

# NURBS 보간을 이용한 고속 가공

이동윤\*, 김현철+, 양민양\*\*, 최인휴\*\*\*

## High speed machining using a NURBS interpolator

D.Y.Lee\*, H.C.Kim+, M.Y.Yang\*\*, I.H.Choi\*\*\*

### Abstract

Finish machining of a curved surface is often carried out by an NC system with curved interpolation in a high speed machining strategies. This study aims to develop the NURBS interpolator for the PC-NC based machine tools. In the case of a finish cut using a ball-end mill in high speed machining, low machinability at the bottom of a tool produces a harmful effect on surface roughness. The developed interpolator considers the relation between inclined angle, surface roughness, and feed rate, and adjusts real-time feed rate in order to generate surfaces which have isotropic surface roughness. The proposed interpolator is fully implemented and an experimental results are shown.

**Key Words :** NURBS Interpolator (NURBS 보간기), High Speed Machining (고속 가공), Real Time Feedrate Scheduling (실시간 이송속도 조정), Isotropic surface roughness (등방 표면 조도)

## 1. 서론

NURBS 공구 경로는 황삭이나 중삭 보다는 3차원 형상의 고속 가공을 적용한 정삭에 주로 응용되고 있다. 종래의 CNC에서는 곡선 경로를 직선이나 원호 같은 간단한 엔티티로 분리하여 처리하였으나, 최근 들어 해석 곡선의 정의로부터 직접 공작 기계를 구동하는 직접 보간 (direct-interpolation)이 도입되었다. 기존의 직선 보간이나 원호

보간과 비교해 보면, 이러한 NURBS 보간을 이용할 경우에 공구 경로의 크기가 줄어들기 때문에 CNC로 전달되는 데이터 량을 줄여서 통신부하를 경감시킬 뿐만 아니라, 이송 속도의 변동을 최소화하는 등의 장점이 있다. 이러한 시장의 요구를 바탕으로 등장한 NURBS 보간 기능은 윤곽오차 (contour error)와 이송속도 오차 (feed rate error)를 줄이면서 가공 시간을 단축하는데 연구가 진행되었다.

또한, 가공 공정상의 특성을 보간 과정에서 고려하려는 연구가 진행되었는데, Lo<sup>(2)</sup>는 CC (cutter contact) 점에서의 일정 이송속도를 구현하기 위한 공구 경로 생성 방법을 제안하였고, Farouki<sup>(3)</sup>는 특별한 매개 변수 곡선인 PH (Pythagorean-hodograph) 곡선에 대한 MRR (material

\* 발표자, KAIST 기계공학과 대학원(daniel.lee@kaist.ac.kr)  
주소: 305-701 대전시 유성구 구성동 373-1  
+ KAIST 기계공학과 대학원  
++ KAIST 기계공학과  
+++ 터보테크(주)

removal rate)을 일정하게 유지하는 변동 이송속도 CNC 보간법을 제안하여 경로의 곡률 효과를 고려하고, 이를 보상하는 지능적인 보간 알고리즘을 제안하였다. 가공 후 표면 거칠기는 후처리 사상작업에 직접적으로 영향을 미치는 인자이므로 정삭 가공으로 원하는 표면 거칠기 수준까지 도달하는 것은 가공 능률을 향상시키는데 매우 중요하다.

일반 가공 조건에서 볼 엔드밀에 의한 가공면의 거칠기는 경로간격 (path interval)에 의한 커스 (cusp) 높이가 우세하게 영향을 미치고, 커터마크 (cutter mark)의 영향은 미미하다. 그러나 고속가공의 경우, 미소한 가공량으로 급속히 빠른 이송을 하므로 경로간격을 작게 유지하고, 이송을 고속화한다. 이 경우에 표면의 거칠기는 이송방향의 커터마크에 의해 만들어진 높이를 무시할 수 없게 된다. 경로 간격은 공구 경로 생성시 작업자가 설정하는 입력 항목이기 때문에 커스 높이는 결정이 되고, 고속 이송시 이송 속도를 적당히 조절하여 커터 마크의 영향을 상쇄할 수 있는テクニック이 필요하다. 일반적인 직선 보간의 경우 실제 가공시 콘트롤러에서 이송 속도 최적화 단계를 거치고 있는 반면, NURBS 보간에서는 긴 구간을 곡선 하나로 정의하여 최대 이송속도로 가공하기 때문에, 실시간 이송속도 스케줄링 기능이 포함되어야 한다.

본 연구는 고속가공 조건에서 볼엔드밀을 이용한 정삭 공정에 대하여 가공후의 가공면의 거칠기가 이송 방향과 상관 없이 등방성을 가질 수 있도록 이송 속도를 제어할 수 있는 특수한 NURBS 보간 알고리즘을 개발하는데 초점을 맞추었다. NURBS 공구 경로부터 해석적으로 얻을 수 있는 기하학적인 정보를 이용하여 전 가공표면에서 일정 표면 거칠기를 얻을 수 있는 이송 명령을 생성하는 NURBS 보간 알고리즘을 개발하고, 상용 CAM 소프트웨어에서 생성된 공구 경로를 이용한 가공 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 확인한다.

## 2. 이론적인 배경

### 2.1 기존의 표면 거칠기

Fig. 1은 볼 엔드 밀 가공에 의한 표면 형상을 보여준 것이며, (a)는 전통적인 가공 조건에서의 가공면을 나타내고, (b)는 고속 가공 조건에서의 가공면이다. 공구의 강성과 내마모성이 증대되고 기계의 강성의 우수해짐에 따라 가공 조건을 경로 간격은 줄이고, 이송은 고속화하는 방향으로 선정하게 되었다. 그리하여, (b) 가공면처럼 커터 마크가 가공

면에 흔적을 남기게 되는데, 그 높이가 표면 거칠기에 크게 영향을 미치게 된다. 이 가공영역에서의 가공면에 나타나는 표면 형상 (topology)은 커스 뿐만 아니라, 이송방향으로의 커터 마크가 커스 높이 수준으로 높게 나타나게 된다. 따라서, 자유곡면을 볼 엔드 밀로 가공한 면의 이론적인 표면 거칠기는 식 (1)과 같이 커스 높이와 커터 마크 높이의 합으로 나타낼 수 있다.

$$R_{\max} = \frac{f_t}{8r} \left(1 - \frac{r}{\rho_t + r}\right) + \frac{f_p}{8r} \left(1 - \frac{r}{\rho_p + r}\right) \quad (1)$$

여기서,  $f_t$ 는 날당 이송량,  $f_p$ 는 피크피드량, 그리고  $r$ 은 공구 반경을 나타낸다.



(a) Conventional condition (b) High-feed condition

Fig. 1 Surface texture after milling

정삭 후 사상 작업을 고려한다면 이 커터 마크가 커스 보다 높지 않게 조정할 필요가 있으며, 일반적으로 상한값은 커스 높이와 같게 되는 날당 이송으로 정해진다.

### 2.2 고이송 가공에서의 표면거칠기

볼 엔드 밀에 의한 가공 표면은 커스면과 커터 마크면의 중첩으로 나타낼 수 있다. 커스 면은 경로간격에 의하여 결정되는 면이고, 커터 마크 면은 날당 이송에 의하여 생성되는 면이다.

인선이 둥근 볼 엔드밀 특성상 형상가공에 주로 쓰이지만, 공구 중심축 부근 인선의 절삭속도가 이송속도보다 작은 영역이 존재하고, 이 영역에서 가공된 면에는 절삭 잔량 (cutting remains)이라는 돌출된 재료가 남아있게 된다. 이것은 기존의 표면 거칠기 모델식인 식(1)로는 설명할 수 없는 부분이다. 따라서, 공구정점으로 가공된 면의 표면 거칠기까지 표현할 수 있는 확장 표면 거칠기 모델을 구하고자 한다. 두 영역에서의 좀더 정확한 표면 거칠기 모델을 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 이용하여 아래에 같이 유도하고, 두 영역의 경계를 정의한다.

Fig. 2는 공구 정점 부근이 가공에 참여하지 않는 (II) 영역의  $R_{\max}$ 를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 나타냈으며, 이로부터  $R_{\max}$ 는 기존의 표면 거칠기 수식에서 절삭 날이 재료 안으로 진입하는 점과 바깥으로 진출하는 점 사이의 위상이 위상 차를 추가고려하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

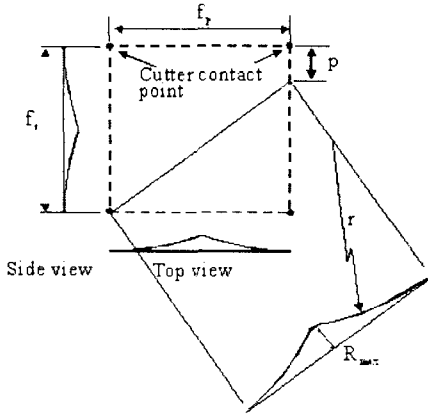


Fig. 2 Feature drawing of machined surface in the non-effect zone of dead center

$$R_{max}(f_i, |\alpha| > \alpha_c) = \frac{f_r^2}{8r} \left[ 1 + \left( \frac{f_i - p}{f_r} \right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서,  $p = f_r f_p / (\pi r \sin \alpha)$ 이며, 0에서  $f_r/2$ 사이의 범위를 가진다. 최대 거칠기는 공구 경로 사이의 가운데 지점에 위치한다.

Fig. 3은 공구 정점이 가공면 생성에 참여하지 않는(I) 영역의  $R_{max}$ 를 구하기 위하여 가공면의 특징 형상을 도시한 것으로 커슘은 동일하지만, 커터 마크에는 절삭잔량에 의한 돌출이 생긴다. 따라서 최대 표면 거칠기 또한 이 돌출부에 의하여 결정된다. 이 돌출부의 위치가 공구 경로의 오른쪽에  $r \sin \alpha$ 만큼 떨어져서 위치하고, 공구는 구면을 가진다고 계산하면 표면 거칠기 식은 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

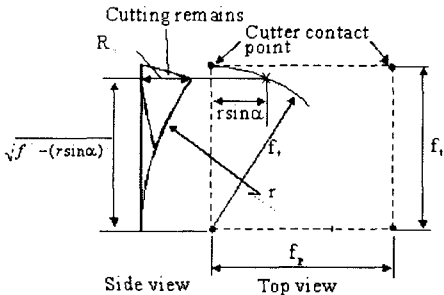
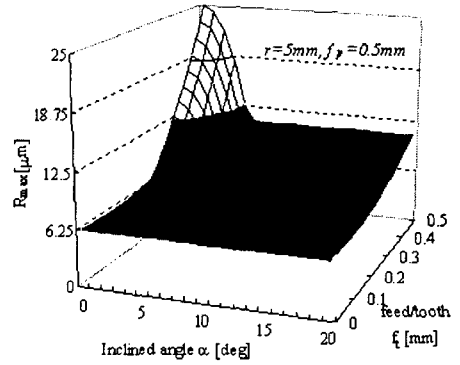
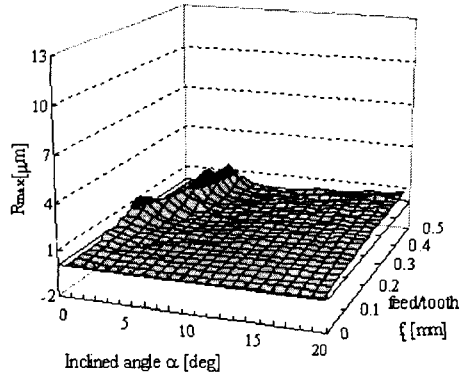


Fig. 3 Feature drawing of machined surface in the effect zone of dead center

$$R_{max}(f_i, |\alpha| \leq \alpha_c) = r \cdot \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{f_i}{r} \right)^2 + \sin^2 \alpha} \right] \quad (3)$$



(a) Extended surface roughness model



(b) Error map (max. error = 1.8  $\mu\text{m}$ )

Fig. 4 Extended surface roughness of the surface machined by ball-end mill

식 (3)은 공구 반경이 주어졌을 때 날당 이송과 이송 경사각의 함수로  $R_{max}$ 를 표시하고 있으며, 경사각이 영일 때 최대가 된다. 그리고 임계경사각 이내일 때만 적용되고 경계 조건으로부터 계산될 수 있다. 두 영역의 경계가 되는 임계 이송경사각은 위 두식의 경계조건으로부터 식(4)와 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_c = \sin^{-1} \left( \frac{1}{r} \sqrt{\left( \frac{A}{8r} \right)^2 - \frac{A}{4} + f_i^2} \right) \quad (4)$$

여기서,  $A = f_p^2 + (f_i - p)^2$ 이고,  $p = f_p / 2\pi$ 이다. 따라서 볼 엔드밀 가공면의  $R_{max}$ 는 식 (2)와 식 (3)으로 표시되는 확장된 표면 거칠기 식으로 전 가공면을 나타낼 수 있다. Fig. 4에서 제안된 확장된 표면 거칠기 모델을 도식화하였고, 표면 거칠기 시뮬레이션 결과와의 오차를 도식하였다. 최대오차는 1.8  $\mu\text{m}$ 이고, 매 날당 이송에서 임계 이송 경사

각 부근에서 나타난다.

### 3. NURBS 보간에서 등방표면조도를 위한 이송속도 스케줄링

#### 3.1 이송속도 스케줄링

##### (1) 곡률 반경에 의한 속도 제한

일반적인 원호 보간에서의 속도 제한처럼 곡률 반경을 고려하여 이송 속도를 제어할 수 있다. 그러나 원호 보간에서는 하나의 원호 내에서 제한되는 속도가 동일한 반면, NURBS 보간에서는 매 보간점마다 곡률반경이 변하게 된다. 이 때문에 곡률 반경의 증감이 심한 부분에서는 이 속도 제한에 의한 스케줄링이 왜곡될 수 있다. 이것을 해결하기 위해서 NURBS 보간에서 미리 보기 (look-ahead) 기능을 통해서 곡률반경의 증감을 미리 알 필요가 있다.

##### (2) 표면조도에 의한 이송 속도 제한

곡면의 거칠기를 제어할 수 있는 특별한 실시간 곡선 보간 알고리즘을 구현하기 위하여 공구 경로 정보로부터 이송 명령을 생성할 수 있는 간단한 지배방정식이 요구된다. 즉, CAM 시스템으로부터 공구 반경과 피피드 같은 기본적인 공정 변수가 지정되고, 추가로 목표 거칠기가 설정된다면 보간기에서 이송방향의 경사각을 입력받아 이송명령을 출력하게 되는 것이다. 2장에서 제안된 이송 경사각에 따른 2가지 형태의 표면 거칠기 모델을 적용하면 밀링 가공면의 거칠기를 제어할 수 있는 이송량은 식 (5)와 (6)에 의하여 결정될 수 있다.

$$f_i = \frac{f_p}{2\pi} + \sqrt{8r \cdot R_{\max} - f_p^2}, |\alpha| > \alpha_c \quad (5)$$

$$f_i = \sqrt{(r \sin \alpha)^2 + 2r \cdot R_{\max} - R_{\max}^2}, |\alpha| \leq \alpha_c \quad (6)$$

공구경로의 이송경사각이 현재의 날당 이송에서 임계경사각보다 클 때, 경험적으로 모델의 오차가 최소화 되도록 경사각이  $2\alpha_c$  일 때의 위상 차로 계산하였다. 또한, 목표 거칠기는 이송방향과 이송의 직각방향에서의 거칠기가 같아지는 두 방향 등방면 (isotropic surface)의 최종 표면 거칠기로 추천하였다. 이러한 조건이 가공시간과 사상에 소요되는 시간을 줄이는데 유리하기 때문이다.

#### 3.2 NURBS 보간에서의 구현

3차원 매개변수 곡선은 일반적으로  $P(u) = [x(u) \ y(u) \ z(u)]$ 로 나타낼 수 있으며, 현재의 곡선상의 위치에서 다음 위치를 찾기 위하여 원하는 증분 거리 ( $\Delta s_d$ )를  $FT/60(\mu m)$

으로 계산한다. 여기서  $F$ 는 파트 프로그램에서 지정된 것이거나 최적화된 이송속도(mm/min) 이고,  $T$ 는 보간 주기(msec)이다. 거리 증분량에 해당하는 곡선 파라미터의 증분량 ( $\Delta u$ )을 구하기 위하여 고차항을 제거한 Taylor 시리즈로 근사한 식(7)을 사용하여 보간주기 마다 회귀적으로 구할 수 있다.

$$u_{i+1} = u_i + \frac{\Delta s_d}{|\dot{P}(u)|} - \frac{\Delta s_d^2 (|\ddot{P}(u)| \cdot |\dot{P}(u)|)}{2|\dot{P}(u)|^3} \quad (7)$$

여기서,  $\dot{P}(u) = dP(u)/du$  이고,  $\ddot{P}(u) = d^2P(u)/du^2$  이다. 목표 표면 거칠기를 얻기 위한 거리 증분량은 두 날을 가진 볼 엔드 밀의 경우에  $2Sf_f T/60(\mu m)$ 으로 구할 수 있다. 여기서  $f_f$ 는 식 (5) 또는 (6)으로부터 구해진다.

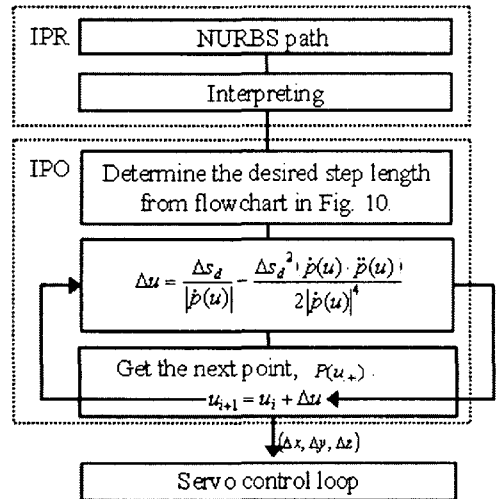


Fig. 5 Layout of the proposed curve interpolator

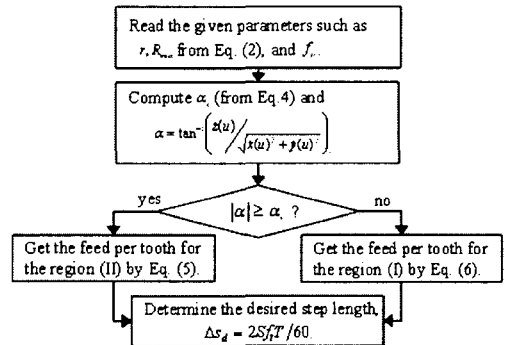


Fig. 6 Flowchart for getting a set of step length based on the target roughness

Fig. 5는 본 연구에서 구현한 특별한 이송속도 명령을 생

성할 수 있는 NURBS 보간 알고리즘 흐름도를 나타내었다. 제안된 보간기는 크게 해석기(IPR)와 보간기(IPO), 두 부분으로 구분된다. 해석기에서는 기본적인 코드 문법해석을 수행하고 보간기에서는 보간 오차 검사, 가감속 조정, 그리고 이송 최적화 기능이 포함된다. 이송 최적화는 목표 표면 거칠기를 달성하기 위하여 Fig. 6의 과정을 거쳐서 수행되었다.

## 4. 고이송가공 실험

### 4.1 실험 방법 및 평가 항목

제안된 보간 알고리즘은 PC-NC로 재구성된 밀링 머신에 이식되었고, 윈도우 NT 기반에 실시간 처리를 보장하기 위하여 RTX (VentureCom Co.)를 사용하였으며, 보간 주기를 4msec로 설정하고, Fig. 7에서 보이는 곡면으로 이루어진 모델을 다음과 같은 조건에서 수행하였다. 공구 반경 3mm인 초경 볼 엔드밀은 이용하였으며, 주축 회전속도는 12500rpm, 이송 속도 5000mm/min, 공구 경로간 간격은 0.2mm로 설정하였다. 본 실험에서 사용된 공구 경로는 Cimatron사의 QuickNC (Ver. 4.03)을 이용하였으며, 위의 가공 조건을 적용하여 직선보간으로만 이루어진 공구 경로와 NURBS보간으로 이루어진 공구경로를 Fig.8과 같이 생성하였다. 제안된 변동 이송 NURBS 보간기의 성능을 평가하기 위하여, 총 3회의 가공을 실시하였다.

(a) 직선 보간

(b) NURBS 보간

(c) 등방 표면 조도를 위한 변동이송 NURBS 보간

각각의 경우에 대하여 생성된 공구 경로의 줄 수, 총 가공 시간 및 이송의 직각 방향(y축 방향)에서의 표면 조도 및 이송 방향(+x축)으로의 표면 조도 등을 측정하였다. Fig. 7에 동그라미로 표시된 부분에서 등방 표면 조도를 위해서 이송 속도가 변동하게 되므로, 이 부분의 표면 조도를 측정하였다.

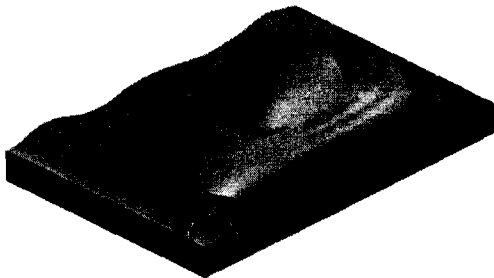


Fig. 7 An example model

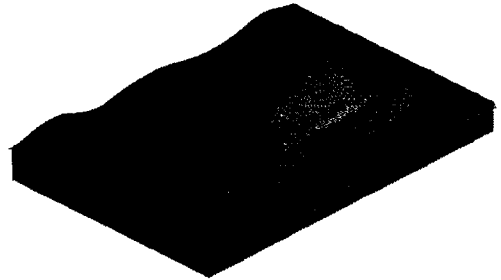
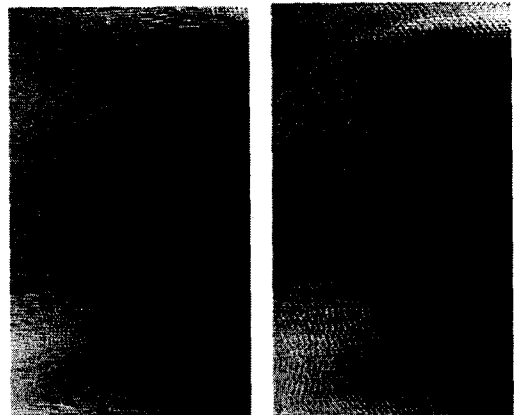


Fig. 8 Generated toolpaths

### 4.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 9는 위의 조건에 의해서 실가공된 표면을 촬영한 사진이다. (a)에서 보이는 바와 같이 고속 이송으로 직선 보간 가공을 한 경우에는 이송 방향에 수직으로 물결무늬가 생기는 것을 확인할 수 있었다. 곡면으로 이루어진 모델을 직선으로 끊어가면서 가공을 할 때, 고속이송이 적용됨으로 인해서 속도의 불연속에 의한 결과라고 사료된다. 이에 반하여 (b)에서는 공구가 곡선으로 이송하였으므로, 속도의 불연속이 발견되지 않았다.



(a)

(b)

Fig. 9 Machined parts. (a) Linear Interpolation (G01)  
(b) Nurbs Interpolation (G06.2)

Table 1에서 보이는 바와 같이, 가공 시간은 등방 표면 조도를 위한 변동 이송(c)의 경우에 이송 경사각에 따라 이송속도가 줄어드는 부분이 생기게 되어 가공 시간이 (b)에 비하여 약간 지체되었다. 반면, (a) 경우에 비하여 시간이 많이 지체되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 얻게 된 것은 NURBS 공구 경로를 생성하는 CAM 프로그램의 성능에 인한 결과로 사료된다. 실제 본 실험에서 생성된

NURBS 공구 경로는 많은 부분에서 곡선으로 근사하지 못하고 직선으로 끊어서 결과를 생성할 뿐 아니라, 직선의 경우도 NURBS 공구 경로로 생성된 부분이 발견되었다. 직선을 NURBS로 표현함에 따라 오히려 Data량도 늘고, 공구 경로 해석에 불필요한 시간이 소요되었다.

본 실험에서 목표로 한 최대 표면 조도는  $3.3\mu\text{m}$ 이다. Table 1에서와 같이 이송의 직각 방향의 표면 조도는 공구 경로 생성 시 결정되므로, (a),(b),(c) 거의 비슷한 측정결과를 보여주고 있다. 이와 반대로 이송 방향으로의 표면 조도는 (a)가 가장 좋은 결과를 보여주고 있다. 이는 직선 보간에 의해서 공구가 이송할 때, 주어진 이송속도보다 낮은 속도로 이송하였기 때문에 나타난 결과이다. (b)의 경우에는 곡선으로 이송하면서 주어진 이송속도를 만족시키면서 가공하였기 때문에, 표면 조도가 크게 나왔으며, (c)와 같이 목표 표면 조도를 조절하기 위해서 변속 이송을 적용하였을 경우 표면 거칠기가 좋아지는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 직선보간과 제안된 실시간 이송 속도 스케줄링이 적용된 NURBS 보간을 이용하여 가공한 면을 촬영한 사진이다. 전자의 경우, 이송 방향 표면 조도가 더 좋으나, 물결무늬를 발견할 수 있는 반면, 후자의 경우 이송 방향으로 일정한 표면 조도가 분포함을 알 수 있다.



(a) Linear Interpolation (G01)



(b) NURBS interpolation (G06.2) adopting real-time feedrate scheduling

Fig. 10 Machined surfaces

Table 1 Measured data

	(a)	(b)	(c)
number of toolpath lines	210,522	209,314	209,314
machining time	50m8s	57m44s	58m26s
roughness (y-axis, $\mu\text{m}$ )	$R_a : 0.48$ $R_{max} : 2.43$	$R_a : 0.38$ $R_{max} : 2.04$	$R_a : 0.41$ $R_{max} : 2.35$
roughness (x-axis, $\mu\text{m}$ )	$R_a : 0.67$ $R_{max} : 3.2$	$R_a : 1.03$ $R_{max} : 4.6$	$R_a : 0.80$ $R_{max} : 3.27$

## 5. 결론

본 연구에서는 고속 가공을 이용한 정삭 가공에서 사용되는 NURBS 보간기를 개발함에 있어서, 이송 방향의 표면 조도가 사이드 스텝에 의해서 결정되는 커슥 높이와 같아지도록 등방 표면 조도를 위한 실시간 이송속도 제어 기법을 제안하였다. 특히, 고이송 가공에서 공구 정점부근의 인선이 가공면에 남기는 특이 돌출부를 효과적으로 대처할 수 있음을 보였다. 이를 위하여 확장된 표면 거칠기 모델을 기하학적인 인자로부터 유도하였고, 이를 PC-NC기반에서 NURBS 곡선 보간 알고리즘에 적용하였다. 제안된 확장된 표면 거칠기 모델은 이송 경사각의 정보만으로 표면 거칠기와 이송속도 사이의 관계를 정하므로 실시간 곡선 보간에 응용하는데 적합하였으며, 목표 표면 거칠기를 달성할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) S. S. Yeh and P. L. Hsu, 1999, "The speed-controlled interpolator for machining parametric curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, pp. 349-357.
- (2) C. C. Lo, 1998, "A new approach to CNC tool path generation," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No.8, pp. 649-655.
- (3) R. T. Farouki, J. Manjunathaiah, D. Nicholas, G. F. Yuan and S. C. Jee, 1998, "Variable-feedrate CNC interpolators for constant material removal rates along pythagorean-hodograph curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 631-640.
- (4) R. S. Lin and Y. Koren, 1996, "Efficient tool-path planning for machining free-form surface," *Journal of Engineering for Industry, Trans. of the ASME*, Vol. 118, pp. 20-28.
- (5) N. Koreta, T. Egawa, M. Kuroda, K. Watanabe and Y. Li, 1993, "Analysis of surface roughness generation by ball endmill machining," *Japan Society for Precision and Engineering*, Vol. 59, No. 9, pp. 129-134(in Japan).