

◆특집◆ 초정밀가공기술

B축 제어 초정밀 가공기에서의 공구위치 설정

박순섭*, 이기용*, 김형모*, 원종호**

Tool Alignment in B Axis Controlled Ultra-Precision Machine

Soon Sub Park*, Ki Young Lee*, Hyoung Mo Kim* and Jong Ho Won**

Key Words : B Axis Controlled Machining (B축 제어가공), Tool Alignment (공구 위치설정), Ultra-Precision (초정밀)

기호설명

- R : 공구 반경
- α : X축 터치를 위한 공구 회전각도
- β : Z축 터치를 위한 공구 회전각도
- θ : B축 중심에 대한 이상적인 공구 중심과 실제 공구 중심 사이의 각도(degree)
- l : B축 중심과 위치 보정 전 공구중심 거리
- D_1 : + α 방향 터치 거리
- D_2 : - α 방향 터치 거리
- D_3 : Z축 터치 거리와 공구 기준반경의 차
- X_e : B축 중심에 대한 X축 방향 공구설정오차
- Z_e : B축 중심에 대한 Z축 방향 공구설정오차
- Y_e : X, Z 평면에 대한 Y축 방향 오차
- T_0 : 이상적인 공구 선단
- T_1 : 초기 설정 시 공구 선단

1. 서론

초정밀 가공은 모성의 원리가 적용되어 공구의

형상정밀도뿐만 아니라 공구의 설치 위치에 따라 가공면의 형상과 품질이 결정된다.

기존의 초정밀 선삭 및 연삭은 일반적으로 원형의 반경을 갖는 공구의 고속회전을 통해 가공이 수행된다. 가공중의 공구 마모를 최소화한 이상적인 가공과정으로 가정할 때 공구와 공작물의 초기 설정위치는 전체의 가공공정에서 일정하게 유지되고 결국 초기 공구 설정 오차는 가공물의 가공 오차에 영향을 미치게 된다.^{1,2}

보정 가공을 통한 마모나 공구 위치 오차의 보정이 일부 가능하나 기본적으로 공구가 이상적인 위치에 장착 되어 있는 것을 전제로 한 보정이므로 보다 근본적인 접근으로서 공구의 설정 위치 보정의 중요성은 여전히 존재하게 된다.

특히 각도 제어기술을 적용하여 공구선단의 제한된 영역부분으로 가공을 수행하는 B축 제어가공에 있어서는 공구선단의 위치와 B축의 회전 중심의 위치 차이는 가공면의 품질에 직접적인 오차 요소로 작용하게 된다.

본 연구에서는 공구 홀더의 중심에 대한 회전축인 B축의 제어가 가능한 원형의 공구를 사용하는 공작기계 및 초정밀 가공기에서 공구를 B축의 회전 중심에 위치시켜 공구의 X, Z축 방향 오차를 최소화하는 공구 설정 오차 보정방법에 대한 기하학적 측면으로 접근하여 보정방법을 제안하고, 이를 실제 장비에 적용시켜 확인하였다.

* 한국생산기술연구원 광주연구센터 마이크로금형팀
Tel. 062-600-6151, Fax. 062-600-6159

Email pss4633@kitech.re.kr

초정밀가공과 측정, 광학 렌즈 및 미러 분야에 관심을 두고 연구 활동을 하고 있다.

** 충남대학교 기계공학과

2. 공구설정 오차의 기하학적 해석

2.1 가공기의 공구설정 오차

공구위치결정 오차가 발생한 경우에는 이상적인 공구경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 이러한 이유로 실제 가공면의 형상은 오차가 그대로 전사되게 된다. B축 제어가 되지 않는 초정밀가공기의 경우 X, Y축 두 축으로 공구위치를 다음과 같이 설정한다.

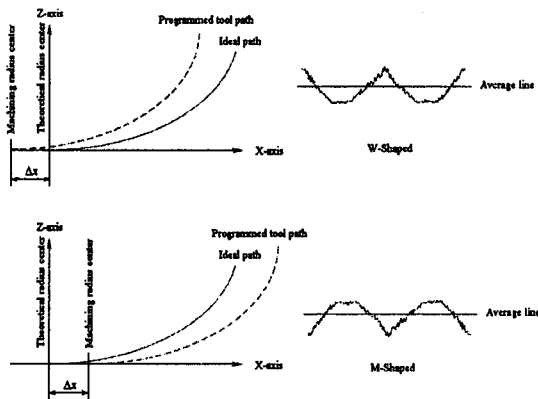


Fig. 1 Measured profile due to different types of position error(Concave)

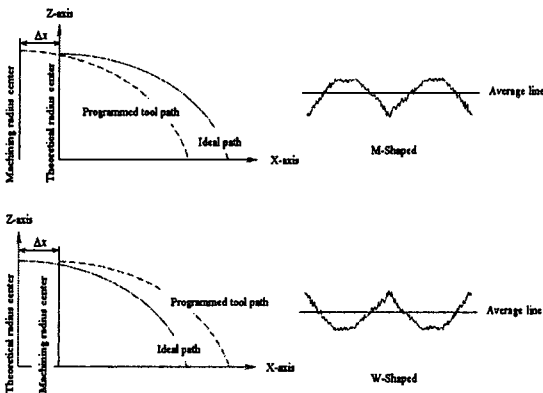


Fig. 2 Measured profile due to different types of position error(Convex)

위치결정에 의한 오차에 의한 형상은 공구의 de-center에 따른 방향에 따른 형상오차가 생기며 이로 인한 형상은 측정프로파일형태에 의해 구분할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2는 X축 위치오차에 따른

형상오차의 측정프로파일 형태이다. 따라서 측정 프로파일의 각각의 형상의 의한 공구의 편심량을 알 수 있으며, 그 편심 값을 보정하여 설계 값과 가까운 면을 가공할 수 있다.

Fig. 3은 초정밀 연삭에서 공구의 높이 오차에 의해 발생한 형상을 도식화한 것이다. 공구의 높이 오차에 의해 공작물의 중심에 이상 형상이 발생한 경우, 금속현미경 이용하여 공작물 중심의 이상 형상을 측정하여 나타난 형상이 방사형상 속의 Vertex형상의 반경량 만큼 공구를 상하로 이동시켜 보정한다. 공구의 상하 이동은 Y축을 마이크로미터 오더로 이송하여, 그 변화량을 상하이동량으로 정한다.

Y축 방향 설정오차의 경우 기존의 가공면 중심의 형상 해석을 통한 보정 방법이 제안되어 있다.³

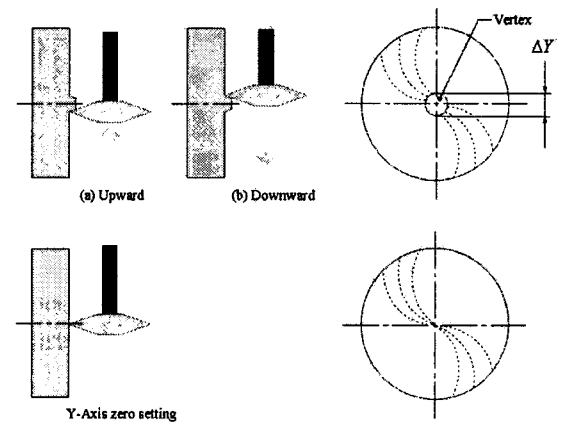


Fig. 3 Positioning error of tool's height

공구 장착 시 축의 자유도만큼의 오차 요인이 발생할 수 있는데, 특히 B축 제어가공기의 경우 B축 오차는 단순히 B축 오차 제어만으로 보정 되지 않고 Fig. 4에서와 같이 X, Z축 방향으로 공구 설정 위치 보정을 통해 제거해야 한다.

즉, 이상적인 공구선단의 위치는 B축의 중심인 T_0 이나 실제적인 공구 장착위치는 T_1 이 된다. 또 Fig. 4에서는 X축 방향 설정 오차만이 표현되어 있으나 실제로는 X, Y, Z, B축 방향 오차가 존재할 수 있으며, 가공 조건에 따라 특정 방향의 오차는 다른 오차들로 등가화 될 수 있다.

기존의 공구 설정 오차의 보정은 Fig. 5와 같이 선단이 특수 가공된 기준 축침형 바를 이용하여 B

축 중심을 정하고 이를 기준으로 마이크로스코프 영상의 통한 공구 선단 형상을 육안으로 확인 하여 설정하였다. 이러한 방식은 결과적으로 작업자의 숙련도에 의존하게 되고 마이크로스코프의 설정이 흐트러지면 재설정을 해야 하는 단점이 있다. 또한 실제 가공 수행 전에는 공구설정 오차가 허용 범위 내에 있는지 확인 할 방법 또한 존재하지 않는다.

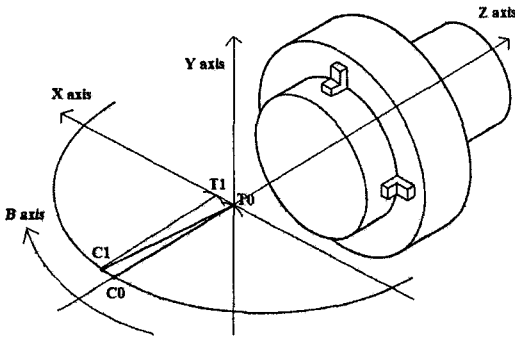


Fig. 4 Schematic diagram of 4 axis machine

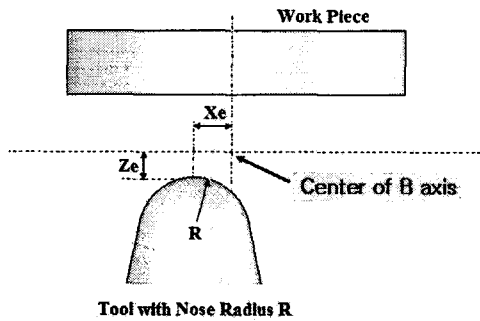


Fig. 5 Horizontal error of tool alignment

2.2 B축 회동을 통한 공구 설정 오차의 보정

공구설정 오차의 보정은 우선 장착된 공구를 이용하여 공구 설정용 기준평면을 가공한다. 기준면에 대하여 각각 $+a$, $-a$ 의 양 만큼 B축 방향으로 공구를 회동시켜 각각의 위치에서 Z축 방향으로 미소 이송하여 공구와 기준면의 최초 접촉지점을 칩 발생을 통해 확인한다. 이때 양 방향의 접촉점의 좌표 D_1 , D_2 의 편차를 구하게 된다.

Fig. 6의 방법으로 측정된 편차는 Fig. 7과 같이 θ 와 l 로 표현될 수 있다. 식. 1 은 각각 D_1 , D_2 , a 의 측정 가능한 변수와 l , θ , Ze 의 미지변수로 표현된 기하학적 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} l \cos(a + \theta) &= D_1 - Ze \\ l \cos(a - \theta) &= D_2 - Ze \end{aligned} \quad (1)$$

두 식에서 Ze 를 소거하면 식. 2를 얻을 수 있고, Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼 $l \sin \theta$ 는 X축 방향 공구 설정 오차 Xe 가 된다.

$$l \sin \theta = \frac{D_1 - D_2}{-2 \sin a} = Xe \quad (2)$$

이는 $Ze \leq 0$ 의 경우에도 동일한 결과를 보이게 된다. 즉 이상의 방법을 통하여 X축 방향 공구 설정 오차 Xe 에 대한 정량적인 값을 식. 2로 계산하여 보정 할 수 있다.

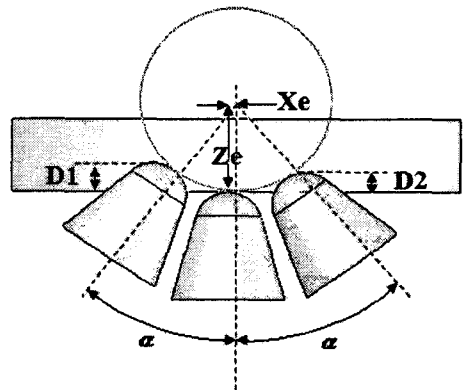


Fig. 6 Geometrical error measurement

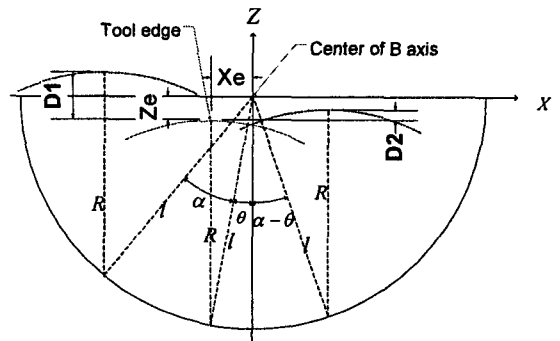


Fig. 7 Geometry of X axis alignment error

공구 장착 홀더의 미세 조동을 통해 Xe 를 제거한 후 Fig. 7에서와 같이 Z축 방향 공구 설정 오차 Ze 에 대한 보정을 수행할 수 있다. 즉 Xe 가 제거된

상태에서 B축 방향으로 β 만큼의 공구 회동을 하고 이는 기하학적으로 식. 3과 Fig. 8로 표현된다.

$$\frac{D_3}{1 - \cos \beta} - R = Ze \quad (3)$$

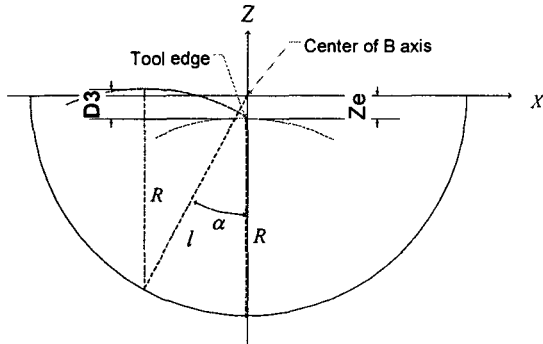


Fig. 8 Geometry of Z axis alignment error

3. 실험적 설정오차 보정

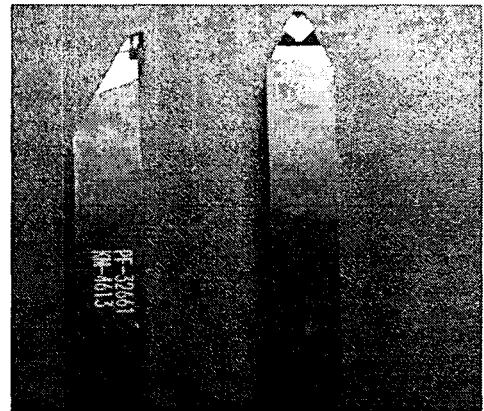
3.1 B축 제어를 통한 구면 가공

본 연구에선 B축 제어가 가능한 초정밀자유곡면가공기를 이용하여 단결정 다이아몬드 바이트 선삭에서의 공구 설정에 관한 실제 보정 과정을 수행하였다. Y축 공구 위치 보정은 마이크로스코프를 이용한 방법과 접촉식 다이얼 게이지를 이용한 방법, 가공면의 중심부의 “배꼽”형상을 통해 보정하는 방법 등이 있다. 본 연구에서는 Fig. 9 a의 천연 단결정 다이아몬드 바이트를 이용하여 가공과 보정을 수행하였다. 실제로 다이아몬드 바이트를 가공에 사용하기 위해서는 결정방향성이 고려되어 사용되며 다이아몬드의 난가공성 때문에 바이트의 형상에 Fig. 9 b와 같이 일정 정도의 오차가 존재하게 된다.

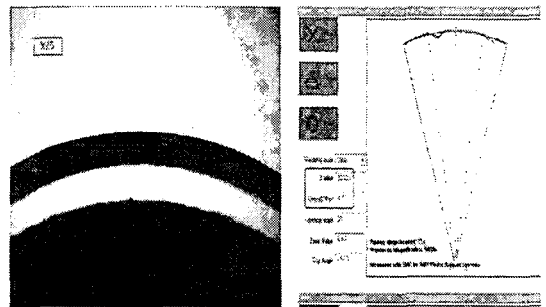
Fig. 10과 같이 마이크로스코프를 이용한 바이트 홀더(tool holder)의 미세 조정을 통해 보정을 수행하였다.⁴ 수직축 방향의 이상적인 Y좌표를 마이크로스코프 화면을 통해 구하고 이 좌표에 대한 X, Z 좌표를 전술한 계산에 의해 구하게 된다.

초정밀자유곡면가공기(Ultra-precision free form surface machine)를 이용하여 Fig. 11에서와 같이 황동시편을 워크 스펀들에 장착 후 평면 절삭을 통해 기준 평면으로 사용하였다. 실험에 사용된 가공기는 유정압 베드를 적용하여 1nm의 초정밀 제어가

가능하고 X, Y, Z, B축 위치 제어가 가능하고 Y축 방향의 신뢰성을 위하여 공압지지에 의해 외란을 최소화 하고 항온항습의 청정실 내의 독립기초 위에 설치 되어있다.



a. Ultra precision Turning bite(Diamond)



b. Quality Certificate of bite(Rpv=0.17um)

Fig. 9 Tool for Experiment

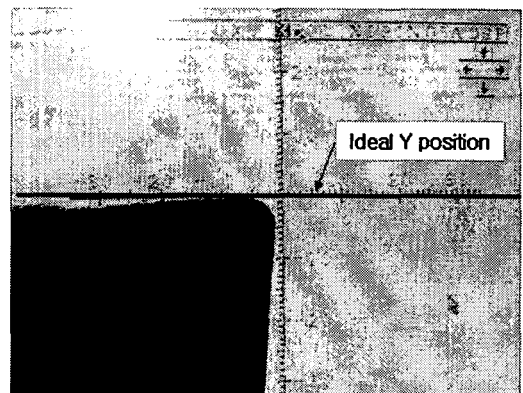
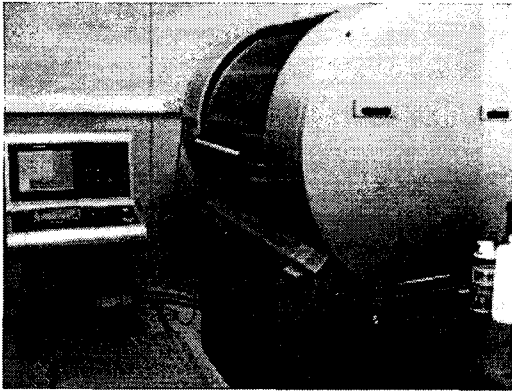
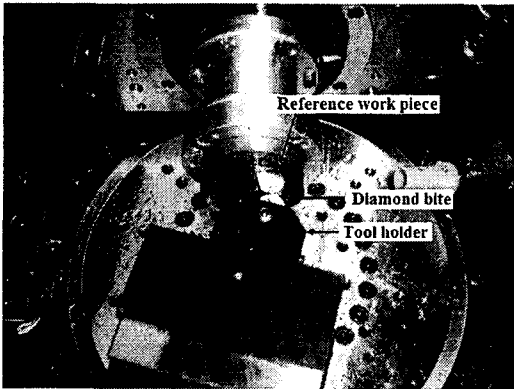


Fig. 10 Y axis alignment error compensation



a. Ultra precision freeform surface machine



b. Tool and work setting
Fig. 11 Experimental setup

초기 공구설정을 통한 기준구면의 가공 결과는 Fig. 12의 경우와 같이 연삭 및 절삭면에서 확인된다. 가공방식에 따라 배깅은 가공물의 중심에서 원뿔(cone)형태나 봉(cylinder) 형태로 나타나게 된다. 이는 각 축의 설정오차가 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 실제 가공에 있어서는 공구의 위치 설정 오차를 보정 후 공구의 형상오차나 가공 중 마모 및 가공 특성에 의해 발생하는 오차는 프로그램 보정을 통해 진행 되게 된다. 본 실험에서는 프로그램 보정에 의한 오차 보정은 배제하고 기계적 위치 보정에 의해서만 가공을 수행하였다.

Fig. 13은 곡률 반경 100mm의 구면을 황동 시편을 가공했을 때, 보정전과 보정후의 형상오차이다. 초기 설정을 통한 가공시 가공오차는 $P-V=0.4299\mu\text{m}$ 에서 보정 후 $P-V=0.0930\mu\text{m}$ 로 줄어 든 것을 확인할 수 있다.

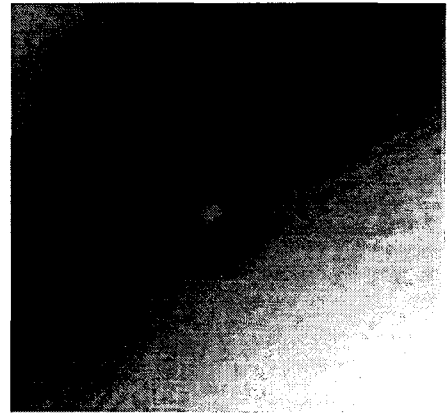
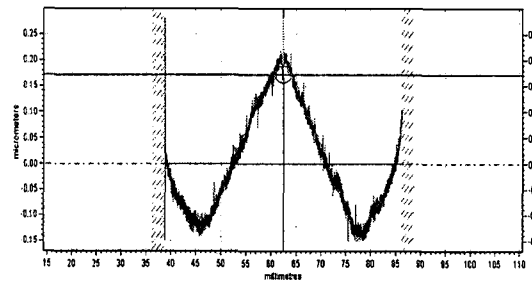
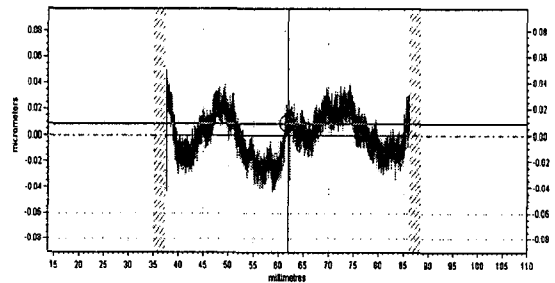


Fig. 12 Naval of machined work piece



a. Before compensation ($P. V=0.4299\mu\text{m}$)



b. After compensation ($P. V=0.0930\mu\text{m}$)

Fig. 13 Surface profile before and after compensation

4. 결론

본 논문에서는 원형 공구 설정 오차를 최소화하기 위하여 B축 제어 초정밀 가공장비의 접촉점 편차의 기하학적 분석을 수행하는 공구 설정 오차 보정 방법을 제안하였다.

기준평면을 가공하여 이를 기준으로 양, 음의 방향으로 일정 각도를 회전시켜 X축 방향의 공구

설정 오차를 산정하고, X축 방향 오차가 제거된 상태에서 Z축 방향오차는 기준 평면에 대한 오차 측정을 반복하여 보정을 수행하여 곡률 반경 100mm, 반경 50mm의 구면에서 초기의 가공오차가 P-V=0.4299 μ m에서 보정 후 P-V=0.0930 μ m로 향상되었다.

참고문헌

1. Saeki, W., "Study of processing of axis symmetric aspheric by Parallel grinding method," Doctoral Thesis, Department of NanoMechanics, Tohoku University, p. 6, 2003.
2. Yan, J., Tamaki, J., Syoji, K. and Kuriyagawa, T., "Development of a Novel Ductile-Machining System for Fabricating Axisymmetrical Aspherical Surfaces on Brittle Materials," Key Engineering Materials, Vols. 238-239, pp. 43-48, 2003.
3. Suzuki, H., Wajima, N., Syoji, K., Kuriyagawa, T., Okuyama, S. and Kitajima, T., "Precision Grinding of aspherical surface - Grinding of Axi-symmetric aspherical CVD-SiC Molding Die," Journal of the Japan Society of Grinding Engineers, Vol. 43, No. 9, pp. 411-417, 1999.
4. Bifano, T. G. and Fawcett, S. C., "Specific grinding energy as an in-process control variable for ductile-regime grinding," Precision Engineering, Vol. 13, Issue 4, pp. 256-262, 1991.