대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권 제 7 호, pp. 1227~1233, 2003

미소직선 공구경로의 NURBS 변환

김수진† · 최인휴* · 양민양**

(2003 년 3 월 6 일 접수, 2003 년 6 월 7 일 심사완료)

NURBS Post-Processing of Linear Tool Path

Su Jin Kim, In Hugh Choi and Min Yang Yang

Key Words : Tool Path (공구경로), NURBS Interpolation (곡선 보간), Spline Interpolation(스플라인 보간), Post-Processing (후처리), NC Machining (수치제어가공)

Abstract

NURBS (Non Uniform Rational B-Spline) is widely used in CAD system and NC data for high speed machining. Conventional CAM system changes NURBS surface to tessellated meshes or Z-map model, and produces linear tool path. The linear tool path is not good for precise machining and high speed machining. In this paper, an algorithm to change linear tool path to NURBS one was studied and the machining result of NURBS tool path was compared with that of linear tool path. The N-post including both a post-processing and a virtual machining software was developed. The N-Post transforms linear tool path to NURBS tool path and quickly shades a machined product on OpenGL view, while comparing a machined surface with a original CAD one. A virtulal machined model of original tool path and post-processed tool path was compared to original CAD model. The machining error and machining time of post-processed NURBS tool path were investigated.

기호설명

L_{line} : 직선구간 기준길이
R_m : 기준 곡률반경
e : 공구경로 허용 오차
v_i : 직선블록의 단위 벡터
θ_c : 직선블록 기준 각도
Q_i : 직선블록의 시점
l_i : 직선블록의 길이
$C(u)$: NURBS 곡선
c_u : $C(u)$를 끝점, Q_{i-1}를 시점으로 하는 벡터
k_j : 절점
$N_{i,p}$: 기저함수
P_i : 제어점

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : sujin@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3264 FAX : (042)869-3210
* 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

1. 서 론

NURBS (Non Uniform Rational B-Spline)는 CAD 시스템에서 곡선과 곡면을 표현하는 표준자료구조이며, CNC 제어기에서도 곡선 가공을 지원하고 있다 일반적인 CAM 시스템에서는 모델을 옵셋과 직선경로 생성에 적합한 삼각형 망이나 Z-map 으로 변환해 미소직선 경로를 생성하고 있다.[1,2] 직선 경로는 곡선이나 곡면의 직선 근사로 인해 오차가 발생하며, 속도 불연속 곡선이므로 가공 시 가속과 감속을 반복해 고속이송에 부적합하다.[3,4] NURBS 경로는 가공 정밀도와 고속 이송에서 직선 경로에 비해 우수해 많은 CAM 및 CNC 제어기에서 도입하고 있다.

Bedi[5]는 B-spline 곡선과 곡면을 직접 가공하도록 PC 기반의 NC 공작기계를 개발해 기존의 직선 가공경로에 비해 적은 데이터와 높은 정밀도로 다양한 곡면을 가공했다. Volker[6]는 NURBS 공구 경로 가공을 병렬 기구 공작기계에 적용해 가공속도

를 증가시키고 가공오차를 줄였다. Seong[7]은 PC 기반 NC 에 NURBS 곡면을 입력 받아 매개변수 방향 곡선을 생성하고 곡선보간 기능으로 가공해, 기존 직선 보간에 비해 가공시간이 단축되고, 윤곽오차가 감소하며, 조도가 향상되었다. Hong[9]은 PC-NC 밀링머신에 실시간 NURBS 보간기를 구현해 부드럽고 정밀한 이송이 가능하도록 했다.

NURBS 경로를 생성하는 방법에는 곡면에서 직접 생성하는 것과 직선 경로를 후처리 하는 것이 있다. 곡면에서 직접 생성하는 방법은 CL 표면위의 점 데이터를 NURBS 곡선으로 보간 하여 NURBS 경로를 생성하는 것으로 기존의 공구경로 생성 방법들을 이용하기 어려워 일부에서만 이용하고 있다. 직선 경로를 후처리하는 방법은 기존에 만들어진 직선 경로를 후처리 하여 NURBS 경로를 생성하는 것이기 때문에 기존 코드를 재활용하는 것이 가능하고, 옵셋 및 간섭체크는 이미 직선 경로생성시에 이루어졌으므로 변환 알고리즘이 간단해진다. 또한 CAD 분야에서 직선을 곡선으로 변환 하기 위한 연구들이 많이 이루어져왔기 때문에 다양한 방법이 적용할 수 있다.[9~11]

일부 CAM 시스템에서는 직선 경로를 허용 공차내의 Bezier 곡선으로 근사해 NURBS 코드를 생성하기도 하는데, 이 방법은 데이터 크기를 줄일 수 있지만 가공오차가 증가하는 문제점을 가지고 있다. 또한 Bezier 곡선은 2 차 미분 불연속으로 고속 이송에 부적합할 수 있다. 또한 평면, 변곡점, 코너 등 특징 형상에 대한 충분한 고려 없이 일괄적으로 곡선 경로로 변환할 경우 가공오차가 증가하고 표면에 가공 마크가 남을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 모든 직선 경로의 시점과 끝점을 지나는 3 차 NURBS 곡선으로 보간 해 데이터 크기는 줄이지 않는 대신 직선 경로가 가지는 오차를 복원해 최종 가공형상이 CAD 모델에 가까워 지도록 했다. 구간내의 모든 점에서 2 차 미분 연속인 곡선으로 보간 했으므로, 고속 이송에 적합하다. 직선 경로를 NURBS 경로로 변환하는 기능과 공구경로를 이용해 가공형상을 빠르게 보여주는 기능을 통합해 N-Post (NURBS postprocessor)를 개발했다. N-Post 의 가상 가공 및 검증 기능을 이용해 가공형상과 CAD 모델과의 기하학적 가공오차를 비교하였으며, 두 가지 가공경로를 같은 공작기계와 가공조건에서 가공하여 가공시간을 비교하였다.

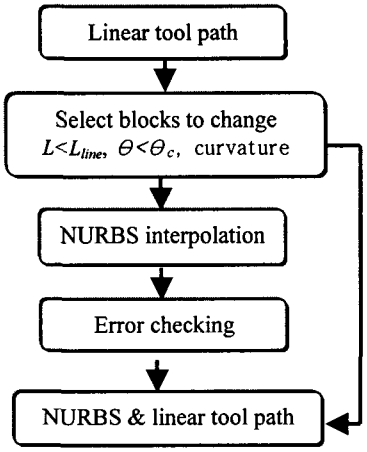


Fig. 1 Post-process of linear tool path to NURBS

2. NURBS 변환

N-Post 는 CAM 시스템에서 생성하는 직선 경로를 입력 받아 경로의 기하학적인 특징을 고려하여 변환에 적합한 구간을 찾고, 구간내의 직선 경로를 NURBS 경로로 바꾸어 출력한다. 변환 전후에 직선과 곡선 사이의 오차(cord error)를 계산해 허용 오차를 넘지 않도록 한다. 지원 가능한 제어기로는 BSPLINE 명령을 사용하는 SIEMENS 와 G06.2 를 사용하는 FANUC 을 선정하였다. Fig. 1 과 같이 직선 경로를 입력 받아 변환에 적합한 구간과 부적합한 구간을 선정한 후, 적합한 구간은 곡선 경로로 보간하고 부적합한 구간은 직선 경로를 그대로 출력한다. 또한, 보간 되는 구간은 직선과 곡선의 오차를 확인하고 허용오차보다 큰 경우에 다시 직선 경로로 출력하도록 하였다.

2.1 보간 구간 선택

곡선 공구 경로는 곡면 구간의 가공에 적합하지만, 평면이나 방향이 급격히 변하는 구간의 가공에는 부적합하다. 또한, 변곡점이 있을 경우에 곡선 경로가 오히려 가공오차를 증가시킬 수도 있다 그래서 직선 경로의 길이, 두 직선이 이루는 각도 그리고 변곡점과 같은 조건을 이용해 직선 경로를 그대로 사용할 구간과 곡선 경로로 변환할 구간을 선정한다.

먼저, 한 블록의 길이가 기준길이, L_{line} 이상인 직선 경로는 평면 가공에 이용되는 것으로 보고 변환하지 않는다. 기준 길이는 허용 오차, e 와 평면으로 가정하는 곡률반경, R_m 을 이용해 식 (1)로 계산한다.

$$L < L_{line} = \sqrt{8R_m e} \tag{1}$$

두번째, 두 직선 경로가 이루는 각도가 기준 각도 이상이면 변환 구간의 끝점으로 보고, 이전 까지를 곡선으로 변환한다. 꺽이는 각도 계산은 두 직선의 단위 방향 벡터, v 의 내적을 이용하여 식 (2)와 같이 계산한다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\vec{v_i} \cdot \vec{v_{i+1}}\right) < \theta_c \tag{2}$$

여기서, $\theta_c = \frac{L_{line}}{R_m}$

셋째, 인접한 세 점을 이용해 곡률의 방향을 계산하고, 변곡이 되면 변환 구간의 끝으로 설정한다. 변곡점은 식 (3)과 같이 직선 블록으로 두 곡률 방향 벡터와 수직인 벡터를 계산하고, 두 벡터의 내적이 음수이면 변곡점으로 보고, 이전 블록까지 곡선으로 변환한다.

$$I = (\vec{v_{i-1}} \times \vec{v_i}) \cdot (\vec{v_i} \times \vec{v_{i+1}}) > 0 \tag{3}$$

이렇게 세가지 조건을 만족하면 NURBS 곡선으로 변환하고, 이 조건을 만족하지 않으면 NURBS 곡선으로 변환하는 구간의 끝점에 해당한다. 이와 같이 적합한 구간이 선정되면 최종 오차검사를 수행하는데, 두 직선의 세 꼭지점이 이루는 원호와 직선 사이의 오차가 허용 오차보다 작은지를 계산하여, 허용오차 보다 작은 경우 곡선으로 변환하고 큰 경우 직선 경로를 그대로 출력한다. 식 (4)는 두 직선의 단위방향 벡터, v 와 직선의 거리, l 로 곡선 보간 오차를 계산하는 식이다.

$$e_i \cong \frac{l_i}{2l_{i+1}} \frac{\left|\vec{v_i} \times \vec{v_{i+1}}\right|}{\left|\vec{v_i}\right| + \left|\vec{v_{i+1}}\right|} \tag{4}$$

위와 같이 변환에 적합한 구간과 직선 경로에 적합한 구간을 선정해 NURBS 곡선 경로와 직선 경로를 함께 이용함으로써 곡선 보간만을 이용한 기존 방법보다 정밀도 개선에 효과적이다.

2.2 NURBS 보간

보간 구간을 정한 후 구간내의 직선의 꼭지점들을 지나는 곡선 경로로 변환 한다. Fig. 2 는 직선 경로의 꼭지점, Q_i 와 보간 구간 양 끝의 방향 벡터, D_i 로부터 생성되는 NURBS 공구경로, $C(u)$와 제어점, P_i 을 보여주며 보간 방법은 다음과 같다.[11]

곡선 가공 경로는 가중치를 1 로 하는 것이 일반적이므로 가중치를 일정하게 하면, 직선 가공경로 위의 점들, Q_i $(0 \le i \le n)$을 지나는 3 차 NURBS 경로 식은 식 (5)과 같다.

$$C(u) = \sum_{i=0}^{n+2} N_{i,p}(u) P_i \tag{5}$$

Q_i 를 지날 때 해당하는 매개변수, u_i 는 매개변수 간격을 직선블록의 거리에 비례하도록 식 (6)과 같이 코드 길이 방법으로 얻는다.

$$\begin{aligned} u_0 &= 0 \\ u_i &= u_{i-1} + |Q_i - Q_{i-1}| \end{aligned} \tag{6}$$

위 매개변수를 이용해 절점을 식 (7)과 같이 정한다.

$$\begin{aligned} k_j &= 0 \ , \ 0 \le j \le 3 \\ k_{n+3+j} &= u_n \ , \ 0 \le j \le 3 \\ k_{j+3} &= u_j \ , \ 0 \le j \le n-1 \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)과 같이 절점을 정의하면 곡선이, Q_i를 지날 때 3 개의 기저함수를 제외한 항이 0 이므로 식 (5)는 식 (8)와 같이 간단해진다.

$$\begin{aligned} Q_i &= C(u_i) \\ &= N_{i,3}(u_i) \cdot P_i + N_{i+1,3} \cdot (u_i) P_{i+1} + N_{i+2,3} \cdot (u_i) P_{i+2} \end{aligned} \tag{8}$$

이것을 행렬로 나타내면 식 (9)와 같이 3 중 대각행렬이 되며, 이 행렬을 LU 분해법으로 풀어 제어점을 계산한다.

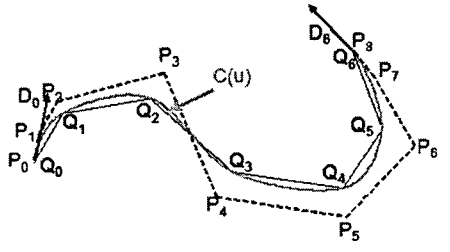


Fig. 2 NURBS interpolation

$$\begin{bmatrix} Q_1 - a_1 P_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{n-2} \\ Q_{n-1} - c_{n-1} P_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_2 & b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{n-2} & b_{n-2} & c_{n-2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{n-1} & c_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 방법으로 변환하는 경우, 데이터 크기는 감소하지 않지만, 구간내의 모든 점에서 2 차 미분 연속이므로 공작기계의 이송이 부드럽고 빨라질뿐 만아니라, 미소직선 공구경로의 모든 꼭지점을 지나므로 곡면 부의 가공 오차를 줄일 수 있다.

2.3보간후 오차 계산

보간 후 NURBS 곡선과 원래의 직선 경로간의 실제 오차가 허용 오차 이내인지 점검한다. 곡선이 매개변수 u_{i+2}, u_{i+3} 일 때 미소직선 블록의 꼭지점 Q_{i-1} 과 Q_i 을 지남으로, 이분법으로 최대 오차를 검색했다. 오차, e 는 곡선 위의 점 $C(u)$를 끝점 직선 경로의 시점 Q_{i-1} 을 시점으로 하는 벡터 c_u 와 직선의 단위 방향 벡터 v_i 를 이용해 식 (10)과 같이 계산한다.

$$e_i = |c_u - (c_u \cdot v_i) v_i| \quad (10)$$

이상으로 N-Post 의 보간 구간 선택 방법, NURBS 변환 알고리즘, 오차 계산 방법을 설명하였다.

3. 가상가공 시스템

NURBS 보간 가공결과를 시뮬레이션을 통해 확인하기 위해 가상 가공 시스템을 개발했다. N-Post 의 가상 가공 시스템은 직선 경로를 입력 받아서, NURBS 경로로 변환 하며, 가공 시뮬레이션을 통해 가공 형상을 예측하고, CAD 모델과 비교를 통해 가공오차를 계산한다.

Fig. 3 은 N-Post 가상가공 시스템을 나타내는데, 직선 경로를 NURBS 경로로 바꾸고 각각의 가공결과를 가상가공 모델로 만들어 CAD 모델과 비교할 수 있으며, 곡선 경로로 변환된 데이터는 NC 가공에 이용할 수 있다.

N-Post 의 빠른 가공 모델 생성 기능은 직선 및 곡선 가공경로에서 빠르게 가공 후 형상을 예측한다. 사용자가 공구 경로로부터 가공 결과를 예측할 때 쉽게 이용할 수 있다. 가공 시뮬레이션 및 검증 기능은 격자간격 1㎛ 의 정밀한 모델로 가공 시뮬레이션을 통해 최종 형상을 만들고 CAD 모델과 비교해 오차를 예측하는 것이다.

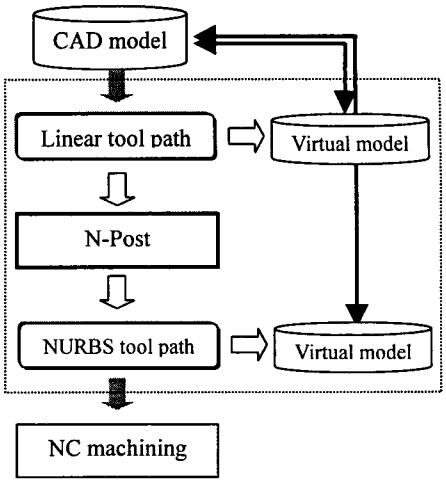


Fig. 3 Virtual machining system

소재는 3-축 가공 시뮬레이션에 적합하고 연산시간이 빠른 Z-map 을 이용했으며, 가공 결과와 가공오차는 OpenGL 을 이용해 음영 처리해 보여준다.

4. NURBS 가공오차

4.1 오차 평가 방법

미소직선 공구경로의 점들은 CL (cutter location) 곡면 위의 점들이다. 따라서 이 점들을 지나는 곡선 경로는 직선 경로보다 CL 곡면에 가깝다. N-Post 는 이 곡선을 경로로 이용하므로 직선 경로를 이용한 가공보다 가공 오차가 작아질 것이다. 다음에서 두 가지 공구경로의 가공결과를 원래 모델과 비교해 가공오차를 관찰했다. 비교 방법으로 실 가공물을 3D 측정 장비로 측정해 CAD 모델과 비교 하는 방법이 있다. 실 가공물을 측정할 경우 공구경로의 차이로 인한 가공 오차 이외에 열 변형, 제어 오차, 기계 구조적 오차, 공구형상 오차, 절삭력에 의한 공구 변형, 측정 오차 등이 추가된다. 따라서 가상가공 시스템을 이용해 NURBS 가상 가공 결과와 CAD 모델간의 오차를 계산했다. 가상 가공을 이용할 경우 다른 오차들을 배제한 이상적인 경우 미소직선과 NURBS 가공 경로의 기하학적 가공 오차를 비교해볼 수 있다.

4.2 오차 비교 대상

곡면, 평면, 모서리를 가진 CAD 모델에서 미소직선 가공경로를 만들었다. 곡면 구간의 곡률반경은 20mm, 공구는 직경 5mm 볼엔드 밀, 경로 간격은 0.5mm 허용오차는 10μm 이다.

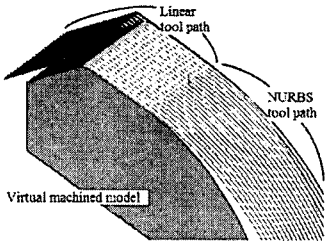
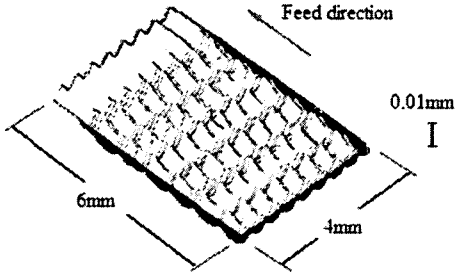
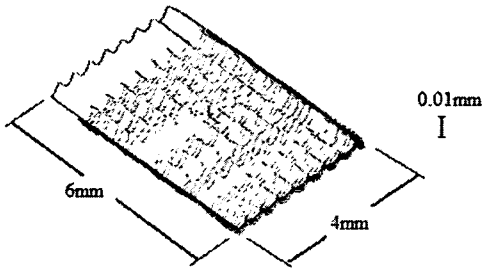


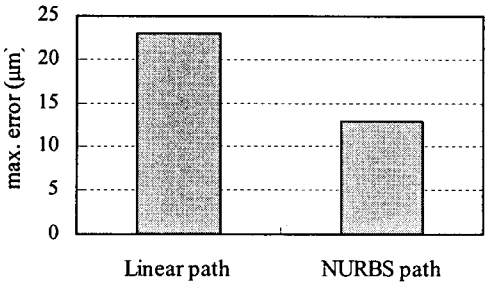
Fig. 4 Virtual machined model and NURBS tool path



(a) Error map of linear tool path (scaled 100 times)



(b) Error map of NURBS tool path (scaled 100 times)



(c) The machining error comparison

Fig. 5 The machining error

N-Post 에서 NURBS 경로로 바꾸었으며, 평면 구간은 직선 블록이 보존되고, 곡면 구간의 미소 직선 경로만 NURBS 블록으로 바뀌었다.

가상 가공시스템을 통해 직선 경로와 NURBS 경로의 가공 후 모델을 만들었다. 가상가공에 이용된 Z-map 의 격자간격은 1μm 으로 40,000*5,000 개의 격자로 시뮬레이션 하는데 P-II 프로세서 32MByte 메모리의 PC 에서 약 15 분 소요되었다. Fig. 4 는 변환 결과와 경로로부터 만들어진 가상 가공 결과를 보여주는 것이다. 왼쪽의 긴 직선 가공 구간은 직선 공구경로이고, 오른쪽의 곡면 가공구간은 직선 경로가 NURBS 경로로 변환된 구간이다.

4.3 오차 비교 결과

각각의 가상 가공 결과와 CAD 모델을 비교했다. Fig. 5(a)는 미소직선 경로로 가상 가공한 결과와 CAD 모델간의 오차를 100 배 확대해 음영 처리한 것으로 이송방향과 경로간격 방향으로 가공오차가 발생하고 있음을 볼 수 있다. 이송방향 오차는 직선 경로로 가공했기 때문에 발생한 것이고 경로간격 방향 오차는 공구형상과 경로간격에 의해 발생하는 것이다. Fig. 5(b)는 NURBS 곡선 경로의 가상가공 결과와 CAD 모델을 비교한 것으로 이송방향 오차는 줄어들고 경로간격 방향의 오차는 일정함을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 가상 가공결과와 CAD 모델의 오차 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)를 비교한 것으로, 미소직선 경로로 가공할 경우 가공오차 23μm 에서 NURBS 변환 가공의 경우 가공오차 13μm 로 곡면 구간에서 기하학적 가공 오차가 약 43% 개선됨을 볼 수 있다. 위 결과는 경로간격 0.5mm 경로생성 허용오차 10μm 인 경우로 경로간격이 작아지고 가공경로 생성 허용오차가 커질수록 가공오차 개선효과가 커질 것으로 예측된다.

5. NURBS 가공 시간

일반적인 CAD 모델에 대해 미소직선 경로를 생성하고 N-post 를 이용해 NURBS 경로로 변환했다. 변환 결과를 관찰하고 데이터 전송 시간에 영향을 주는 블록 수의 변화를 보았다. 또한 같은 공작기계에서 같은 가공조건으로 가공함으로써 가공시간을 비교해 보았다.

5.1 공구경로

비교적 곡면이 많은 얼굴과 주먹형상에 대해 각각 미소직선 공구경로를 만들었다. 얼굴형상 공구경로는 기준의 공구경로를 이용했으며, 주먹형상은 사용 CAD/CAM 시스템을 이용해 디자인하고 경로간격 0.2mm 허용오차 5μm 인 공구경로와, 경로간격 0.35mm 허용오차 30μm 인 공구경로를 만들었다. 앞에서 만든 세 가지 일반적인 미소직선

경로를 N-post 에서 NURBS 공구 경로로 변환하였다. 변환 시간은 블록 수에 따라 다르지만 P-II 프로세서 32MByte 메모리에서 약 40 초 소요되었다.

5.2 NURBS 변환

위 미소직선 경로를 N-Post 를 이용해 변환해 결과를 관찰하고, 가공 블록수의 변화를 비교해보았다.

Fig. 6(a)의 얼굴형상은 미소직선경로의 허용오차를 알 수 없는 경우로 기본 허용오차인 5μm 로 후처리 하였다. 변환 결과 가공 방향이 급격히 변하는 얼굴과 배경 사이의 코너를 제외한 모든 구간이 변환 되었다. 블록 수는 직선 경로 115,226 블록 NURBS 경로 122,283 블록으로 변화가 없다.

Fig. 6(b)의 주먹형상의 경우 역시 가공경로가 급격히 변하는 손가락과 손가락 사이, 주먹과 배경 경계를 제외한 전구간이 변환되었다. 블록 크기는 허용오차 5μm 인 공구 경로의 경우 직선 56,980 블록 NURBS 58,237 블록이고, 허용오차 30μm 인 공구경로는 직선 13,225 블록 NURBS 13,983 블록으로 변화가 없다.

일반적인 CAD 모델에서 생성된 공구경로를 변환해본 결과 각진 경로와 곡면영역 경로를 정확히 구분해 곡면 영역 경로만을 NURBS 경로로 변환함을 확인했고, 블록 수는 약간 증가 하지만 원래 데이터 와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

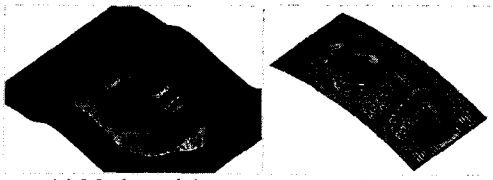
5.3 공작기계와 가공조건

미소직선 공구경로와 NURBS 공구경로를 같은 공작기계에서 가공해 실 가공시간을 비교해보았다. 가공에 이용된 공작기계는 SPT-v18 (H 사)로 SIEMENSE 840D 제어기를 사용하고 있다. 840D 제어기는 BSPLINE 이라는 명령으로 NURBS 가공경로를 지원하며 미소직선블록의 경우 빠르게 처리하기 위해 선행제어기능을 가지고 있다.

Fig. 6 의 얼굴과 주먹형상을 가공 했으며 가공에 이용된 소재는 알루미늄, 공구는 직경 6mm 코팅 초경 볼엔드밀을 이용했다. 가공조건은 회전수 8000rpm, 이송율 4000mm/min 로 공작기계에서 지원하는 최대 최전수와 이송율로 가공실험 하였다.

5.4 가공시간 비교 결과

위 공작기계와 가공조건으로 가공실험을 하면서 가공 시간을 측정해 보았다. 미소직선 공구경로를 이용한 가공시간보다 NURBS 변환 공구경로를 이용한 가공시간이 짧았는데 그 시간을 비교하면 다음과 같다.

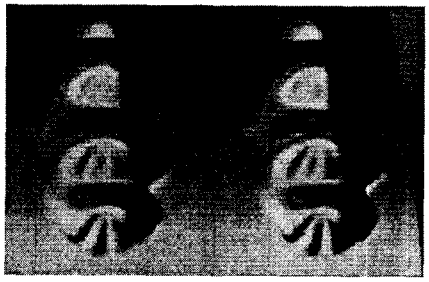


(a) Mask model (b) Fist model

Fig. 6 Post processing NURBS tool path

(a) By linear tool path (b) By NURBS tool path

Fig. 7 Machined result of mask model



(a) By linear tool path (b) By NURBS tool path

Fig. 8 Machined result of fist model

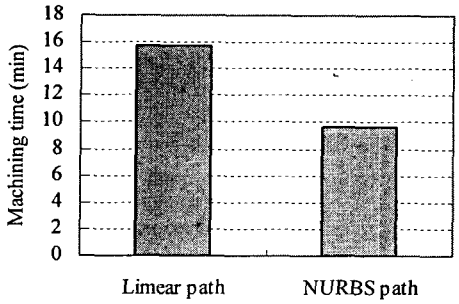


Fig. 9 The machining time

Table 1 Compare linear tool path with post-processed NURBS tool path

Tool path	Error μm	Block number x1000		Machining time, min:sec	
Linear	23	13	115	15:43	62:35
NURBS	13	14	122	9:38	58:30

얼굴형상 Fig. 7 의 경우 직선 공구경로 가공시간 62 분 35 초, NRUBS 공구경로 가공시간 58 분 30 초로 가공시간이 6.5% 단축 되었다.

주먹형상 Fig. 8 의 경우 경로생성과 변환 오차를 5μm 로 했을 경우 가공시간이 27 분 47 초에서 26 분 31 초로 4.6% 단축 되었으며, 허용 오차 30μm 로 했을 경우 15 분 43 초에서 9 분 38 초로 38.7% 단축되었다.

실 가공결과 미소 직선 경로를 NURBS 경로로 변환해 가공할 때 Fig. 9 에 비교한 바와 같이 가공시간이 최대 38%까지 단축되었다. 가공 시간의 감소는 공구경로 생성 허용 오차가 클수록 많은 것으로 나타났는데, 이 같은 결과는 허용오차가 클수록 제어기의 NURBS 블록처리 시간이 빨라지기 때문인 것으로 보인다

6. 결 론

미소직선 공구경로를 NURBS 공구경로로 변환하는 N-Post 와 공구경로에서 가공형상을 만들어내는 가상 가공 시스템을 개발하고 그 효과를 평가했다. N-Post 는 직선 가공경로를 입력 받아 NURBS 변환 구간을 선정하고, 구간내의 모든 점을 지나고 2 차 미분연속인 3 차 NURBS 경로로 보간 한다. 정밀한 모의 가공 및 검증을 지원하는 가상 가공시스템을 개발해 직선 및 변환 경로를 이용한 가공 형상을 만들고 CAD 모델과 비교해 가공 오차 맵을 만들었다.

시스템의 효과를 정밀도, 블록크기, 가공시간 이렇게 세가지 측면에서 평가했고 그 결과는 다음과 같다.

(1) 가상 가공시스템을 이용해 가공오차를 비교했다. N-Post 를 이용한 NURBS 변환 가공으로 직선 가공을 이용할 때 보다 가공오차를 약 46% 줄일 수 있음을 확인했다.

(2) 둘째, 가공 정밀도 향상을 위해서 데이터 블록 수는 줄이지 않았다. 이것은 허용오차를 주고 블록 수를 줄이는 기존방법과 달리 직선블록을 정확히 지나는 곡선으로 보간 했기 때문이다.

(3) 같은 공작기계와 가공조건을 이용한 실제 가공에서 가공시간이 미소직선 데이터를 이용한 경우 보다 최대 38% 단축되었다.

이 연구결과를 기존의 직선 데이터를 NURBS 지원 제어기에서 가공할 경우와 직선 공구경로를 생성하는 CAM 시스템에 NURBS 경로 생성 기능을 추가하고자 할 경우에 적용해 가공정밀도 향상과 가공시간 단축 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) Choi, B. K. and Jerard, R. B., 1998, "Sculptured Surface Machining," *Kluwer Academic Publishers*.

(2) Choi, B. K., Hwang, J. S., Lee, C. S. and Jun, C. S., 1998, "Compound Surface Modeling and Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 3, pp. 127~136.

(3) Shpitalni, M., Koren, Y. and Lo, C. C., 1994, "Realtime Curve Interpolators," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 832~836.

(4) Yang, D. C. H. and Kong, Tom, 1994, "Parametric Interpolator Versus Linear Interpolator for Precision CNC Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No 3, pp. 225~234.

(5) Bedi, S., Ali, I. and Quan, N., 1993, "Advanced Interpolation Techniques for N.C. Machines" *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, pp. 329~336.

(6) Volker, and Kreidler, 1998, "5-axis High Speed NURBS Machining on a New Parallel Kinematic-Machine," *Machining Impossible Shapes, IFIP*, pp. 315~324.

(7) Seong, W., Choi C. H. and Song, O. S., 1999, "A Tool path Generation for CNC Machining of Free-form Surfaces," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 129~137.

(8) Hong, W. P., Lee, S. W., Choi, H. Z. and Yang, M. Y., 2003, "Simultaneous 3D Machining with Real-Time NURBS Interpolation," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 3, pp. 336~342.

(9) Kim, T. W. and Lee, K. W., 2001, "Weight Control and Knot Placement for Rational B-spline Curve Interpolation," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 192~198.

(10) Choi, B. K., 1991, "Surface Modeling for CAD/CAM," *Elsevier*.

(11) Les, P., and Wayne, T., 1995, "The NURBS Book," *Springer*.

(12) FANUC Series 15-MB/ 16-MC/ 16i-MA Controller User Manual.

(13) SIEMENSE 840D Controller User Manual.