일정 이송률을 제어한 5축 가공용 Post-processor 개발

Development of post-processor for constant feedrate controlled 5-axis machining

*오지영[1], 황종대[2], #정윤교[3]

*J. Y. Oh[1], J. D. Hwang[2], # Y. G. Jung(ygjung@changwon.ac.kr)[3]

[1] 창원대학교 대학원 기계공학과, [2]창원대학교 TIC, [3]창원대학교 기계공학과

Key words : 5-Axis machining, Post-processor, CL Data, NC Data, Feed rate

1. 서론

5축 가공은 3개의 직진이송축에 2개의 회전이송축을 추가함으로써 자유도가 확장되어 공구의 접근성이 좋아지는 장점을 갖는다. 이러한 장점은 터보기계류 부품 및 특수가공 분야로 가공영역을 확장하는 결과를 낳았으며 치구 및 총형커터 사용을 줄일 수 있고, 금형 가공에서 공구길이를 감소하여 강성을 높였으며, 공구 플랭크면 사용을 통한 항공기 부품 가공 성능 형상을 도모하게 되는 등 다양한 기술적 진보를 꾀하게 되었다.

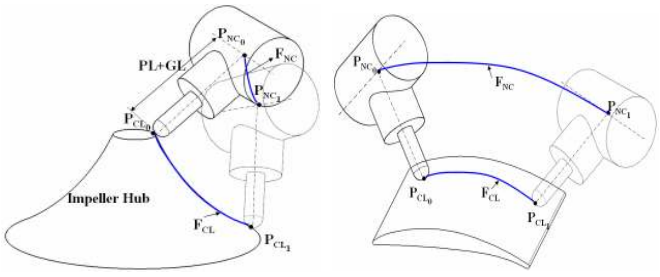
그러나 5축가공의 이러한 장점에도 불구하고 회전 이송축의 부가에 따른 축이송계의 복잡한 구동은 다양한 5축기계 메커니즘에 대한 Post-processing 문제를 제기하였으며 이에 대해 기존 연구에서[1] 대표적인 6개 메커니즘에 대한 Post-processing을 효과적으로 수행할 수 있는 5축가공용 범용 Post-processor를 개발한 바 있다. 본 보에서는 6가지의 기본 메커니즘 이외에 테이블 틸팅축이 X축 중심으로 45도 회전된 상태로 틸팅 및 로테이션 이송을 하는 특수한 형태의 메커니즘을 추가함으로써 기존 연구의 질적 향상을 도모하고 일정 이송률 제어 실험에 적용하였다. 특수한 형태 메커니즘에 대한 관련연구가[2] 있었으나 핵심요소인 틸트각과 로테이션각에 대한 정의가 없어 적용상의 한계가 있었다.

5축가공 및 Post-processing 과정에서 또하나 중요한 요소는 회전이송 시 발생하는 공구 끝 이송속도와 축이송계 이송속도의 불일치에 따른 실제 가공 이송속도의 변동이며 이로 인한 가공시간의 지연 및 이송률 과다에 따른 과부하 등의 문제가 있다. 공구끝의 이송속도를 일정하게 제어하기 위한 관련 연구가[3] 수행되었으나 CL 데이터 자체의 곡률 반경 및 회전각이 큰 경우 단순히 최단직진거리로 새로운 이송속도를 계산함으로써 일정 이송속도의 오차를 보정하지 못하는 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 직진이송에 비하여 회전이송 거리가 큰 경우의 가공에 대해서도 일정한 이송속도를 제어할 수 있도록 하는 포스트프로세서를 개발함으로써 표면조도와 절삭부하를 최소화할 수 있는 안정적인 5축가공용 Post-processor를 개발 및 검증하고자 하였다.

2. 이송률제어 알고리즘

자유곡면의 5축가공에서 곡면의 곡률이 클수록 역기구해로 구한 NC 데이터와 가공물을 실제 절삭하는 공구 끝점인 CL 데이터간의 이송률은 큰 차이를 보인다. 이는 5축제어가공에서의 이송속도는 CL 데이터의 이송속도가 아니라 역변환한 NC 데이터에 의한 이송축의 이송속도를 나타내기 때문이다[3]. Fig. 1은 이에 대한 개념도를 나타낸다. Fig. 1의 (a)는 임펠러 허브부에 대한 5축가공과 같이 오목한 형상을 가공할 때 이송률의 오차를 나타내는 개념도로서 CL 데이터의 이송거리가 피봇길이와 게이지길이를 합한 거리(PL+GL) 만큼 옵셋된 공구 틸팅축에서의 NC 데이터의 거리보다 길어지게 되어 주어진 NC 데이터의 이송률에 비해 속도가 빨라지게 되므로 절삭부하가 커지는 경우이다. 반면 Fig. 1의 (b)는 블레이드 곡면 가공과 같이 볼록한 형상의 경우로서 이 때는 오목한 경우와 반대로 CL 데이터의 이송거리가 NC 데이터의 이송거리보다 짧아지게 되어 불필요한 가공시간의 지연이 예상된다.

따라서 NC 데이터로 지령한 이송률을 실제가공 경로인 CL 데이터의 이송거리에 맞게 재설정해주어야 하며 식 (1)과 같이 구할 수 있다.



(a) Concave shape (b) Convex shape

Fig. 1 Schematic of feedrate deviation in 5-axis machining

$$D_{CL} = |P_{CL1} - P_{CL0}|, \quad T_{CL} = D_{CL}/F_b \tag{1}$$
$$F^i = (P^i_{NC1} - P^i_{NC0})/T_{CL}, \quad F_a = \sqrt{\sum_{i=1}^{5}(F^i)^2}$$

여기서, D_{CL} : CL 데이터 P_{CL1}과 P_{CL0}간의 거리
F_b : 지령 이송속도, T_{CL}: D_{CL}거리를 F_b로 갈 때 소요시간
F^i: 각 축에서의 보정 이송속도, F_a: 축보정 이송속도

식 (1)에서 CL 데이터의 이송거리, D_{CL}은 현재 CL 데이터와 다음 CL 데이터 사이의 직선거리이다. 그러나 5축가공에서 많은 경우 Fig. 2의 항공기 엔진 하우징 부품의 슬롯가공과 같이 회전이송만 존재하거나 직선이송거리가 회전이송거리에 비하여 매우 작을 수 있다. 이 때 직선거리 L과 회전이송거리 L'간의 거리 오차에 의하여 일정한 이송률을 제어하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)와 같이 곡률의 변화가 없는 경우에는 식 (1)에서 구한 보정 이송속도, F_a를 사용하고 그렇지 않은 경우에는 실제 회전이송거리를 고려한 새로운 이송속도, F_a'을 적용함으로써 공구 끝에서 어떠한 경우라도 일정한 이송속도를 제어할 수 있도록 하였다.

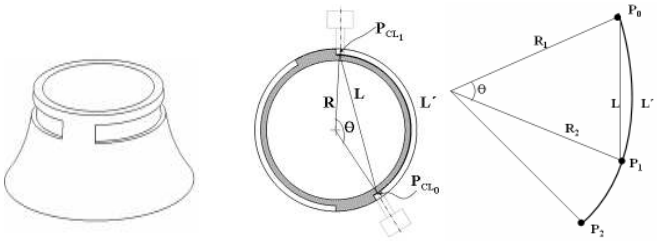


Fig. 2 Schematic of compensated feedrate for rotary motion

$$\text{If } \overrightarrow{P_1 - P_0} = \overrightarrow{P_2 - P_1} \text{ then } F_a = F_a \text{ , else}$$
$$F_a = F_a', \quad F_a' = KF_a, \quad K = \frac{L'}{L} \tag{2}$$

여기서, $\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P_{0x}P_{1x} + P_{0y}P_{1y} + P_{0z}P_{1z}}{|P_0||P_1|}\right)$
$R = \max(R_1, R_2), \quad L = |P_0 - P_1|, \quad L' = R\theta$
F_a' : 회전이송 보정 이송속도

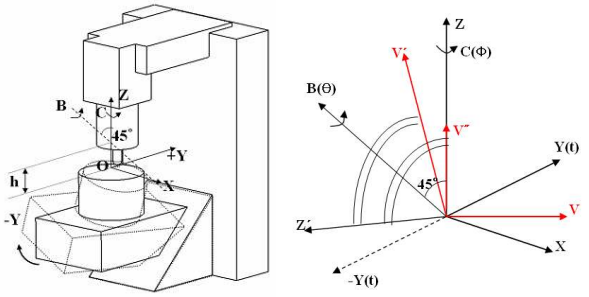
3. 이송률 제어를 고려한 Post-processor 개발

5축 가공기는 크게 3가지 형태의 메카니즘을 가지는데[1,3], 주축이 틸팅과 로테이션하는 경우(Head Tilting - Head Rotation,

이하 HT-HR)와 회전테이블이 틸팅과 로테이션을 하는 경우(Table Tilting - Table Rotation, 이하TT-TR) 및 공구가 틸팅하고 테이블이 로테이션하는 경우(HT-TR)로 구분된다. 기존 연구의[1] 범용 Post-processor에서는 이 중에서 가장 많이 사용되고 있는 6가지 메커니즘으로 각각 HT-HR(AC, AB), TT-TR(AC, BC), HT-TR(BC, AC) 타입을 구현하였다.

본 연구에서는 기존의 6가지 메커니즘 이외에 Z축이 X축 중심으로 45도 회전한 축을 틸팅 회전축으로 하는 특수한 경우의 메카니즘을 구현하였으며 메커니즘의 개념도는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 (a)는 70eV 5축가공기(DMG, Germany)의 구조를 보여주고 있으며 Fig. 3의 (b)는 틸팅축과 로테이션축을 정의하기 위한 개념도이다.

Fig. 3의 (b)에서 Z'은 Z축을 B축 중심으로 틸트각, θ만큼 회전했을 때의 벡터이고, V'은 공구축, V를 B축 중심으로 θ만큼 회전했을 때의 벡터이다. $\angle Z'Z = \angle Z'V'$이므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 70-eV 5-axis machine (b) Tilting and Rotation axis

Fig. 3 Special type of mechanism in 5-axis machine

$$Z_z' Z_z = Z_x' V_x' + Z_y' V_y' + Z_z' V_z' \tag{3}$$

여기서 Z'벡터와 V'벡터는 식 (4) 및 식 (5)로 부터 구할 수 있으며 틸트각, θ는 식 (6)와 같이 정의할 수 있다.

$$Z' = [Z]R_B(\theta) = (Z)R_x(45)R_y(\theta)R_x(-45) \tag{4}$$

$$V' = [V]R_B(\theta) = (V)R_x(45)R_y(\theta)R_x(-45) \tag{5}$$

$$\theta = \cos^{-1}(2u_k - 1) \tag{6}$$

B축의 틸트각(θ)이 정의되면 C축의 로테이션각(ϕ)를 식(7) 및 식 (8)로 부터 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} V'' = Z &= V'R_B(\theta)R_z(-\phi)R_B(-\theta) \\ &= VR_z(-\phi)R_B(-\theta) \\ &= VR_z(-\phi)R_x(45)R_y(-\theta)R_x(-45) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{\sin 45 \sin B u_i - u_j + u_j \cdot u_k}{u_i^2 + u_j^2}\right) \tag{8}$$

로테이션각과 틸트각이 구해지면 CL 데이터의 파트좌표계 위치벡터($\overrightarrow{P_p}$)를 NC 데이터의 머신좌표계 위치벡터($\overrightarrow{P_m}$)로 변환하며 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\overrightarrow{P_m} = \overrightarrow{P_p} \cdot T, \quad \text{여기서 } T = \prod_{k=1}^{8} T_k, \tag{9}$$

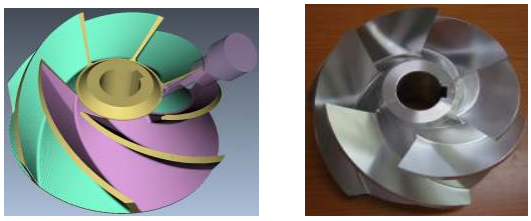
$$T_1 = T_{xyz}(x_0, y_0, z_0), \quad T_2 = R_z(-\phi), \quad T_3 = T_z(-h), \quad T_4 = R_x(45)$$
$$T_5 = R_y(\theta), \quad T_6 = R_x(-45), \quad T_7 = T_z(h),$$
$$T_8 = T_{xyz}(-x_0, -y_0, -z_0)$$

따라서 2절에서 구한 최종보정 이송률을 적용한 NC 데이터는 식(10)과 같다.

$$NC = \overrightarrow{P}_m, \ \theta, \ \phi, \ F_a \tag{10}$$

4. 이송률제어를 고려한 포스트프로세서의 검증

이송률제어를 고려한 포스트프로세서의 검증 실험은 Fig. 4와 같이 이송률제어를 안 한 블레이드 3개과 이송률제어를 한 블레이드 3개을 교차로 가공하여 수행하였다. 5축가공기는 앞절에서 정의한 특수한 메커니즘을 갖는 DMG사의 70-ev 5축가공기를 사용하였으며 해당장비에 대한 Post-processor 및 이송률 제어 성능평가를 위하여 블레이드 곡면에 대한 표면조도와 표면형상을 측정 및 촬영하였다. Table 1은 표면조도 측정 결과로서 이송률 제어를 수행한 경우 약 0.05μm정도 향상된 값을 얻을 수 있었다. Fig. 5는 표면형상을 공구현미경으로 촬영한 그림으로 이송률제어가 되지 않은 Fig. 5의 (a)에 비하여 이송률제어가 반영된 Fig. 5의 (b)가 전반적으로 양호한 상태임을 알 수 있다.

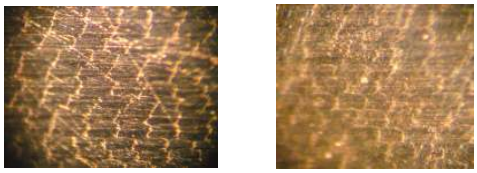


(a) Simulation cutting (b) Machined part

Fig. 4 5-axis NC machining with controlled feedrate

Table 1 Comparison of surface roughness between feedrate types

Feedrate control type	Roughness, $Ra(\mu m)$
Given feedrate	0.27
Controlled feedrate	0.22
Improvement of surface roughness	0.05



(a) Given feedrate (b) Controlled feedrate

Fig. 5 Photograph of machined surface

5. 결론

1. 공구축 이송계의 이송속도를 실제 가공과 관련한 CL 데이터의 이송속도로 보정하고 회전이송이 큰 경우에 대한 이차적인 이송속도 보정을 통하여 공구 끝에서 일정한 이송률로 절삭할 수 있도록 하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 기존에 개발한 5축가공용 범용 Post-Processor에 특수한 경우의 메커니즘을 추가하고 이송률이 제어된 새로운 NC 데이터를 생성함으로써 이송률이 제어된 5축가공용 Post-Processor를 개발하였다.

3. 일정한 이송률이 제어된 Post-processor 개발을 통하여 5축가공 시에 공구에 걸리는 부하를 일정하게 하여 표면조도결과가 0.05μm정도 향상하였으며 양호한 표면형상을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 조은정, 황종대, 정윤교, “5축가공용 Post-Processor 개발에 관한 연구”, 한국공작기계학회논문집, Vol. 12, No. 1, 2006
2. S.G. Han, Zhao , “A generalized simulation model for surface topography prediction on 5-axis ball-end milling”, Asian symposium for Precision Engineering and Nanotechnology, 2007
3. 이철수, 이제필, “공구 끝의 일정한 절삭속도를 위한 5축 NC가공 데이터의 이송속도 산출”, 한국 CAD/CAM 학회논문집, Vol. 6, No. 2, pp.69-77 , 2001