

## 2 축 동시구동을 통한 볼바 측정용 원호경로 생성 방법<sup>§</sup>

이동목\* · 이훈희\*\* · 양승한\*\*\*

\* 경북대학교 기계연구소, \*\* 경북대학교 기계공학과

### Circular Path Generation Technique for Ball Bar Measurement by Simultaneous Movement of Two Axes

Dong-Mok Lee\*, Hoon-Hee Lee\*\* and Seung-Han Yang\*\*\*

\* Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received December 20, 2012 ; Revised March 27, 2013 ; Accepted March 28, 2013)

**Key Words:** Circular Path Generation(원호경로 생성), Simultaneous Motion(동시 구동), Ball bar(볼바), Five-axis Machine Tool(5 축 공작기계)

**초록:** 5 축 공작기계에서 회전축을 포함한 동시 구동에 대한 볼바 측정용 원호 경로 생성 및 NC 데이터 작성은 CAM 소프트웨어를 사용할 경우 공작기계의 구조, 사용되는 동시 구동축 종류 및 볼바 셋업 조건 등 다양한 시스템 구조와 변경된 측정 환경에 따라 매번 많은 시간과 노력을 수반해야 한다. 본 연구는 소프트웨어의 의존 없이 다양한 볼바 측정 조건에서도 항상 사용할 수 있는 두 축 동시 구동을 통한 원호 경로를 생성하는 기법을 소개하며 임의의 공작기계의 구조 및 동시 구동축의 종류, 볼바 셋업 조건 등을 고려한다. 제안한 원호 생성 기술을 이용하여 세 가지의 사례에 대한 원호 경로 생성용 수학적 식을 제시하며 더불어 볼바 부품간 물리적 간섭을 방지하기 위한 측정 가능성 사전 검사 방법을 제안한다. 제안한 기법의 타당성은 두 개의 회전축을 이용한 볼바 측정 실험을 통해서 검증한다.

**Abstract:** Circular path generation for ball bar measurement using the simultaneous movement of two axes with at least one rotary axis requires the execution of CAM software. However, a change in the machine type or measurement condition requires a new execution of the CAM software, which is cumbersome. This paper presents a circular path generation technique that does not require CAM software and is applicable to different types of driving axes with an arbitrary structural configuration of machine tools and any ball bar setup condition. Mathematical equations are derived for three cases using the proposed technique. In addition, to inspect the measurement feasibility for avoiding physical interference among the ball bar parts, a tilting angle calculation is proposed. The validity of the proposed technique was verified by performing a ball bar experiment with A and C as the simultaneous axes of a five-axis machine tool.

- 기호설명 -

- r: 5 축 구동을 위한 기계 명령
- v<sub>s</sub>: 측정 가능한 작업공간에 대한 구 벡터
- b<sub>C</sub>: 작업공간에 대한 구 벡터(v<sub>s</sub>)를 공작물 좌표계로 변환한 벡터
- b<sub>M</sub>: 2 축 동시 구동 시의 볼바 방향 벡터
- P<sub>W</sub>: 공작물 좌표계에서 정의된 WB의 위치
- P<sub>T</sub>: 공작물 좌표계에서 정의된 TB의 위치

### 1. 서론

최근 5 축 공작기계 사용이 증가함에 따라 회전 이송계를 포함한 구동 시의 위치 정밀도 개선을 위한 성능 검증이 엄격히 요구되고 있다. 볼바 시스템은 이송계의 동시 구동을 통한 상대운동 평가에 주로 사용되며 두 축간의 준정적 및 동적 성능을 확인할 수 있고 저가이며 신속한 측정이 가능한 장점을 가지고 있다.<sup>(1-7)</sup>

볼바시스템은 테이블 위의 센터마운트에 장착되는 워크피스볼(WB: work-piece ball)과 공구에 장착되는 툴볼(TB: tool ball)의 중심에 해당하는 두 중

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, syang@knu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

심점간의 상대적인 거리를 측정하기 때문에, 볼바 시스템의 측정 허용 가능 범위 내에서 원호 경로의 생성이 필수적이다. 일반적으로 가공 경로에 대한 NC 코드를 생성하기 위해 CAM 소프트웨어가 주로 사용되고 있지만, 볼바시스템을 이용한 측정은 종종 까다롭고 다양한 측정 환경에서 테스트가 이루어지곤 한다. 특히 회전축을 포함하고 있는 5 축 공작기계의 경우 상당히 많은 경우의 수를 가지고 측정을 수행하기 위해 CAM 소프트웨어에 의존하지 않는 원호경로 생성기술을 필요로 한다.<sup>(8-10)</sup> 동시 구동을 위한 경로생성 방법은 기존 연구에서도 보고되었다. Lei<sup>(11)</sup>는 틸팅로타리 테이블의 회전축 구동을 위한 원호 경로 방법을 제시하였고 Tsutsumi<sup>(12)</sup>는 직선축 및 회전축의 동시 구동 축들의 동적 정확도를 평가하기 위해 필요한 원호 경로를 보였다. Manato<sup>(13)</sup>는 미우주항공 표준인 NAS979 의 결정 원뿔체 가공 경로와 등가인 볼바 측정용 원추형 경로(Conical path)를 제안하였다.

본 논문은 다양한 구조의 공작기계 및 볼바 셋업 조건에서 2 축 동시 구동을 통한 볼바 측정을 위해 효과적으로 사용할 수 있는 일반화된 원호 경로 생성 기술을 소개한다. 기계 원점(Home position)으로부터 구동축의 로컬좌표계(LCS: local coordinate system)를 정의함으로써 NC 코드 생성 시 추가적인 경로 좌표변환 계산 없이 변수 대입만으로 즉시 적용 가능한 2 축 동시 구동용 원호 경로 생성 방법을 소개한다. 직선축과 회전축, 회

전축과 회전축 간의 사례 연구를 통하여 특정 구조에 대한 최종 원호 경로 계산식을 유도한다. 또한 볼바 측정 시 발생할 수 있는 볼바 부품간 물리적 간섭을 피하기 위해 모든 원호 경로점에 대한 볼바와 센터마운트 간의 틸팅각을 계산하여 측정 전 측정 가능성을 검사할 수 있게 한다.

### 2. 기계 구조와 기구학 모델

5 축 공작기계의 구조 및 형태는 일반적으로 직선 3 축에 수직관계를 가진 두 개의 회전축이 조합되는 순서에 따라서 결정된다. 본 연구에서 소개하는 2 축 동시구동 원호 경로 생성 기술은 모든 구조의 다축 기계에 적용할 수 있는 일반적 기술이지만 구체적인 기술 설명을 위해 Fig. 1 과 같이 “PCAYFXZT”로 표현되는 틸팅 로타리 테이블 5 축 공작기계를 대상으로 진행한다. Fig. 1 과 같은 기계 구조의 공작물에 대한 공구의 상대적 방향과 위치를 나타내는 기구학 모델은 식 (1)과 같이 동차변환행렬(HTM)으로 표현된다.

$$\tau_P^T = (\tau_F^Y \tau_Y^A \tau_A^C \tau_C^P)^{-1} \tau_F^X \tau_X^Z \tau_Z^T = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $P$  는 공작물 좌표계,  $T$  는 공구좌표계, 그리고  $X, Y, Z$  는 각각 직선 3 축의 로컬좌표계를 나타낸다. 또한  $A, C$  는 두 회전축의 로컬좌표계를 의미하며  $F$  는 기준좌표계(Reference coordinate system)을 나타낸다. 5 축 구동을 위한 기계 명령을  $\mathbf{r} = \{x, y, z, a, c\}$ 로 표현할 경우, 식 (1)에서 공구좌표계(T-LCS)와 공작물좌표계(P-LCS) 사이의 상대적 위치와 방향을 나타내는  $\mathbf{R}$  과  $\mathbf{T}$  는  $\mathbf{R} = \mathbf{R}(\mathbf{r})$  와  $\mathbf{T} = \mathbf{T}(\mathbf{r})$  과 같이  $\mathbf{r}$  의 함수로서 표현된다.

### 3. 볼바 벡터 생성

공구 경로 생성 방법은 기본적으로 역기구학(Inverse kinematics) 문제이다. 볼바 측정은 공작물에서 바라본 공구 끝 단의 거리가 항상 일정하게 유지한 채 이루어지므로 볼바 상대운동에 대한 작업 공간은 Fig. 2 와 같이 구(Sphere) 형상을 나타낸다. 따라서 볼바의 길이를  $L_b$  라고 했을 때 한 쪽 볼을 중심으로 측정 가능한 작업 공간에 대해 구 벡터  $\mathbf{v}_s$  는 식 (2)과 같이 나타난다.

$$\mathbf{v}_s = \{v_x \quad v_y \quad v_z\}^T = \{L_b \sin \phi \cos \theta \quad L_b \sin \phi \sin \theta \quad L_b \cos \phi\}^T \quad (2)$$

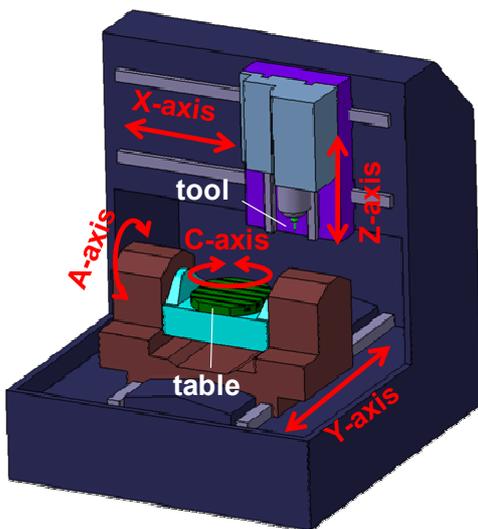


Fig. 1 Structure configuration and kinematic chain of 5-axis machine tool with tilting rotary table

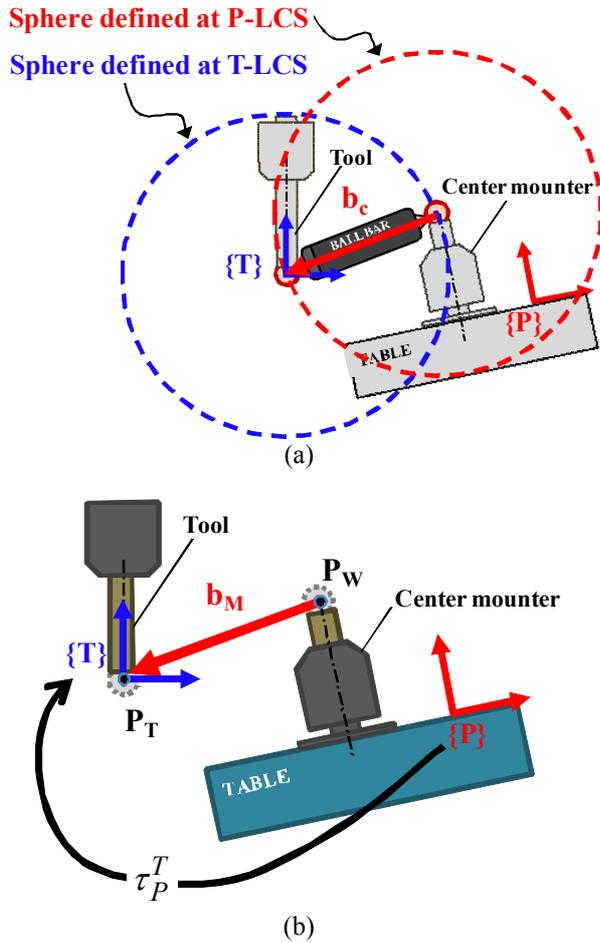


Fig. 2 Generation of ball bar vectors on the spherical space (a) and by simultaneous motion of two axes (b)

$$\mathbf{b}_C = -R\mathbf{v}_S \quad (3)$$

만약 볼바 측정용 구 공간 벡터  $\mathbf{v}_S$ 를 P-LCS 에서 정의하기를 원한다면 구 공간 좌표에 대해 공작물 좌표계로의 회전 변환을 수행한 후의 벡터로 수립하는 것으로 가능하며, 변환 후의 볼바 벡터를 식 (3)과 같이  $\mathbf{b}_C$ 로 표현할 수 있다. 공구 좌표계에서 정의된 구는  $R = \mathbf{R}(\mathbf{r})$ 로 변환하고 공작물 좌표계에서 정의된 구는  $R = \mathbf{I}_{3 \times 3}$ 로 계산한다.

볼바 측정 시의 볼바 축 방향 벡터는 TB의 중심 위치와 WB의 중심 위치 차이를 나타낸다. WB를 고정하는 센터마운트는 테이블 위에 설치하여 고정하므로 P-LCS에서 정의된 WB의 위치( $\mathbf{P}_W$ )는 구동축들이 운동하는 동안에 항상 일정하게 유지되어 식 (4)와 같이 표현하는 반면, TB의 위치( $\mathbf{P}_T$ )는 두 구동축들이 동시 구동하는 동안 상대 위치가 계속 변하게 된다. 따라서 2 축이 운동하

는 동안 볼바 방향 벡터( $\mathbf{b}_M$ )는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\mathbf{P}_W = \mathbf{P}_{W0} = \{x_w \ y_w \ z_w\}^T \quad (4)$$

$$\mathbf{b}_M = \mathbf{P}_T - \mathbf{P}_W \quad (5)$$

TB의 초기 위치는 식 (6)과 같이 WB의 위치에서 반경 벡터의 시작점을 더한 것과 동일하다. 여기서  $\mathbf{P}_{T0}$ 와  $\mathbf{b}_{C0}$ 는 원호 경로상의 TB의 초기 위치 및 그 때의 볼바 반경 벡터를 나타낸다. 만약 공구를 직선 3 축만을 이용해 초기 위치로 이송할 때 기계 명령을  $\mathbf{r}_0 = \{x_t, y_t, z_t, 0, 0\}$ 라고 한다면, 식 (7)과 같이 역기구학 풀이로 구해진다

$$\mathbf{P}_{T0} = \{x_t \ y_t \ z_t\}^T = \mathbf{P}_W + \mathbf{b}_{C0} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{r}_0) = \mathbf{P}_{T0} \quad (7)$$

두 개의 구동축이 동시에 운동을 시작할 경우, 기계 명령( $\mathbf{r}_i$ )은 초기 위치의 명령( $\mathbf{r}_0$ )에서 동시 구동축에 해당하는 명령이 변수로서 바뀌게 되며 결국 TB 위치 벡터는 식 (8)과 같이 나타난다.

$$\mathbf{P}_T = \mathbf{T}(\mathbf{r}_i) \quad (8)$$

최종적으로 Fig. 2에서와 같이 동일한 두 벡터의 해를 나타내는 2 축 동시 구동시의 원호경로는 식 (3)과 (5)의 연립방정식으로부터 얻어진다.

$$\mathbf{b}_C = \mathbf{b}_M \quad (9)$$

#### 4. 사례연구

전통적인 3 축 공작기계의 원호 경로는 제어기 내의 G02(G03)과 같은 원호 보간(Circular interpolation) 운동 기능으로 간단히 코드 생성이 가능하다. 하지만 5 축 공작기계와 같이 회전 축을 동시 구동 축으로 사용한다면, 직선축 및 회전축의 조합 방법과 구동축들이 위치한 브랜치에 따라 각기 다른 기구학 모델이 유도된다.

본 절에서는 3 절에서 기술한 원호 경로 생성 방법을 이용하여 세 가지 사례에 대해 2 축 동시 구동에 대한 원호 경로 생성 방법을 살펴본다. 먼저 같은 공작물 브랜치에 존재하는 직선축과 회전축을 동시에 구동했을 경우를 살펴보고 두 번째로 다른 브랜치에 존재하는 직선축과 회전축을 동시 구동했을 경우를 살펴본다. 마지막으로 공작물

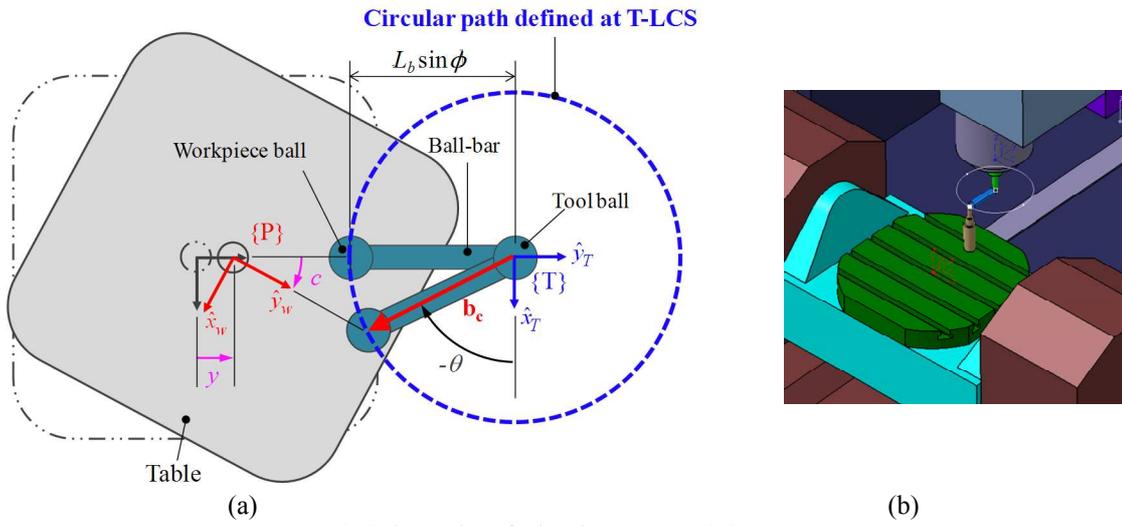


Fig. 3 Schematic of simultaneous Y&C axes

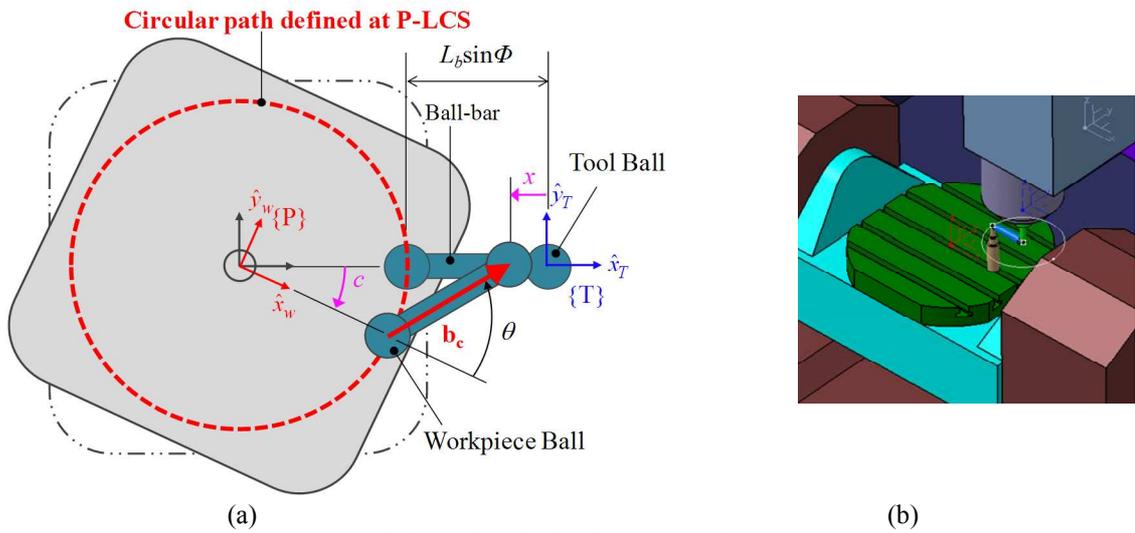


Fig. 4 Schematic of simultaneous X&C axes

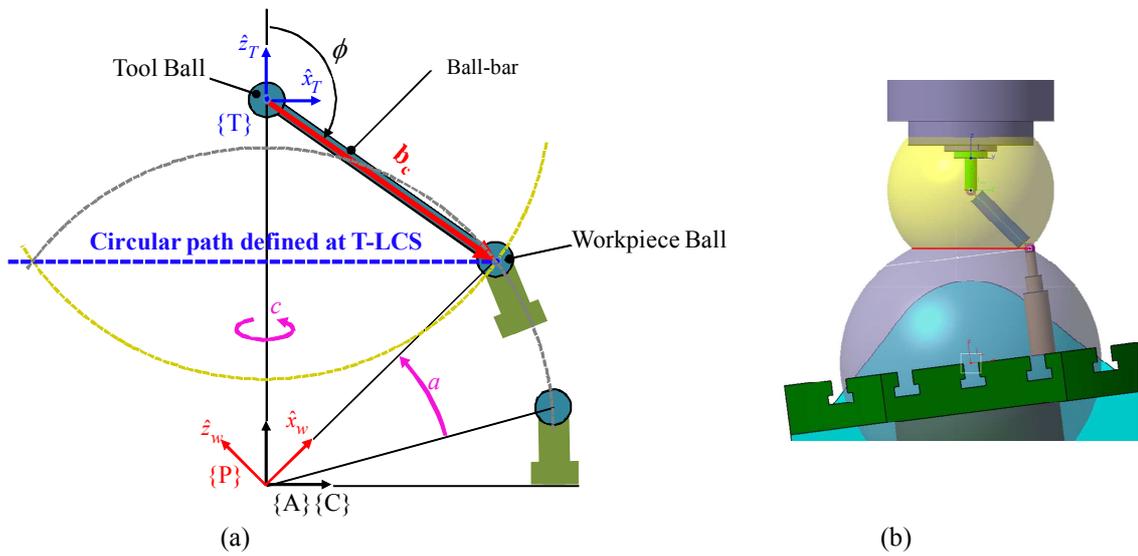


Fig. 5 Schematic of simultaneous C&A axes

브랜치에 존재하는 회전축과 회전축을 동시 구동했을 경우에 대해 알아본다.

4.1 직선축(Y)과 회전축(C)

첫 번째 사례에서는 직선축과 회전축을 동시 구동하고 두 구동축이 동일 브랜치(워크피스 브랜치)에 있을 때의 원호 경로 수식을 유도하며 예시로 Y 축과 C 축을 동시 구동할 때의 기하학 관계는 Fig. 3 (a)과 같다. 기계원점으로부터 A 축의 오프셋을  $\{o_{xa} \ o_{ya} \ o_{za}\}^T$  라 하고 볼바 측정 가능한 작업 구 벡터를 식 (2)와 같이 공구좌표계 기준으로 정의 할 경우, 식 (4) ~ 식 (9)의 절차에 의한 최종 원호 경로의 해는 식 (10)과 같이 구해진다.

$$y = -o_{ya} - v_y \mp \sqrt{-(v_x + x_t)^2 + x_w^2 + y_w^2}$$

$$c = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-y_w \pm \sqrt{-(v_x + x_t)^2 + x_w^2 + y_w^2}}{v_x + x_w + x_t} \right) \quad (10)$$

4.2 직선축(X)과 회전축(C)

만약 서로 다른 브랜치에 놓여있는 직선축과 회전축이 동시 구동할 경우의 원호 경로로서 Fig. 4 와 같은 X 축과 C 축을 고려할 수 있다. 구 벡터를 공작물좌표계에서 정의할 수 있으며, 이 때의 최종 원호 경로의 해는 식 (11)과 같다.

$$x = o_{xa} \mp \sqrt{(v_x + x_w)^2 + (v_y + y_w)^2 - y_t^2}$$

$$c = 2 \tan^{-1} \left( \frac{-v_y + y_t - y_w}{v_x + x_w \mp \sqrt{(v_x + x_w)^2 + (v_y + y_w)^2 - y_t^2}} \right) \quad (11)$$

4.3 회전축(A)과 회전 축(C)

동일 공구브랜치에 틸팅(A)축과 로타리(C)축이 동시에 배치된 경우로, 생성된 원호 경로의 해는 Fig. 5 와 같이 A 축과 C 축 동시 구동에 의한 WB 의 구 궤적과 TB 에서 바라본 WB 의 운동 궤적의 교집합이다. 마찬가지로 동일한 순서와 방법으로 구해진 최종 원호 경로 생성 결과는 식 (12)와 같다( $x_w=0$ ).

$$c = \pm \cos^{-1} \left( \pm \frac{\sqrt{v_x^2 + y_w^2}}{y_w} \right)$$

$$a = \pm \cos^{-1} \left( \left( \pm (v_y + y_t) \sqrt{v_x^2 + y_w^2} \mp (v_z + z_t) (v_x^2 + (v_y + y_t)^2 + (v_z + z_t)^2 - y_w^2)^{1/2} \right) / ((v_y + y_t)^2 + (v_z + z_t)^2) \right) \quad (12)$$

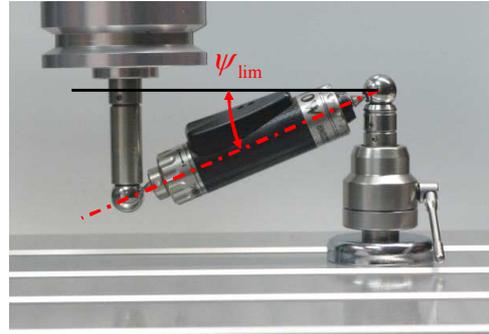


Fig. 6 Limited tilting angle of QC-20W

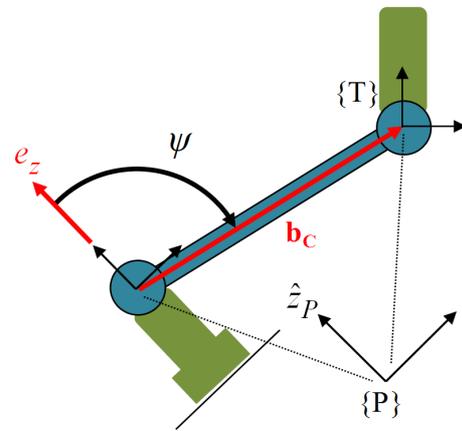


Fig. 7 Tilting angle between a ball bar and a center mount

만약 볼바 셋업 시 TB 의 위치를 공작물 좌표계의 Z 축 방향과 일치 시킨다면 TB 의 Z 값은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$z_t = -v_z + \sqrt{x_w^2 + y_w^2 + z_w^2 + v_z^2 - L_b^2} \quad (13)$$

5. 측정 가능성 검사

볼바 측정에서 가장 중요한 작업 중 하나는 측정 도중 발생할 수 있는 볼바 기구의 파손 방지를 위해 볼바 기구의 사양에 만족하는 측정 가능성 여부를 사전 점검하는 것이다. 측정 가능성 검토 작업은 볼바 기구의 측정 범위(Renishaw社 QC-20W 경우 ±1mm) 내에서 측정이 이루어지도록 하는 것과 볼바 부품들 간의 물리적 간섭이 발생하지 않도록 방지하는 것으로 이루어진다.

우선 회전축의 오프셋 오차 영향을 최소화 시켜 볼바 측정 범위를 벗어나게 하는 주요 요인인 원호 데이터의 편심을 줄이는 것이 필요하다. 이를 위해 다이얼 게이지를 활용하여 회전테이블의 중심축의 위치를 개략적으로 파악하고 실 측정 전에

준정적 측정 방법으로 공구 경로에 대한 측정 모의 실험을 수행하는 것이 효과적이다.

볼바 시스템은 구조상 두 볼의 양 방향으로 센터마운트(Center mount)와 볼바, 그리고 볼바와 툴컵 사이에 각각 끼인각을 형성하는데 과도한 볼바 틸팅은 부품들 간의 간섭을 발생시켜 볼바 파손의 주원인으로 작용한다. 따라서 생성된 원호 경로의 모든 점들에 대해 볼바 부품들 간 끼인각을 사전에 파악하여야 한다. 즉, 모든 원호 경로점에서의 볼바 틸팅각을 계산하여 최대 틸팅각 허용치와 비교하여야 한다. Fig. 6 은 QC-20W 모델이 틸팅된 모습을 보여주며 최대 틸팅 허용각( $\psi_{lim}$ )은  $20^\circ$ 이다.<sup>(14)</sup> 볼바 방향 벡터( $\mathbf{b}_C$ )와 센터마운트 방향 벡터( $\mathbf{e}_z$ ) 사이에 이루는 틸팅각( $\psi$ )은 Fig. 7 에 나타나듯 코사인 2 법칙으로 계산된다.

$$\psi = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{b}_C \cdot \mathbf{e}_z}{\|\mathbf{b}_C\| \|\mathbf{e}_z\|} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{b}_C \cdot \mathbf{e}_z}{L_b} \right) \quad (14)$$

만약 센터마운트가 테이블에 정확히 수직 방향으로 장착될 경우, 벡터  $\mathbf{e}_z$  가 P-LCS 의 Z 방향 기본벡터( $\hat{\mathbf{z}}_p$ )와 동일하므로 최종적인 볼바 측정 가능 판단 기준은 식 (15)를 만족해야 한다.

$$\psi_{lim} > \psi - 90^\circ = \cos^{-1} \left( \frac{b_z}{L_b} \right) - 90^\circ \quad (15)$$

여기서  $b_z$  는  $\mathbf{b}_C$  벡터의 Z 성분을 의미한다.

## 6. 볼바 측정 실험

볼바 측정 실험은 Fig. 1 에 나타난 구조의 5 축 공작기계를 대상으로 하였고 실험에 사용된 볼바 시스템은 Renishaw 社의 QC-20W 모델로서 Table 1 과 같은 사양을 가진다. 측정 원호 경로는 4 절에서 제시한 세 가지 사례 연구 중 볼바 셋업 및 동

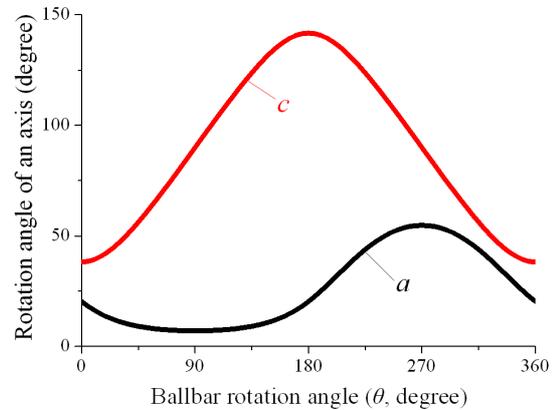
**Table 1** Specifications of the used ball-bar

Manufacturer	Renishaw plc QC-20W
Measuring range	$\pm 1.0$ mm
Measurement accuracy	$\pm 1.0$ $\mu$ m
Ball-bar length	100.0 mm
Maximum tilting angle	$20^\circ$

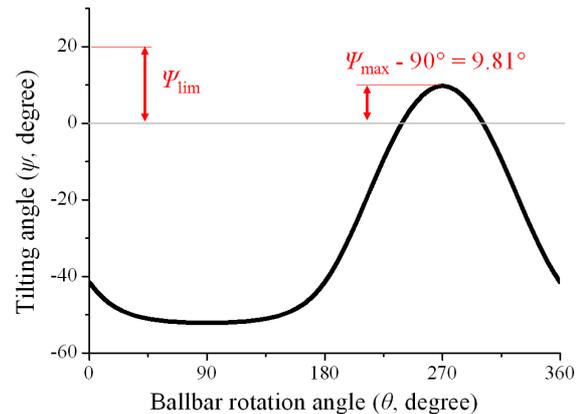
시 구동축의 명령 계산이 가장 까다롭고 경로점마다 볼바 부품들 사이의 끼인각이 계속 변하는 A-C 축 동시 구동에 대한 원호 경로를 사용하였다.

$\phi=135^\circ$ 일 때의 A-C 축 동시 구동 원호 경로에 대해 식(12)에 의해 계산된 구동축 입력값은 Fig. 8 과 같이 나타난다. 또한 이 구동축 명령에 해당하는 각 원호 경로점에서의 볼바의 틸팅각을 사전에 계산하여 측정 가능성을 검사한다. Fig. 9 에 나타나듯 볼바 틸팅각의 최대값은  $9.81^\circ$ 이며 제조사에서 허용하는 최대 틸팅각( $20^\circ$ )보다 작아 볼바 부품들의 물리적 간섭이 발생하지 않는다.

실제 볼바 초기 설치 모습은 Fig. 10 에 보이며 반시계 방향의 원호 경로를  $5^\circ$ 씩 증분하며 측정하는 준정적 측정 방법을 사용하였다. 볼바 측정은 볼바 측정 범위 내에서 물리적 간섭 없이 무사히 이루어졌다. 측정 결과 데이터는 Fig. 11 에 나타나 있으며 정확한 원호에서 벗어난 왜곡된 형상은 오차를 포함하고 있음을 의미한다. 이는 준정적 측정의 결과이므로 요소부품들의 불완전한 형상, 조립 및 열에 의한 팽창 등 기하학적 오차가 주원인



**Fig. 8** Generated rotation angles of the A axis and the C axis using the proposed technique



**Fig. 9** Tilting angle of the ball-bar in the experiment

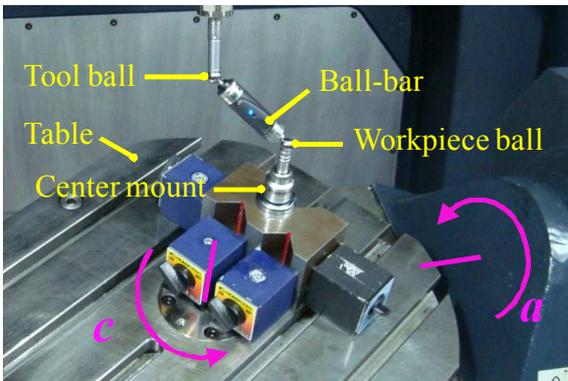


Fig. 10 Experimental setup

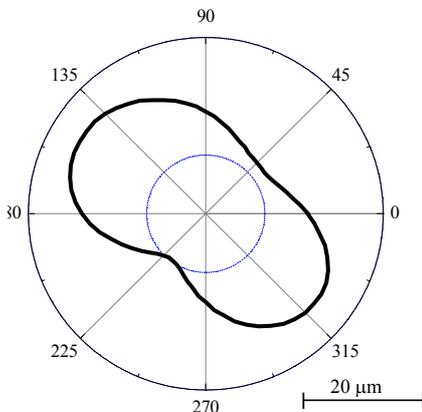


Fig. 11 Ball-bar measurement data with the generated circular path

으로 알려져 있다.<sup>(15)</sup>

### 7. 결론

볼바 측정 전 공작기계를 구동시키기 위해 필요한 작업으로 측정용 원호 경로 생성, 동시 구동축의 입력 명령 생성, NC 데이터 입력, 볼바 셋업 등이 요구된다. 현재까지 출시된 상용 볼바의 경우 직선 3 축 장비 전용 소프트웨어를 제공하고 있으며 원호보간(G02, G03) 명령을 이용한 NC 데이터 생성 기능만을 지원한다. 따라서 상용 볼바 소프트웨어의 기능 활용만으로는 회전축을 포함하는 다축 동시 구동 측정이 불가능하며 CAM 소프트웨어와 같은 공구 경로 생성 프로그램을 활용하여야 한다. 하지만 CAM 소프트웨어를 활용하여 볼바 측정용 원호를 생성하는 것은 공작기계의 구조 형태, 사용되는 동시 구동 축 및 측정 셋업 조건 등 다양한 기계 구조와 변경된 측정 환경에 따라 매번 많은 시간과 노력을 필요로 한다.

본 연구는 5 축 공작기계의 볼바 측정을 위해서 임의의 2 축을 동시 구동시키는 원호 경로 생성 기법을 소개하였다. 이 기법은 볼바로 측정 가능

한 작업공간에 대한 구 벡터와 2 축 동시 구동 시의 볼바 방향 벡터가 동일함을 이용한 연립방정식을 세우고, 두 구동 축의 기계명령 값의 해를 구하는 과정이다. 제안한 기법은 기계 구조 및 구성에 관계없이, 그리고 CAM 소프트웨어를 사용하지 않고 어느 경우에도 적용 가능한 기술이다. 사례 연구로서 각 경우의 기구학 관계로부터 기계 정보나 측정 조건에 맞는 최종 원호 경로 수식을 유도하였으며 또한 볼바 틸팅각 계산 방법을 제시하여 사전 측정 가능성 검사를 가능하게 하였다. 제안한 연구의 타당성은 5 축 공작기계의 A-C 축을 동시 구동 축으로 하는 볼바 측정 실험을 통해서 확인하였다.

### 후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소지원사업으로 수행된 연구임(No. 2010-0020089).

### 참고문헌

- (1) Hong, C., Ibaraki, S. and Matsubara, A., 2011, "Influence of Position-Dependent Geometric Errors of Rotary Axes on a Machining Test of Cone Frustum by Five-Axis Machine Tools," *Precision Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp.1~11.
- (2) Uddin, M. S., Ibaraki, S., Matsubara, A. and T. Matsushita, 2009, "Prediction and Compensation of Machining Geometric Errors of Five-axis Machining Centers with Kinematic Errors," *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp.194~201.
- (3) Ihara, Y., Lin, S., Kakino, Y. and Ahmad, Z.A., 1998, "Analysis of the Motion Accuracy of 5-Axis Controlled Machining Centers Using DBB Method," *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 188~1983.
- (4) Mayer, J. R. R., Mir, Y. A. and Fortin, C., 2000, "Calibration of a Five-Axis Machine Tool for Position Independent Geometric Error Parameters Using a Telescoping Magnetic Ball Bar," *Proceedings of the 33rd International MATADOR Conference 2000*, pp. 275~280.
- (5) Lee, D. M., Zhu, Z., Lee, K. I. and Yang, S. H., 2011, "Identification and Measurement of Geometric Errors for a Five-axis Machine Tool with a Tilting Head Using a Double Ball Bar," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp.337~343.
- (6) Tsutsumi, M. and Saito, A., 2004, "Identification of

- Angular and Positional Deviations Inherent to 5-axis Machining Centers with a Tilting-rotary Table by Simultaneous Four-axis Control Movements," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 12-13, pp. 1333~1342.
- (7) Lee, K. I., Lee, D. M. and Yang, S. H., 2012, "Parametric Modeling and Estimation of Geometric Errors for a Rotary Axis using Double Ball bar," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-011-3834-0.
- (8) Liang, H., Hong, H. and Svoboda, J., 2002, "A Combined 3D Linear and Circular Interpolation Technique for Multi-axis CNC Machining," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 305~312.
- (9) Bohez, E., Makhanov, S.S. and Sonthipermpon, K., 2000, "Adaptive Non-linear Tool Path Optimization Technique for Five-axis Machining," *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 17, pp. 4329~4343.
- (10) Sorby, K., 2007, "Inverse Kinematics of Five-axis Machines Near Singular Configurations," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 2, pp. 299~306.
- (11) Lei, W. T., Sung, M. P., Liu, W. L. and Chuang, Y. C., 2007, "Double Ballbar Test for the Rotary Axes of Five-axis CNC Machine Tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.47, No. 2, pp.273~285.
- (12) Tsutsumi, M., Yumiza, D., Utsumi, K. and Sato, R., 2007, "Evaluation of Synchronous Motion in Five-axis Machining Centers With a Tilting Rotary Table," *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 1, pp. 24~35.
- (13) Manato, K. and Ihara, Y., 2007, "Ball Bar Measurement of Five-axis Conical Movement," *Lamdmap 2007*, Vol.7, pp. 34~43.
- (14) Renishaw, 2010, *QC20-W Wireless Ballbar System Description and Specifications*.
- (15) Lee, J. H., Yang, S. H., 2005, "Measurement of Geometric Errors in a Miniaturized Machine Tool Using Capacitance Sensors," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1402~1409.