

# 새로운 실시간 공구방향오차 모델에 기초한 5 축 연동제어 시스템

## 5-Axis Cross-Coupling Control System Based on a Novel Real-Time Tool Orientation Error Model

변제형<sup>1</sup>, 지성철<sup>1,✉</sup>

Jehyung Byun<sup>1</sup> and Sungchul Jee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)

✉ Corresponding author: scjee@dku.edu, Tel: 031-8005-3504

Manuscript received: 2010.4.27 / Accepted: 2010.5.19

*5-axis CNC machining now is getting popular because it can deal with complex shapes such as impeller, turbine blade and propeller without additional equipment or process, proving a set of various tool orientations. CAM software related to 5-axis machining is being developed quickly so that users can take advantage of potential capacities of 5-axis machine tools. However, only a few researches can be found in the area of control strategy development for 5-axis machining. This paper proposes a 5-axis cross-coupling control system based on a novel tool orientation error model. The proposed tool orientation error model provides accurate information on the tool orientation error in real time, which in turn enables directly controlling the tool orientation accuracy. The proposed control system also employs a contour error model to calculate the contour error and reflect it in the control as well. The accuracy of the proposed tool orientation error model is verified and the performance of the 5-axis cross-coupling control system in terms of both contouring and tool orientation accuracy is evaluated through computer simulations compared with existing 5-axis control systems.*

Key Words: 5-Axis Machine Tool (5 축 공작기계), Cross-Coupling Controller (연동제어기), Tool Orientation Error Model (공구방향오차 모델), Tool Orientation Accuracy (공구방향 정확도), Contouring Accuracy (윤곽추적 정확도)

### 1. 서론

5 축 공작기계는 기존 3 축 기계의 테이블을 회전시킬 수 있도록 하거나 기계의 헤드 부분을 회전시킬 수 있도록 구성한 시스템으로서, 현재 임펠러, 터빈 블레이드, 프로펠러, 항공기 부품, 임플란트 등의 가공에 이용되고 있다. 이러한 기계가공은 공통적으로 3 축 공작기계로는 가공이 아예 불가능하거나 부재를 이용해야 가공할 수 있기 때문에 추가 공정이 요구된다. 5 축 공작기계는 다양

하며 복잡하고 정밀한 고부가가치의 기계가공을 가능하게 하므로 3 축 공작기계에 비해 매우 고가임에도 불구하고 산업계의 수요는 계속 늘어갈 전망이다.

동시 5 축 가공에 관련해서 현재까지 주로 CAM 소프트웨어 개발에 대한 노력이 기울여져 왔으나 5 축 가공을 위한 제어에 대해서는 국내의 연구된 사례가 많지 않다. 특히, 5 축 공작기계에 대한 CNC 는 실제 가공정밀도와 직접적 관련이 있는 윤곽오차 및 공구방향오차를 제어에 반영

시키지 못하는 문제점을 안고 있다. 윤곽오차를 직접적으로 제어할 수 있는 연동제어기가 Koren<sup>1</sup>에 의해 처음 도입된 이래 다양한 형태로 여러 논문들<sup>2,3</sup>을 통해 제안되었는데, 기존의 연구들은 대부분 2 축 또는 3 축에 국한되어 공구방향오차를 고려하지 못하였다. 공구방향을 고려한 연구들<sup>3-7</sup>도 CAM 이나 보간기 등 가공 전단계 과정에 대한 것으로 가공 중에 발생하는 공구방향오차를 제어할 수 없다. 유일하게 Lo<sup>8</sup>에 의해 윤곽오차와 공구방향오차를 반영한 5 축 연동제어기가 제시된 바 있으나, 이 논문의 오차 모델은 이송속도가 빠르거나 곡률반경이 작을 때 부정확한 결과를 나타내는 한계가 있다.

본 논문에서는 실시간으로 정확한 윤곽오차 및 공구방향오차를 계산하여 제어에 반영할 수 있는 5 축 연동제어기를 제시한다. 이 제어기는 3 차원 윤곽오차 모델<sup>9</sup>에 새로운 공구방향오차 모델을 통합하여 보간기 출력과 위치 및 회전 각도 피드백만을 이용하기 때문에 기존의 독립 5 축 제어시스템에 통합이 가능하며, 기존 제어시스템의 윤곽 및 공구방향 추적성능을 획기적으로 개선하여 5 축 가공에서의 치수정확도를 크게 향상시킬 수 있다.

## 2. 제시된 5 축 연동제어 시스템

### 2.1 제시된 5 축 공구방향오차 모델

5 축 가공에서는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 3 축 가공에서 발생하는 추종오차와 윤곽오차뿐만 아니라 공구방향오차가 추가적으로 발생하게 된다.<sup>10</sup> 윤곽오차  $\epsilon$  은 기준 공구경로로부터 벗어난 거리로 정의할 수 있으며, 공구방향오차  $\epsilon_\theta$  는 기

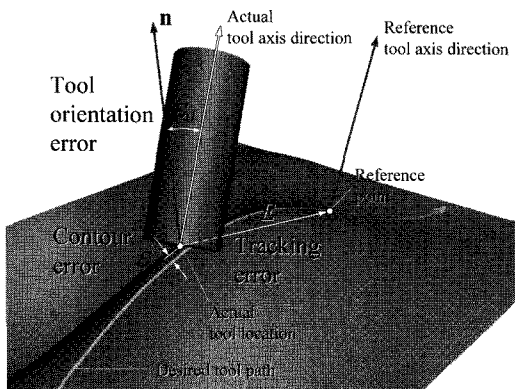


Fig. 1 Contour error and tool orientation error

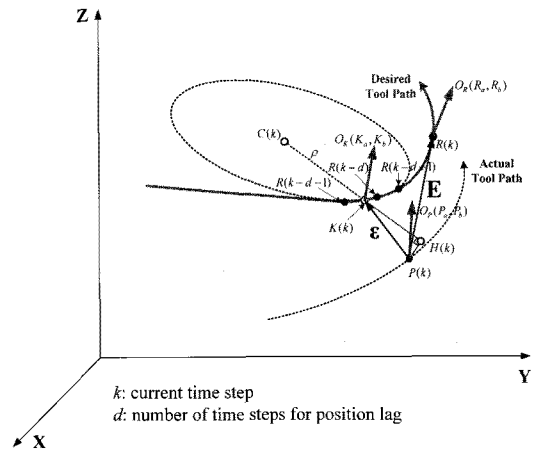


Fig. 2 The proposed tool orientation error model combined with a contour error model

준 공구방향과 실제 공구방향 사이의 각도로 정의할 수 있다. 윤곽오차와 더불어 공구방향오차는 공작물의 치수정확도를 결정짓는 가장 중요한 인자로 볼 수 있다.

이 두 오차를 동시에 효율적으로 제어시스템에 반영하기 위한 방법으로서 Fig. 2 에서와 같이 새로이 제시하는 공구방향오차 모델과 이전에 제시되었던 3 차원 윤곽오차 모델을 통합하여 운용한다. 5 축 기계에는 다양한 형태의 이송축과 회전축의 조합으로 288 가지의 서로 다른 기계구조가 가능하다.<sup>11</sup> 본 논문에서는 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 Fig. 3 의 틸팅 회전 테이블(tilting-rotary table)을 포함하는 수직형 5 축 기계를 대상으로 한다.

윤곽오차 모델과 공구방향오차 모델은 실시간 공구위치와 가장 가까운 3 개의 보간점을 이용하여 오차를 계산한다는 공통점을 통해 상호 통합이 가능하다. 즉, 현재 시간단계 k에서의 실제 공구위치  $P(k)$ 와 비퍼에 저장해 둔 보간기 위치 출력값

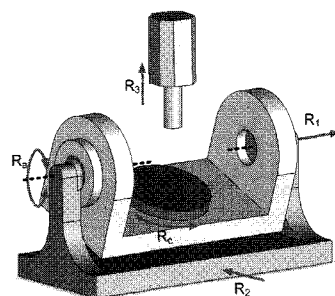


Fig. 3 Mechanical configuration of a 5-axis machine tool

과의 거리 비교를 통해 가장 가까운 보간점  $R(k-d)$  를 찾는다. 여기서,  $d$  는 위치주종 관점에서 시간지연의 단계를 나타낸다. 이 점과 이웃하는 두 보간점  $R(k-d-1)$  과  $R(k-d+1)$  을 이용하여 세 점이 일직선상에 있지 않다는 가정하에 중심을  $C(k)$  로 하는 가상의 3 차원 원을 정의한다. 그리고 이 3 차원 원을 포함하는 평면과 실제 공구위치  $P(k)$  에서 이 평면에 내린 수직선의 교점  $H(k)$  를 구한다. 원의 중심  $C(k)$  와  $H(k)$  를 잇는 직선과 원과의 교점  $K(k)$  를 찾으면 점  $K(k)$  를 실제 공구위치  $P(k)$  와 가장 가까운 기준 공구경로 위의 점으로 근사할 수 있다. 그 결과, 윤곽오차와 공구방향오차를 각각 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)^T = (K_x - P_x, K_y - P_y, K_z - P_z)^T \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = (\varepsilon_a, \varepsilon_c)^T = (K_a - P_a, K_c - P_c)^T \quad (2)$$

식 (2)에서  $K_a, K_c$  는 점  $K(k)$  에서 기계 좌표계의 A, C 축에 대한 기준 회전 이송을 나타내며,  $P_a, P_c$  는 점  $P(k)$  에서의 실제 회전 이송이다. 이것은 주변 보간점에서 주어진 공구방향 벡터를 이용하여 추정된다. 즉, 한 제어주기 동안 공구방향의 변화가 크지 않다는 가정하에서 점  $R(k-d-1), R(k-d), R(k-d+1)$  에서의 공구방향 벡터를 각각  $O(k-d-1), O(k-d), O(k-d+1)$  라 하면  $K(k)$  에서 미지의 공구방향 벡터  $O_K(k)$  는  $R(k-d-1), R(k-d), R(k-d+1)$  과  $K(k)$  사이의 거리 비가  $O(k-d-1), O(k-d), O(k-d+1)$  과  $O_K(k)$  가 이루는 각도 비와 서로 같게 되도록 Fig. 3 의  $\theta$  를 계산한다. 이  $\theta$  값을 아래 식 (3)의 로드리게스 회전 공식(Rodrigues' rotation formula)에 적용하여  $R(k-d)$  에서의 공구방향 벡터  $O(k-d)$  를 Fig. 4 와 같이 회전시키면  $O_K(k)$  가 구해지며 역기구학을 이용하여  $K_a$  와  $K_c$  를 얻을 수 있다.

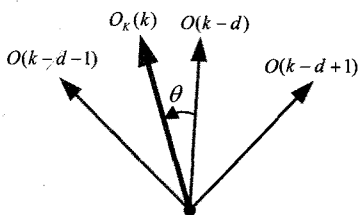


Fig. 4 The relation among the tool orientation vectors

$$R(\theta) = I + O \sin \theta + O^2 (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

여기서,  $I$  는 3x3 단위행렬이며

$$O = \begin{bmatrix} 0 & -O_z(k-d) & O_y(k-d) \\ O_z(k-d) & 0 & -O_x(k-d) \\ -O_y(k-d) & O_x(k-d) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$O(k-d) = [O_x(k-d), O_y(k-d), O_z(k-d)]^T \quad (5)$$

### 2.2 제시된 5 축 연동제어기

앞서 설명한 윤곽오차 모델과 새로이 제시된 공구방향오차 모델을 기반으로 하는 연동제어기를 기존의 독립 5 축 제어기에 통합시킨 새로운 제어 시스템의 구조를 Fig. 5 에 나타내었다. 보간기로부터 출력되는 기준 공구위치점  $R_x, R_y, R_z$  와 기준 공구방향벡터  $O_x, O_y, O_z$  는 역기구학 행렬을 이용하여 기계좌표에 맞도록 기준 직선 이송  $R_1, R_2, R_3$  와 기준 회전 이송  $R_a, R_c$  로 변환된다. 이 값들은 독립된 각 구동축의 서보 시스템에 기준 입력으로 각각 전송되어 시스템이 구동되고, 시스템은 실제 직선 이송  $P_1, P_2, P_3$  와 실제 회전 이송  $P_a, P_c$  를 피드백 신호로 제어기에 전송한다.

앞 절에서 언급한 바와 같이, 윤곽오차 모델은 보간기로부터 얻은 기준 공구위치점  $R_x, R_y, R_z$  와 실제 직선 이송  $P_1, P_2, P_3$  로부터 정기구학 행렬을 통해 실제 공구위치점  $P_x, P_y, P_z$  를 구하여 윤곽오차를 계산한다. 또한 공구방향오차 모델에서는 기준 회전 이송  $R_a, R_c$  와 실제 회전 이송

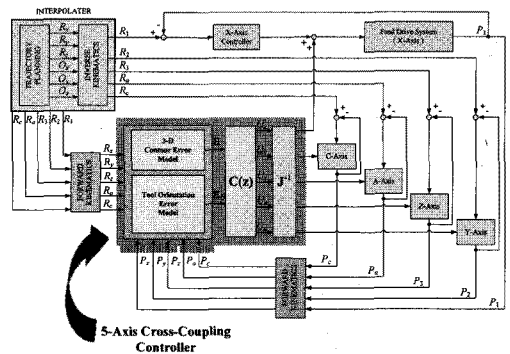


Fig. 5 Schematic of the proposed 5-axis cross-coupling control system

$P_a, P_c$  를 이용하여 공구방향오차를 구한다. 5 축 연동제어기에는 PID 제어 법칙을 적용하여  $C^i(z)\mathbf{I}$  ( $i=1,2,3,a,c$ ) 형태의 제어기를 사용한다. 여기서,  $\mathbf{I}$  는  $5 \times 5$  단위행렬이며  $C^i(z)$  는 식 (6)과 같다. 독립축 위치 제어기에는 게인  $K_p$  의 비례 제어를 사용한다.

$$C^i(z) = C_p^i + C_i^i \frac{Tz}{z-1} + C_d^i \frac{z-1}{Tz} \quad (6)$$

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서 새롭게 제시하는 공구방향오차 모델의 타당성과 5 축 연동제어기의 성능 평가를 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3 의 킬팅 회전 테이블을 포함하는 기계구조를 반영하였고, A 축과 C 축의 감속비를 각각 1/180 과 1/90 로 설정하였다. 이와 같은 5 축 기계구조에 대하여 기계 좌표계와 공작물 좌표계 사이의 변환행렬을 구성하였으며, 연동제어기 출력값에 기계구조가 반영되어 각 서보 드라이브에 전송될 수 있도록 역자코비안(inverse Jacobian) 행렬을 식 (7)과 같이 구성할 수 있다.<sup>8</sup> 이 식에서 위첨자  $d$  와  $w$  는 각각 기계 좌표계와 공작물 좌표계를 나타낸다.

$$\mathbf{J}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^d}{\partial P_j^w} \end{bmatrix}, \quad i, j = x, y, z, a, c \quad (7)$$

Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 식 (7)을 통해 공작물 좌표계상의 5 축 연동제어기 출력을 기계 좌표계에 대한 출력으로 변환하여 해당 구동축의 제어명령을 보정한다.

시뮬레이션에서 기준 공구경로는 식 (8)과 같

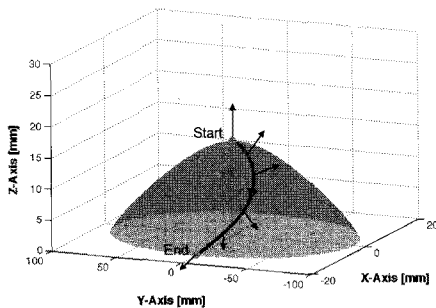


Fig. 6 Reference tool path and orientation

은 매개변수 방정식으로 정의하였고 기준 공구방향은 공구경로에 수직으로 설정하였으며 Fig. 6 에 나타내었다.

$$\begin{cases} R_x(u) = 15u \\ R_y(u) = 80u^3 - 80u \\ R_z(u) = -6.4u^6 + 12.8u^4 - 21.4u^2 + 15 \end{cases} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (8)$$

매개변수 곡선 보간기를 통해 식 (8)로부터 보간점을 계산하였다. 이 때 이송속도는 1 m/min, 3 m/min 의 두 가지로 설정하였고, 초기 가속시간은 0.15 sec, 제어주기는 0.001 sec 로 하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터는 Table 1 과 같다.

Table 1 System parameters in the simulation

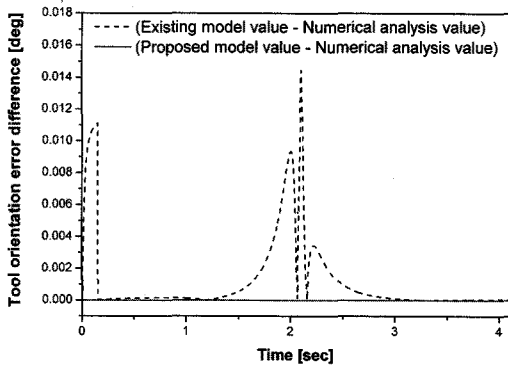
Parameters	X-axis	Y-axis	Z-axis	A-axis	C-axis
Open-loop gain [sec <sup>-1</sup> ]	25.40	25.17	25.37	0.0051	0.0101
Time constant [msec]	5.76	5.77	5.50	5.85	5.75
Axial controller gain	3.2			16070	8101
Cross-coupling controller gains	$C_p$	22.5		112491	56709
	$C_l$	17.6		78744	39696
	$C_d$	0.0008		4.0175	2.0253

### 3.1 제시된 3 차원 공구방향오차 모델의 성능 평가

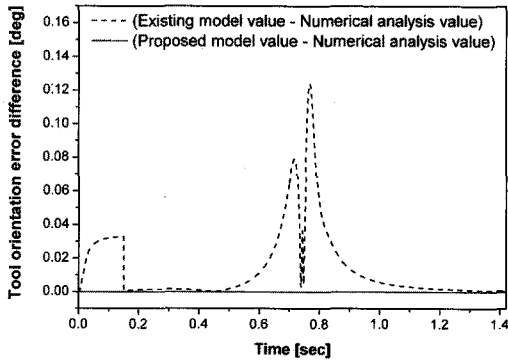
먼저 본 논문에서 제시하는 공구방향오차 모델의 정확도를 평가하였다. 제시된 공구방향오차 모델의 출력과 기존 오차 모델<sup>8</sup>의 출력에 대해, 별도의 수치해석을 통해 구한 오차값과의 차이를 각각 구하여 Fig. 7 에 비교하였다. 이 결과로부터 제시된 공구방향오차 모델이 이송속도에 관계없이 수치해석 결과와 거의 차이가 없는 수준으로 기존의 공구방향오차 모델에 비해 월등히 우수한 정확도를 나타냄을 알 수 있다. 반면에 기존 모델에서는 이송속도의 증가에 따라 오차의 정확도가 크게 저하되는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 부정확한 모델 결과는 제어시스템의 공구방향 추적 성능을 악화시키는 직접적인 원인이 된다.

### 3.2 제시된 5 축 연동제어기의 성능 평가

윤곽 및 공구방향 추적 성능의 관점에서 본 논문에서 제시된 5 축 연동제어기, 기존의 5 축 연동



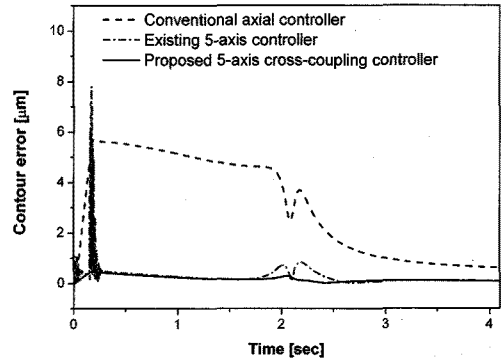
(a)



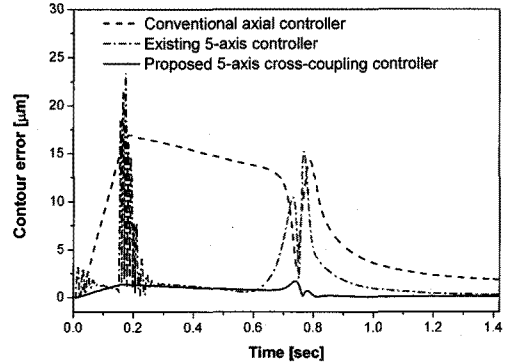
(b)

Fig. 7 Comparison of the proposed and existing contour error models: (a) 1 m/min; (b) 3 m/min

제어기, 그리고 보편적으로 사용되는 독립 5 축 제어기의 윤곽오차와 공구방향오차를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 각각 비교하였다. 그림에서 실선으로 표시한 것이 제시된 5 축 연동제어기, 점선으로 나타낸 것 (existing 5-axis controller)이 기존 5 축 연동제어기,<sup>8</sup> 일점쇄선이 개별적인 독립축 제어기(conventional axial controller)의 결과를 나타낸다. 공정한 성능 비교를 위해 Table 1 과 같이 모든 구동축별 위치 제어기 게인(axial controller gain), 그리고 두 연동제어기 게인 각각에 대해 동일한 값을 사용하였다. 이미 알려진 바와 같이 Fig. 8 의 결과로부터 연동제어기가 개별적인 독립축 제어기의 윤곽추적 성능을 크게 개선함을 확인할 수 있다. Fig. 9 의 결과에서 볼 수 있듯이 정확한 공구방향오차 모델에 기초하여 제시된 5 축 연동제어 시스템은 다른 두 제어시스템에 비해 공구방향오차를 크게 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 이 결과로부터 기존



(a)



(b)

Fig. 8 Comparison of the contouring accuracy: (a) 1 m/min; (b) 3 m/min

의 5 축 연동제어 시스템은 특히 고속의 이송속도에서 그 공구방향오차 모델의 부정확도로 인하여 오히려 독립축 제어시스템보다 공구방향 추적 성능이 떨어질 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 5 축 CNC 가공에 대한 새로운 공구방향오차 모델을 제시하였으며, 이 모델과 기존의 윤곽오차 모델을 통합하여 윤곽오차 및 공구방향오차를 직접적으로 제어하는 5 축 연동제어 시스템을 제시하였다. 제시된 공구방향오차 모델은 실시간으로 실제 공구위치와 가장 가까운 점을 구하는 알고리즘을 윤곽오차 모델과 공유한다. 따라서 두 모델이 쉽게 통합될 수 있을 뿐만 아니라 보간기 출력과 서보 시스템의 위치 피드백과 회전 각도 피드백만을 모델의 입력으로 하기 때문에 부

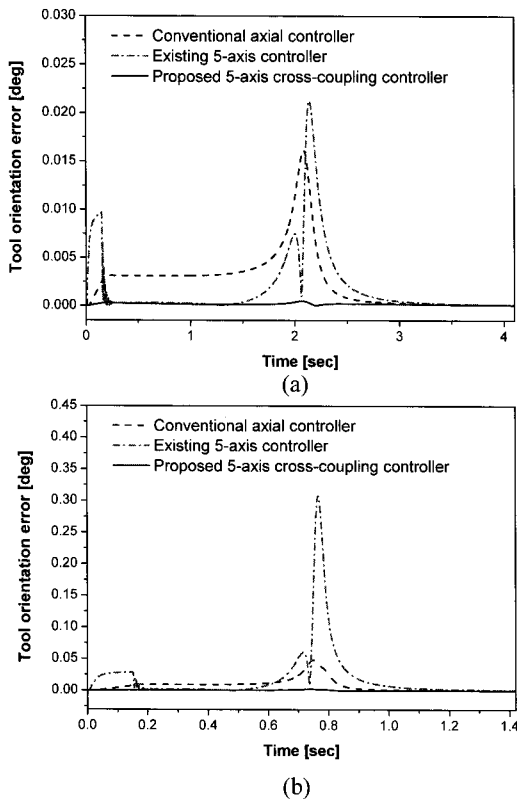


Fig. 9 Comparison of the tool orientation accuracy: (a) 1 m/min; (b) 3 m/min

가적인 장치없이 기존의 CNC 제어루프에 통합이 가능하다는 장점을 갖는다. 또한, 제시된 5 축 연동제어 시스템은 기존의 오차 모델보다 정확하게 실제 오차를 반영하므로 제어성능에 있어 월등한 윤곽정확도와 공구방향정확도를 나타냄을 컴퓨터 시뮬레이션으로 검증하였다. 향후 5 축 CNC 테스트베드에 제시된 5 축 연동제어 시스템을 구현하여 실제적인 성능 평가를 수행할 계획이다.

### 후 기

이 연구는 2008 년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

1. Koren, Y., "Cross-Coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.

- 102, No. 4, pp. 265-272, 1980.
2. Erkokmaz, K. and Altintas, Y., "High Speed Contouring Algorithm for CNC Machine Tools," Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC-Vol. 64, pp. 463-469, 1998.
3. Ivanenko, S. A., Makhanov, S. S. and Munlin, M. A., "New Numerical Algorithms to Optimize Cutting Operations of a Five-axis Milling Machine," Applied Numerical Mathematics, Vol. 49, No. 3-4, pp. 395-413, 2004.
4. Chiou, J. C. J., "Accurate Tool Position for Five-axis Ruled Surface Machining by Swept Envelope Approach," Computer-Aided Design, Vol. 36, No. 10, pp. 967-974, 2004.
5. Makhanov, S. S. and Ivanenkob, S. A., "Grid Generation as Applied to Optimize Cutting Operations of the Five-Axis Milling Machine," Applied Numerical Mathematics, Vol. 46, No. 3-4, pp. 331-351, 2003.
6. Munlina, M., Makhanova, S. S. and Bohez, E. L. J., "Optimization of Rotations of a Five-axis Milling Machine Near Stationary Points," Computer-Aided Design, Vol. 36, No. 12, pp. 1117-1128, 2004.
7. Ho, M. C. and Hwang, Y. R., "Machine Codes Modification Algorithm for Five-axis Machining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 142, No. 2, pp. 452-460, 2003.
8. Lo, C. C., "A Tool-Path Control Scheme for Five-Axis Machine Tools," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, No. 1, pp. 79-88, 2002.
9. Jee, S. and Koo, T., "3-Axis Coupling Controller for High-Precision/High-Speed Contour Machining," Transactions of the KSME A, Vol. 28, No. 1, pp. 40-47, 2004.
10. Jee, S., Lee, H., Byun, J., Lim, J., Lee, J. and Huh, K., "Design Technology of a Multi-Axis Cross-Coupling Controller for a Multi-Path e-CNC," Journal of the KSPE, Vol. 26, No. 4, pp. 16-22, 2009.
11. Chen, F. C., "On the Structural Configuration Synthesis and Geometry of Machining Centres," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 215, No. 6, pp. 641-652, 2001.