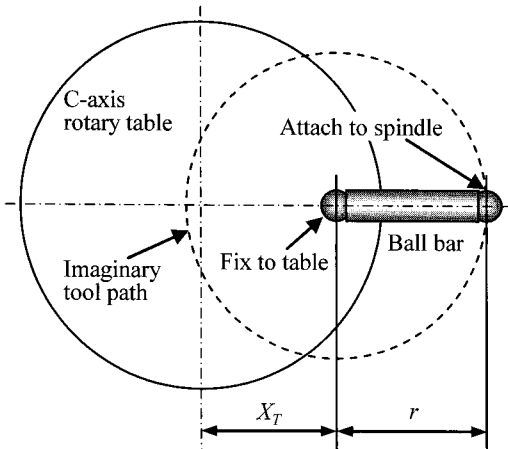


Fig. 4 Tool path around C-axis table

X/C 동시제어 운동정확도 시험을 볼바를 사용하여 측정할 경우에 대한 셋업조건이 그림 4에 표시되어 있다. 볼바를 C 축 중심에서 90mm 떨어진 지점에 설치하고(그림에서  $X_T$ ), C 축과 X 축(혹은 Y 축)만을 사용하여 볼바의 주축축 볼이 테이블축 볼을 중심으로 반경 100mm(그림에서  $r$ )의 원호보간 운동을 시킨다.

이때 테이블축 볼에 대한 주축축 볼의 상대적 원주속도를 일정하게 유지하려면 그림 5와 같이 X 축과 C 축의 이송속도에 급격한 변화를 초래하게 된다. 따라서 C 축과 X 축의 이송속도가 급격하게 변화되는 위치에서 직선축과 회전축의 특성의 차이로 인한 동기오차가 측정결과에 나타나게 된다. 한편 상기 시험은 NC의 극좌표 보간기능을 사용하여 용이하게 실시할 수 있으며, C 축 중심에서 볼바까지의 설치 거리  $X_T$ 에 따라 각 축의 속

도 변동량이 영향을 받게 된다.

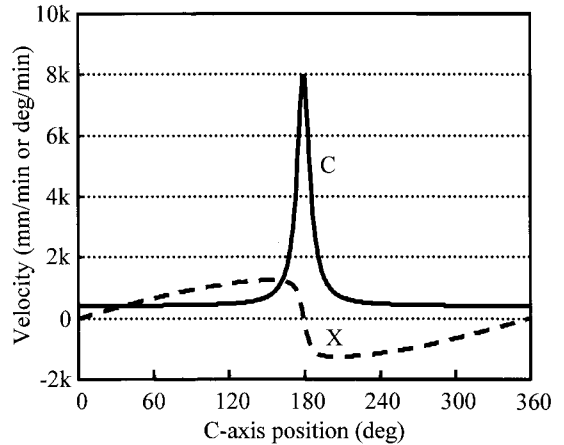


Fig. 5 C- and X-axis velocity profile (feed 1500mm/min)

X/C 운동정확도를 측정하는 예가 그림 6이다. 시계방향, 반시계방향 두 궤적을 표시한 것으로 180° 부근에 직선축과 회전축 사이의 동기오차에 의하여 생기는 돌기형태의 궤적이 선명하게 나타나 있는 것을 알 수 있다. 직선축과 C 축과의 서보게인이 일치하지 않기 때문에 직선축과 회전축의 서보게인을 일치하게 조절할 필요성이 있음을 알 수 있다.

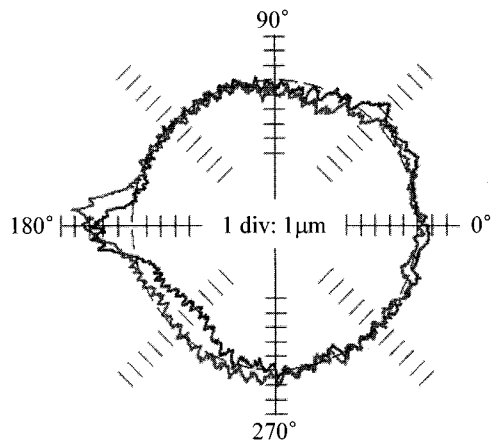


Fig. 6 Measured data at feed 1500mm/min

또한 C 축 구동기어의 피치 오차가 선명하게 나타나 있는 것을 볼 수 있지만 수치상으로 그렇게 큰 정도는 아니다. 전체적인 원호궤적으로 볼 때 완벽한 원형에서 벗어나 있는 것을 볼 수 있는

데, 이것은 직선축의 진직도가 영향을 미치는 것으로 보인다. 일반적으로 직선축/회전축 2 축 동기 제어 운동정확도에 대한 허용값은 50 $\mu$ m 이다.

#### 4. 가공 시험

가공시편을 이용한 공작기계의 시험평가는 실제 절삭을 통하여 가공된 절삭면의 치수, 형상, 조도를 측정하여 이루어진다. 5 축기용 가공시편은 특정 5 축기의 기능에 대한 전반적인 특성을 변별력있게 나타내어야 하며, 5 축기의 특성상 기계, 제어기, CAM 후처리기 세가지가 종합적으로 평가될 수 있는 것이 바람직하다. 현재 산업계에서 많이 사용되고 있는 일반적인 가공시편은 NAS 979<sup>3</sup>의 원추대 가공시험편이며 동시 5 축제어를 사용하여 가공된다.

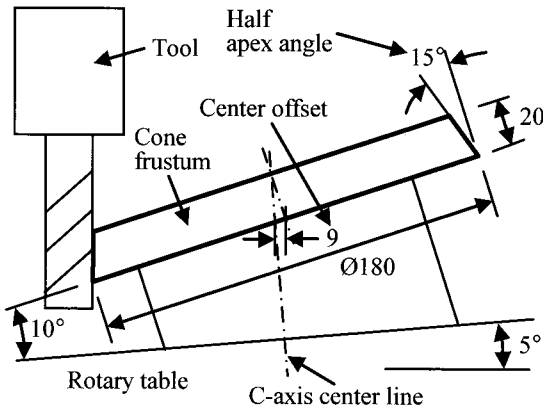


Fig. 7 Cone frustum test piece

그림 7 과 같이 회전테이블 상면에 10°의 각도로 설치된 가공시편을 원추대 형상으로 가공하기 위해서는 동시 5 축제어가 필요하다. 원추대의 반정각은 15° 이고 하부 직경은 180mm 이나 기계 크기에 따라 직경은 달리 할 수 있다.

NAS 979 규격에 따르면 Z 축의 운동범위가 최소 25.4mm 이상임을 요구하고 있다. 틸팅 회전테이블형 5 축기의 경우 그림 7 의 공작물과 회전테이블 중심간의 오프셋에 따라 결정된다. 그림 8 에 여러 가지 오프셋 값에 따른 직선축의 운동범위를 나타내었다. 오프셋이 커질수록 직선축의 운동범위도 커짐을 알 수 있다. 그림 2 와 같은 C 축 중심선과 Z 축 운동과의 평행도가 확보되어 있다면, 그림 7 과 같은 작은 중심 오프셋 값을 사용한 원

추대 가공시험도 적절한 선택이라고 보여진다.

원추대 경사각도가 반정각이 되면 가장 좋은 가공 결과를 얻을 수 있으며, 이송축의 속도변동이 가장 작은 조건이기 때문이다. 일반적으로 직경 180mm 가공시편에서 원추대의 원형도는 60 $\mu$ m의 허용값을 가진다.

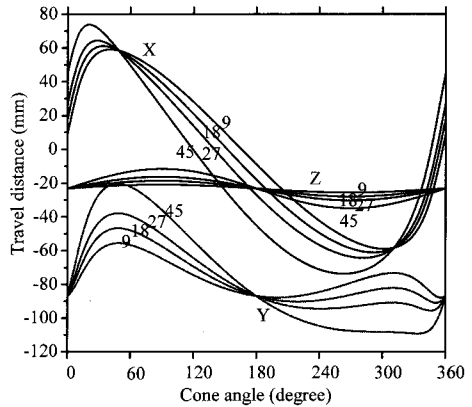


Fig. 8 Axis travel ranges (center offset varied from 9 to 45mm)

#### 5. 결론

5 축 가공기에 필요한 기하학적 정확도, 운동정확도, 가공시험 분야별 여러 가지 항목 중 대표적인 시험방법을 분야별로 예를 들어 살펴보았다. 기존 3 축 머시닝 센터와 비교하여 더욱 엄격한 수준의 기하학적 정확도가 요구되며, 운동 정확도나 가공시험도 기하학적 정확도에 영향을 받는다. 주로 틸팅 회전 테이블형에 대해 적용가능한 방법을 살펴보았지만 주축 선회형 등 다른 형태의 5 축기에도 유사하게 적용할 수 있다.

#### 참고문헌

1. ISO Standards, "Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions," ISO 230-1, 1996.
2. Tsutsumi, M. and Saito, A., "Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements," Int. J. of Machine Tools and Manuf., Vol. 44, No. 12-13, pp. 1333-1342, 2004.

3. NAS 979, "Uniform cutting tests - NAS series, metal cutting equipment specifications," Aerospace Industries Association - National Aerospace Standard, pp. 34-37, 1969.