

공구 끝의 일정한 절삭속도를 위한 5축 NC 가공 데이터의 이송속도 산출

이철수*, 이제필**

Calculating the Feedrate of 5-Axis NC Machining Data for the Constant Cutting Speed at a CL-point

Lee, C. S.* and Lee, J. P.**

ABSTRACT

This paper describes a method of calculating the feedrate for the constant cutting speed at a CL-point in 5-axis machining. Unlike 3-axis machining, 5-axis machining has the flexibility of the tool motions due to two rotation axes. But the feedrate at a joint space differs from the feedrate at a tool tip(the CL-point) of the 3D Euclidean space for the tool motions. The proposed algorithm adjusts the feedrate based on 5-axis NC data, the kinematics of a machine, and the tool length. The following calculations is processed for each NC block to generate the new feedrate; 1) calculating the moving distance at the CL-point, 2) calculating the moving time by the given feedrate, 3) calculating the feedrate of each axis, 4) getting the new feedrate. The proposed algorithm was applied to a 5-axis machine which had a tilting spindle and a rotary table. Totally, the result of the algorithm reduced the machining time and smoothed the cutting-load by the constant cutting speed at the CL-point.

Key words : Feedrate, CL(cutter location)-point, Joint space, 5-axis machining, Direct kinematics solution, CNC(computerized numerical control)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

5축 가공은 최근에 자동차 외판 등의 프레스 금형과 플라스틱 사출 금형에도 점차 확산되고는 있지만, 임펠러와 터빈 블레이드, 박용 프로펠러, 항공기 일부 부품, 자동차 타이어 금형의 마스터 모델 등의 가공에 일반적으로 쓰이고 있다.

5축 기계는 3개의 선형 운동축에 2개의 회전 운동축을 더 갖고 있으므로, 3축 기계에 비하여 공구 원통면을 이용한 윤곽 가공과 효율적인 공구 자세, 3축 기계로 가공이 불가능한 곡면도 가공이 가능하다. 하지만 5축 가공은 NC 가공을 위한 공구 경로를 생성할 때

공작기계의 기구학적 모델링과 가공물에 대한 공구의 기울림 각도(heel angle), 절삭속도의 부여, 공구 간섭 체크, NC 코드 생성(post processing)을 고려하여야 한다^[1-3].

이러한 5축 가공에 대한 연구는 3축 CNC 밀링에 부가축을 이용한 연구^[4-5]를 비롯하여, 5축 NC 데이터의 생성^[6-9]과 검증^[20-24]에 관한 연구가 대부분이다. 5축 기계의 특징인 2개의 회전 운동축을 고려한 절삭속도에 대한 연구는 미미하다. 최근 5축 기계에도 생산성 향상에 대한 요구가 높아지면서 절삭속도에 대한 요구가 증대되었으며, 실제 가공에서도 중요한 가공 요소가 되었다.

3축 밀링 가공에서는 회전축이 없으므로 축 운동계(joint space)의 이송속도(feedrate)와 공구 끝부분의 이송속도가 일치한다. 하지만 자유곡면(sculptured surface)의 5축 가공은 곡면의 곡률이 클수록 주어진 NC가공 데이터에 의한 축 운동계의 가공물을 절삭하는 공구

*중신회원, 전남대학교 산업공학과
**학생회원, 전남대학교 산업공학과
- 논문투고일: 2000. 10. 9
- 심사완료일: 2001. 2. 19

끝부분에서의 이송속도는 현저한 차이를 보인다. 5축 NC 가공 데이터에 지령된 이송속도는 가공물을 절삭하는 공구 끝부분의 이송속도가 아니라 축 운동계의 이송속도이기 때문이다. 따라서 일반적으로 5축 CAM 시스템에서 5축 NC 가공 데이터를 생성할 때, 이송속도는 곡면의 곡률을 고려하여 적당한 경험치를 설정하는데 곡면마다 곡률이 모두 다르므로 쉽게 설정하기가 어렵다.

불룩한 형상의 자유곡면가공에서는 공구 끝부분 CL (cutter location)점의 이송속도가 축 운동계의 이송속도보다 더 작아지게 되므로 이송속도의 지연으로 총 가공시간이 증가하게 된다. 오목한 형상의 경우에는 반대로 공구 CL점의 이송속도가 실제 지령된 이송속도보다 커지게 되어서 절삭공구에 걸리는 가공 부하가 균일하지 않아 절삭공구의 파손을 일으킬 수 있다. 따라서 5축 CAM 시스템으로부터 전체적인 이송속도를 낮추거나 오목한 부분만의 적절한 이송속도를 재설정하여야 한다.

하지만 5축 CAM 시스템에서 이를 모두 고려하여 5축 NC 데이터를 산출하기 위해서는 가공할 기계의 기구학적 구조와 공구 길이 등을 알고 있어야만 가능하므로 다른 후처리 프로세서가 필요하게 되었으며, 5축 제어 CNC 컨트롤러 시스템에서 이에 대한 대응이 필요하게 되었다.

1.2 연구 범위

본 논문에서는 주어진 5축 NC 가공 데이터를 5축 기계의 기구학적 특성을 고려하여 공구 끝 부분의 CL점에서 일정한 이송속도를 갖는 방법을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 FANUC-15M 컨트롤러와 같은 이송속도 계산 방법을 갖는 5축 CNC 컨트롤러 시스템을 대상으로 한다. FANUC-15M 컨트롤러에서 자유곡면을 절삭하는 경우에 분당이송(mm/min)으로 이송속도가 지령되는데, Table 1에서와 같이 G94모드인 경우에는 선형 운동축의 거리 단위인mm와 회전 운동축의 회전 각도 단위인deg(=degree)를 동일시하여 이송속도를 적용한다^[25]. 즉, 지령된 이송속도를 선형 운동축의

1 mm와 회전 운동축의 1°를 동일시하여 각 축의 속도 성분으로 분해한다. G95모드인 경우에도 마찬가지이다.

식 (1)과 (2)에서 볼 수 있는 것처럼, 5축 제어 CNC 컨트롤러는 5축 기계의 구조가 선형 운동축과 회전 운동축으로 구성된 것을 전혀 고려하지 않고 지령된 이송속도를 각 축의 속도 성분으로 분해하여 축 운동계를 이송하게 된다^[25].

$$L = \sqrt{\sum_{a=1}^5 D_a^2} \quad (1)$$

$$F_a = \frac{D_a \times F_c}{L} \quad (2)$$

단, a : 축번호,

D_a : a 번째 축의 이송량,

L : 모든 축 이송량의 euclidean norm,

F_c : 지령된 이송속도,

F_a : a 번째 축의 이송속도

본 논문에서는 공구 끝부분 CL경로의 이송속도에 영향을 미치는 기계의 기구학적 모델, 공구 길이, 5축 NC 블록(이송속도 포함)을 고려하여 공구 끝부분 CL점에서 일정한 이송속도를 갖도록 모든 NC 블록에 새로운 이송속도를 설정한다. 이 이송속도는 FANUC-15M과 같은 이송속도 계산 방법(식 (1), (2)참조)을 갖는 5축 CNC 컨트롤러에 적용할 수 있도록 산출한다.

5축 기계는 3축 기계와는 달리 기계 형태에 따라 기구학(kinematics)적인 구조가 바뀌므로, 5축 기계 중 주축이 틸팅하고 테이블이 회전하는 기계에 적용하여 검증한다.

2. 공구 끝 CL점의 이송속도 산출

기계의 기구학적 자유도가 3인 3축 NC 밀링은 수평형인 경우 공구의 방향 벡터가 지면과 수평이며, 수직형인 경우 공구의 방향 벡터가 지면과 항상 수직이다. 5축 기계는 기계의 기구학적 자유도가 5이다. 이중 3개는 3축 NC 밀링과 같이 공구의 위치를 결정하는데 사용되고 2개는 공구의 방향 벡터를 결정하는데 쓰인다.

5축의 자유곡면가공에서 곡면의 곡률에 따라 간섭이 제거된 공구의 방향 벡터를 결정하게 되는데^[44], 공구의 방향 벡터가 급격하게 변화하는 곳에서 공구 끝부분 CL점의 이송속도와 축 운동계의 이송속도는 많은 차이가 생긴다. 예를 들면, 직각을 이루며 교차하는 두 곡면의 교차점에서는 공구의 법선 방향이 직각을 이루므로 공구 끝부분 CL점의 위치 변동량은 미미하

Table 1. The units of the F value where there is no decimal point (FANUC-15M)

Input system	Per minute command(G94)	Per revolution command(G95)
Command range	F1~F24000	F1~F50000
Metric Linear axis	1 mm/min	0.1 mm/rev
Rotary axis	1 deg/min	0.01 deg/rev

거나 없지만, 축 운동계는 기계의 기구학적 구조와 공구의 길이에 따라 긴 이송 체적을 갖게 된다. 곡면의 곡률에 따라 공구의 방향 벡터가 크게 변화하더라도 공구 끝 부분의 CL점에서 일정한 이송속도를 갖도록 하기 위해서는 기계의 기구학적 구조와 공구의 길이를 알고 있어야만 가능하다. 일반적인 5축 CAM 시스템에서 생성되는 5축 NC 가공 데이터는 축 운동계의 이송에 관한 위치값들이며, 고정된 이송속도를 갖는다. 축 운동계의 고정된 이송속도를 변화시켜 각 NC 블록마다 다르게 설정함으로써 CL점의 일정한 이송속도를 갖도록 한다.

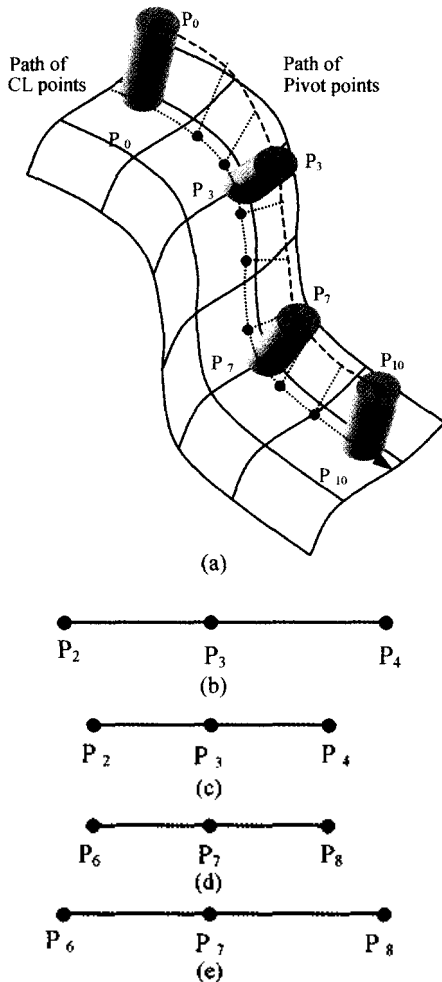


Fig. 1. Example of 5-axis machining (a) path of CL points and pivot points (b) distance between pivot points of a convex shape (c) distance between CL points of a convex shape (d) distance between pivot points of a concave shape (e) distance between CL points of a concave shape.

Fig. 1은 볼록한 부분과 오목한 부분을 가지고 있는 자유곡면에 대한 5축 가공 예를 나타낸 것이다. 볼록한 부분의 가공 영역인 P_3 을 기준으로 비교하여 보면, 축 운동계의 이송거리는 CL점의 이송거리보다 더 긴 것을 알 수 있다(Fig. 1(b), (c)참조). 오목한 부분의 가공 영역인 P_7 을 기준으로 전후를 비교하여 보면, 볼록한 부분과는 반대로 축 운동계의 이송거리는 CL점의 이송거리보다 더 짧은 것을 알 수 있다(Fig. 1(d), (e)참조).

5축 CAM 시스템에서 생성된 5축 NC 가공 데이터의 이송속도는 축 운동계를 기준으로 적용되므로 결국, CL점간의 이송속도는 곡면의 형상에 영향을 받아 지령된 이송속도와는 다른 값을 갖는다. 지령된 이송속도가 CL점에 적용되기 위해서는 5축 NC 가공 데이터의 모든 NC 블록에 대한 CL점을 구하고, 그 CL점간의 거리에 지령된 이송속도가 적용되도록 하여야 한다. 따라서 곡면의 곡률에 따라 CL점간의 직선 거리가 모두 다르므로 주어진 모든 NC블록의 이송속도는 당연히 다르게 산출된다.

Fig. 2는 5축 NC 블록에 대한 새로운 이송속도를 산출하는 과정을 도식화한 것이다. 5축 가공을 위해 주어진 NC 가공 데이터와 절삭 공구의 길이, 기계의 기구학적 구조를 바탕으로 하여 각 NC 블록의 시작점과 끝점에서 공구 끝부분 CL점을 직교 좌표계 상에서의

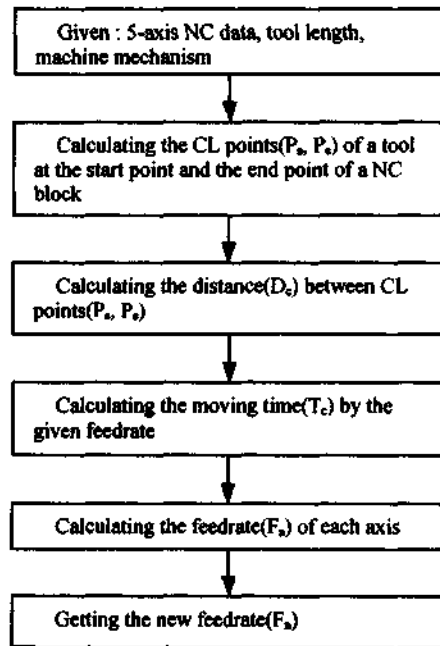


Fig. 2. Procedure of calculating the new feedrate for the constant cutting speed.

위치값(P_s, P_e)를 구한다. 새로 구한 두 CL점(P_s, P_e) 사이의 거리(D_c)를 구하고(식 (3)참조), NC 블록 상에서 지령된 이송속도로 나누어 두 CL점 사이를 이송할 이송 시간(T_c)을 구한다(식 (4)참조). 이송 시간(T_c)으로 각 축의 이송거리를 나누어 축별 이송속도(F_a)를 구하고(식 (5)참조), 이를 합성하여 최종적으로 그 NC 블록의 새로운 이송속도(F_n)를 구한다(식 (6)참조).

$$D_c = \sqrt{(P_s - P_e)^2} \tag{3}$$

$$= \sqrt{(P_{s_x} - P_{e_x})^2 + (P_{s_y} - P_{e_y})^2 + (P_{s_z} - P_{e_z})^2}$$

$$T_c = D_c / F_c \tag{4}$$

$$F_a = (N_{e_a} - N_{s_a}) / T_c \tag{5}$$

$$F_n = \sqrt{\sum_{a=1}^5 F_a^2} \tag{6}$$

- 단, a : 축번호,
- N_s : NC블록의 시작점,
- N_e : NC블록의 끝점,
- P_s : N_s 에서의 정기구해,
- P_e : N_e 에서의 정기구해,
- D_c : P_s 와 P_e 간의 직선 거리,
- T_c : 공구의 CL점에서 지령된 이송속도로 걸리는 시간,
- F_c : NC블록에 지령된 이송속도,
- F_a : a 번째 축의 이송속도,
- F_n : NC블록의 새로운 이송속도.

새로 산출된 이송속도(F_n)는 공구 끝부분 CL점의 이송속도가 일정하도록 산출된 값이므로, 축 운동계에는 각 NC 블록마다 다른 이송속도가 적용된다.

두 곡면이 직각을 이루며 교차하는 경우, 교차점에서는 D_c (식 (3)참조)가 0이거나 거의 0에 가까운 값이 된다. 또한 곡면의 곡률이 심하게 변하는 경우에도 마찬가지로 D_c 의 값이 아주 작아진다. D_c 의 값이 작아지면 상대적으로 각 축의 이송속도 값인 F_a (식 (4), (5)참조)가 설정된 최대 이송속도를 초과하게 되면 가공시에 기계에 무리를 주게 된다.

따라서 F_a 값이 설정된 각 축의 최대 이송속도를 초과하는 경우에는 설정된 각 축의 최대 이송속도와 F_a 값과의 비율을 구하여, 5축 중 가장 큰 비율 값을 선택한다(식 (7)참조). 그 비율로 모든 축의 새로운 이송속도($F(a)$)를 구하여(식 (8)참조), 해당 블록의 새로운 이송속도(F_n)를 구한다.

$$F_r = \max(F_a / FM_a) \tag{7}$$

$$F'_a = F_a / F_r$$

- 단, FM_a : a 번째 축의 최대 이송속도,
- F : NC블록에 지령된 이송속도,
- F'_a : a 번째 축의 한계치를 고려한 이송속도.

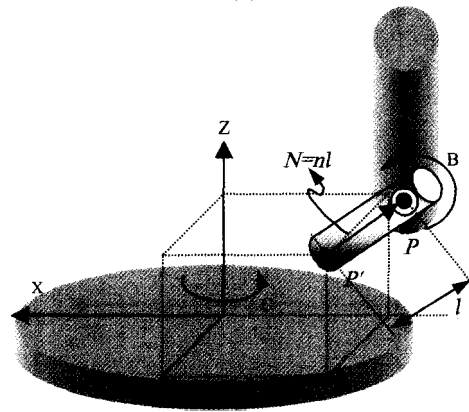
3. 적용사례

3.1 틸팅 주축과 로터리 테이블을 갖는 5축 기계의 구조과 기구학

5축 NC 밀링 기계는 크게 3가지 형태의 구조를 가진다²⁶⁾. 첫째는 일반 3축 밀링 기계에 2축 로터리 테이블을 올려 놓는 것이다. 2축 로터리 테이블에서 틸팅과 회전이 이루어진다. 둘째는 1축의 로터리 테이블과 공구가 틸팅하는 4축 기계를 사용하는 방법이며, 대형의 가공물을 가공할 때 적당하다. 셋째는 틸팅하고 회전하는 2개의 회전 운동축을 주축에 장착하는 경우가



(a)



(b)

Fig. 3. 5-axis machine and 5-axis mechanism with a tilting axis and a rotary table: (a) 5-axis machine (b) 5-axis mechanism.

지만, 이 구조는 기계 제작상의 어려움으로 많이 사용되지는 않는다. 본 논문에서는 주축이 틸팅하고 테이블이 회전하는 5축 NC 밀링 기계에 적용하여 검증한다.

Fig. 3은 직선 운동축 X, Y, Z 축과 주축에 틸팅축(B축)과 1축의 로터리 회전축(C축)을 가지고 있는 기계와 기구학적 메커니즘을 보이고 있다. 2축의 로터리 테이블이 틸팅, 회전하는 기계와는 달리 공구가 직접 회전을 하기 때문에 공구의 길이가 정기구해를 구하는데 고려된다. B축의 회전 중심점(P)에서 공구의 끝 부분의 CL점까지를 공구의 길이로 계산한다.

식 (9)는 틸팅되는 주축과 회전되는 테이블을 갖는 5축 기계의 정기구해를 구한 것이다. 정기구해를 구하기 위해서는 먼저 B축의 회전 중심점(P)에서 공구 길이(l)만큼 B축의 회전된 방향으로 이동한 후, C축 방향으로 회전하면 된다. 공구 길이가 축 운동계의 모든 위치값에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P' &= P - N = P - nl \\
 &= PT_{xz}(-l\sin\theta_b, l - l\cos\theta_b)R_z(\theta_c) \\
 &= (P_x, P_y, P_z, l) \\
 &\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -lS_b & 0 & l - lC_b & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_c & S_c & 0 & 0 \\ -S_c & C_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} C_c P_x - S_c P_y - S_b C_c l \\ S_c P_x + C_c P_y - S_b S_c l \\ P_z + l - C_b l \end{bmatrix} \quad (9)
 \end{aligned}$$

- 단, P: P의 정기구해,
- P: NC데이터에서 주어진 직선축의 위치값
- N: 공구의 법선방향 벡터,
- n: 법선단위벡터,
- l: 틸팅 중심에서 공구 CL점까지의 길이.

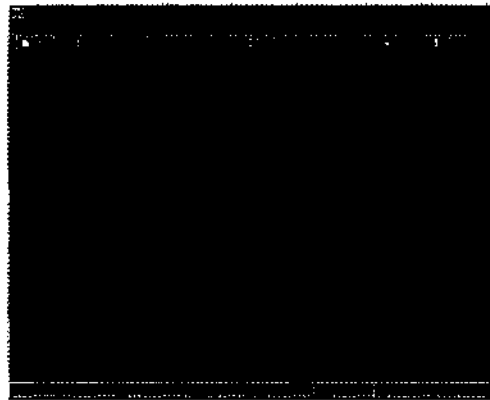


Fig. 4. Display of 5-axis CL data for the master model of an automobile tire.

3.2 불룩한 형상에 대한 적용

자동차 타이어를 위한 마스터 모델은 그 형상의 특성상 필연적으로 언더컷이 생기므로 5축 NC 기계에서 가공이 이루어진다^[26]. 마스터 모델의 가공은 합성수지에 자동차 타이어와 같은 형상을 가공하게 되므로, 모든 가공이 불룩한 면에서 이루어지게 된다.

Fig. 4는 자동차 타이어용 마스터 모델의 황삭CL 데이터를 표시한 것이며, 모든 CL이 불룩한 형상을 이루고 있음을 알 수 있다. 황삭 CL 데이터는 특별한 공구 간섭이 없으므로, 평 엔드밀을 이용하여 곡면의 법선 방향으로 공구의 방향 벡터를 설정한다. 따라서 절삭 가공에 고정된 이송속도를 적용하게 되면, 공구 끝부분 CL점에서 곡면의 법선 방향의 차이가 클수록 CL점의 이송속도는 더 떨어지게 된다. 상대적으로 직선축보다는 회전축의 이송이 더 많아지는 구간에서 축 운동계의 이송이 커지고 CL점의 이송거리는 줄어들게 된다.

Table 2. Result of testing in 5-axis machine with a tilting axis and a rotary table (Tool length=253 mm, F=1000 mm/min)

5-axis NC Data (mm or deg)	Distance (mm)	CL point (mm)	Distance (mm)	New Feedrate (mm/min)
X-14.417Y0.408Z150.341 B-1.260C146.440	-	X7.152Y-5.234 Z150.402	-	-
X-17.773Y0.439Z150.2570 B-1.564C153.546	7.865	X9.534Y-5.234 Z150.351	2.383	3301.2
X-21.325Y0.455Z150.149 B-1.884C158.294	5.939	X11.917Y-5.233 Z150.286	2.383	2491.9
X-24.989Y0.465Z150.017 B-2.213C161.646	4.979	X14.299Y-5.234 Z150.206	2.383	2088.8
X-28.723Y0.471Z149.8610 B-2.548C164.125	4.497	X16.680Y-5.233 Z150.111	2.383	1887.0

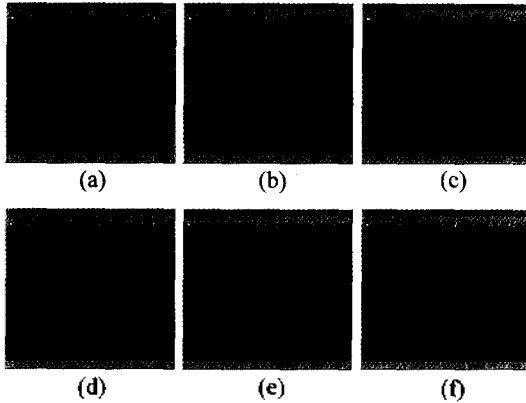


Fig. 5. Machining paths for the master model of an automobile tire: (a) rough cut 1 (b) rough cut 2 (c) finish cut (d) cross groove cut 1 (e) cross groove cut 2 (f) perpendicular groove cut.

Table 2는 Fig. 4에 표시된 부분의 5축 NC 데이터를 샘플링하여 테스트한 결과이다. 모든 NC 블록이 블록한 형상을 이루고 있으므로, 5축 NC 데이터에 의한 축 운동계의 이송거리보다 공구 CL점간의 이송거리가 더 짧음을 알 수 있다. 지령된 이송속도를 CL점간의 거리에 적용하게 되면 절삭 시간은 훨씬 줄어들게 된다. 새로 산출된 각 블록의 이송속도는 지령된 이송속도보다 더 커지게 되며, 가공시간을 단축하였다.

Fig. 5는 자동차 타이어의 마스터 모델의 가공 경로를 표시한 것이다. 타이어 마스터 모델을 만들기 위한 황삭가공과 정삭가공, 그루브 가공 등으로 나눌 수 있다. 황삭가공(Fig. 5(a), (b))과 정삭가공(Fig. 5(c))의 경우에도 공구의 방향 벡터가 변하기는 하지만, Fig. 5(e)는 타이어와의 직각 방향으로 가공이 이루어지기 때문에 급격한 변화를 보인다. 이것은 Table 3에 잘 나타나 있다. Table 3은 5축 기계에서 마스터 모델을 가공할 때, 제안된 방법을 적용한 경우와 일정한 절삭속도를 적용한 경우의 가공시간을 측정하여 비교한 것

이다. Fig. 5(e)의 가공시간의 비율이 다른 가공시간보다 더 현저함을 알 수 있다.

3.3 오목한 형상에 대한 적용

자동차 타이어 금형은 일반적으로 합성수지에 자동차 타이어와 같은 형상을 가공하여 최종적으로 금형을 만들지만, 최근 들어 자동차 타이어 금형을 직접 가공하는 방법이 사용되고 있다. 자동차 타이어 형상은 블록한 모양을 하고 있으므로 직접 가공할 경우 가공 영역은 반대로 오목한 형상으로 이루어진다.

따라서 자동차 타이어 금형을 직접 가공하는 경우에는 5축 NC 가공 데이터에 지령된 이송속도보다 공구 끝부분 CL점의 이송속도는 더 높은 이송속도를 갖게 되기 때문에 공구의 파손과 같은 예기치 못한 일이 발생할 수 있다. 지령되는 이송속도를 기계의 기구적인 구조와 공구 길이를 고려하여 경험치를 설정할 수 밖에 없기 때문이다. 하지만 공구 끝부분 CL점의 이송속도를 일정하게 한다면, 5축 NC 가공 데이터의 이송속도를 결정하기 한결 쉽다.

Fig. 6은 자동차 타이어 금형을 가공하기 위한 황삭

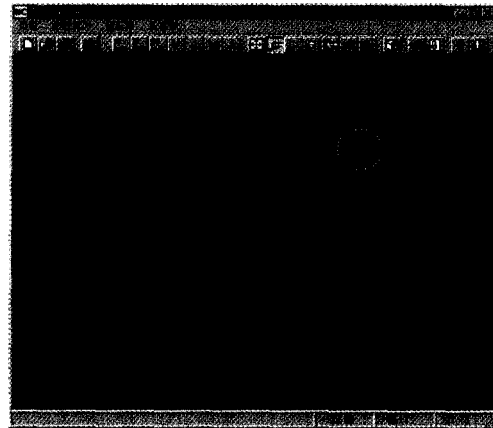


Fig. 6. Display of 5-axis CL data for an automobile tire mold.

Table 3. Result of 5-axis machining for the master model of an automobile tire on a 5-axis machine (Tool length=253 mm, F=1000 mm/min)

Machining type	Machining time by the constant Feedrate (min)	Machining time by the Proposed method (min)
Rough Cut 1	73.10	39.33
Rough Cut 2	48.04	21.48
Finish Cut	222.30	103.21
Cross Groove Cut 1	238.09	116.08
Cross Groove Cut 2	85.20	34.48
Perpendicular Groove Cut	15.10	13.20

Table 4. Result of 5-axis machining for the automobile tire mold with a tilting axis and a rotary table (Tool length=253 mm, F=1000 mm/min)

5-axis NC Data (mm or deg)	Distance (mm)	CL point (mm)	Distance (mm)	New Feedrate (mm/min)
X-54.806Y-42.636Z107.205 B-42.562C73.877	-	X73.261Y99.904 Z173.859	-	-
X-55.333Y-41.498Z107.019 B-42.447C74.319	1.348	X71.149Y99.906 Z173.330	2.177	618.9
X-55.848Y-40.351Z106.838 B-42.335C74.763	1.350	X69.035Y99.907 Z172.815	2.176	620.5
X-56.352Y-39.194Z106.662 B-42.226C75.210	1.355	X66.915Y99.907 Z172.316	2.178	622.0
X-56.842Y-38.028Z106.492 B-42.120C75.659	1.357	X64.793Y99.906 Z171.831	2.177	623.5

CL데이터이다. 표시된 부분의 5축 NC 데이터를 샘플링하여 테스트를 수행한다. Table 4는 그 결과를 도표화 한 것이다.

Table 4에서 주어진 5축 NC 데이터의 축 운동계의 이송거리와 공구 끝부분 CL점의 이송거리를 비교하면, 공구 CL점의 거리가 더 긴 것을 알 수 있다. 즉, 지령된 이송속도로 이송할 때 CL점의 경로를 이송하는데 보다 더 많은 시간이 소요된다. 자동차 타이어 금형처럼 오목한 부분을 가공하는 경우에는 CL점의 일정한 이송속도를 보장하기 위하여 각 블록에 산출되는 새로운 이송속도의 값이 지령된 이송속도(1000 mm/min)보다 더 작아짐을 알 수 있다. 제안된 방법에 의하여 해당 블록에 새로 산출된 이송속도를 보면 4개의 블록 모두에서 지령된 이송속도의 약 절반 정도의 이송속도를 갖는다.

Fig. 7은 자동차 타이어 금형의 가공 경로를 나타낸 것이다. 공구의 길이가 고려된 CL점들의 경로이기 때문에 경로의 영역이 좁아진 것이다. Table 5는 5축 기계에서 자동차 타이어 금형을 가공할 때, 일정한 이송속도를 갖는 경우와 제안된 방법을 적용하였을 때의

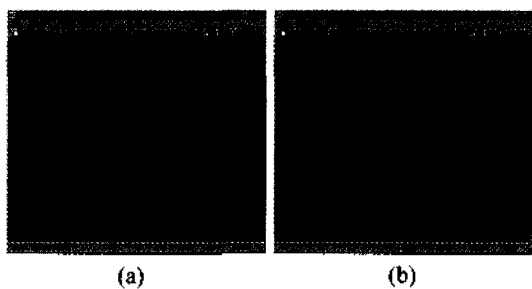


Fig. 7. Machining paths for an automobile tire mold: (a) rough cut (b) finish cut

Table 5. Result of direct 5-axis machining for an automobile tire mold on a 5-axis machine (Tool length=253 mm, F=1000 mm/min)

Machining Type	Machining Time by the Constant Feedrate (min)	Machining time by the Proposed Method (min)
Rough Cut	40.21	75.11
Finish Cut	115.54	199.10

경우를 비교하여 가공시간을 정리한 것이다. 자동차 타이어 금형은 오목한 형상으로 황삭가공(Fig. 7(a))과 정삭가공(Fig. 7(b))에서 모두 가공시간이 더 늘어난 것을 알 수 있다. 가공시간은 증가 하였지만 실제 절삭이 일어나는 공구 끝에서 일정한 이송속도가 보장된다.

4. 결 론

본 논문에서는 5축 NC 기계 가공에서 공구 끝부분의 CL점에서 이송속도가 일정하게 유지되도록 하였다. 5축 NC 데이터와 절삭가공을 수행할 5축 NC 기계의 기구학적 구조와 공구 길이를 바탕으로 하여 모든 블록마다 새로운 이송속도를 산출함으로써 이를 가능케 하였다.

새로운 이송속도의 산출은 5축 NC 데이터의 고정된 이송속도와 축 운동계의 위치값을 기계의 정기구해를 바탕으로 직교 좌표계 상의 공구 CL점의 위치를 구한다. 한 개의 NC 블록에 대하여 공구 끝(CL 점)의 이송거리를 구하고, 그 이송거리를 지령된 이송속도로 이송할 때 걸리는 시간을 구하여 각 축의 이송속도를 구한다. 그리고 각 축의 이송속도로 해당 블록의 새로운 이송속도를 설정한다. 결국 모든 5축 NC 블록에 적용하면 각 블록의 이송속도가 다르게 설정됨을 알 수 있

었다.

제안된 알고리즘을 자동차 타이어 금형과 마스터 모델 가공에 적용하였다. 5축 기계에서 자동차 타이어 금형의 절삭가공 시에는, 동일한 이송속도를 초기값으로 주었을 때 가공 시간은 증가하였지만, 공구 끝에서 일정한 절삭 이송속도를 유지할 수 있었다. 마스터 모델의 절삭가공 시에는 절삭가공 시간을 줄일 수 있었다.

제안된 방법으로 절삭가공 시에 공구에 걸리는 부하를 일정하게 함으로써 가공면의 조도를 향상시켰고, 절삭 공구와 기계에 걸리는 순간 부하를 줄일 수 있었다.

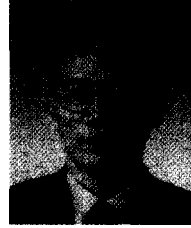
참고문헌

- Li, S. X. and Jerard, R. B., "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter," *Computer-Aided Design*, Vol. 26 No. 3, pp. 165-178, March, 1994.
- 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, *휴먼*, 1996.
- 이철수, CAD/CAM(형상 모델링에서 NC가공까지), 테크출판사, 1997.
- 이정재, 서석환, "3축 CNC를 이용한 5축 자유곡면 가공," *대한산업공학회지*, 제21권, 제2호, pp. 217-237, 1995.
- 이정재, 서석환, 김성구, 김형우, "부가 5축 머신을 이용한 롤드 곡면의 측면가공: 실험 및 분석," *한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집*, pp. 112-117, 1997.
- Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5-Axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC data," *Annals of the CIRP*, Vol. 41 No. 1, pp. 539-542, 1992.
- 조현덕, 전용태, 양민양, "5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(I)," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제8호, pp. 2001-2011, 1993.
- 조현덕, 전용태, 양민양, "5-축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구(II)," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제8호, pp. 2012-2022, 1993.
- 강재관, 서석환, "머신 키피규레이션에 따른 자유곡면의 5축 가공성과 셋업 자세," *대한산업공학회지*, 제21권, 제1호, pp. 67-84, 1995.
- 박정환, "금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구," *한국 과학기술원 박사학위 논문*, 1995.
- 조인행, 이진우, "포텐셜 에너지를 이용한 5축 NC 밀링의 공구방향 결정," *한국정밀공학회지*, 제13권, 제6호, pp. 161-167, 1996.
- Bohez, E. L. J., Senadhera, S. D. R., Pole, K., Duflou, J. R. and Tar, T., "A Geometric Modeling and Five-Axis Machining Algorithm for Centrifugal Impellers," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 16, No. 6, pp. 422-436, 1997.
- 정종윤, "프로펠러 블레이드의 형상설계 및 CNC 공구경로 생성," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제8호, pp. 46-59, 1998.
- 강재관, "공구간섭과 절삭성을 고려한 자유 곡면의 4,5축 NC 가공을 위한 공구 경로 산출," *한국정밀공학회지*, 제15권, 제2호, pp. 146-153, 1998.
- 공영식, 이희관, 양근의, 박세형, "5축 NC Heel cutting에 있어서 최적 공구자세 선정," *한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집*, pp. 318-323, 1998.
- 전차수, 차경덕, "복합곡면의 5축 NC가공을 위한 공구자세의 최적화," *한국 CAD/CAM학회 논문집*, 제5권, 제4호, pp. 393-402, 2000.
- 이철수, 박광달, "Heel angle 조정에 의한 터빈 블레이드의 5축 NC가공 데이터 생성," *한국 CAD/CAM학회 논문집*, 제4권, 제2호, pp. 110-120, 1999.
- Lo, C. C., "Efficient cutter-path planning for five-axis surface machining with a flat-end cutter," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 557-566, 1999.
- Balasubramaniam, M., Laxmiprasad, P., Sarma, S. and Shaikh, Z., "Generating 5-axis NC roughing paths directly from a tessellated representation," *Computer-Aided Design*, Vol. 32, pp. 261-277, 2000.
- 김찬봉, 양민양, "5축 CNC가공의 검증에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제18권, 제1호, pp. 93-100, 1994.
- 정정민, 김광수, "복셀 표현법을 이용한 5축 가공 시 물레이션," *대한 산업공학회 추계학술대회 발표논문집*, pp. 549-556, 1994.
- Huang, Y. and Oliver, J. H., "Integrated Simulation, Error Assessment and Tool Path Correction for Five-Axis Machining," *Journal of Manufacturing System*, Vol. 14, No. 5, 1995.
- Elber, G. and Cohen, E., "A unified approach to verification in 5-axis freeform milling environments," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, No. 13, pp. 795-804, 1999.
- C.-J. Chiou, Y.-S. Lee, "A shape-generating approach for multi-axis machining G-buffer models," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, No. 12, pp. 795-804, 1999.
- FANUC Ltd., "FANUC Series 15MA Operator's Manual," 1997.
- 이철수, "자동차 타이어 모델의 곡면 모델링 및 5축 NC 가공," *산업공학(IE-Interface)*, 제9권, 제2호, pp. 129-141, 1996.



이 철 수

1984년 한양대학교 산업공학과 학사
1986년 한국과학기술원 산업공학과 석사
1990년 한국과학기술원 산업공학과 박사
1990년-현재 전남대학교 산업공학과 부교수
관심분야: CAD/CAM과 CNC 컨트롤러



이 제 필

1994년 전남대학교 산업공학과 학사
1997년 전남대학교 산업공학과 석사
1997년-현재 전남대학교 산업공학과 박사
과정
관심분야: CNC 제어기, CAD/CAM