

# 온라인 방식의 공구경로 계획을 내장한 지능형 NURBS 곡면 보간 시스템

구태훈\*, 지성철#

## Intelligent NURBS Surface Interpolation System with Embedded Online Tool-Path Planning

Taehoon Koo\* and Sungchul Jee#

### ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the machining of free-formed NURBS surfaces using newly defined G-codes which can directly deal with shapes defined from CAD/CAM programs on a surface basis and specialize in rough and finish cut. To this purpose, a NURBS surface interpolation system is proposed in this paper. The proposed interpolation system includes online tool-path planning, real-time interpolation and feedrate regulation considering an effective machining method and minimum machining time all suitable for unit NURBS surface machining. The corresponding algorithms are simultaneously executed in an online manner. The proposed NURBS surface interpolation system is integrated and implemented with a PC-based 3-axis CNC milling system. A graphic user interface (GUI) and a 3D tool-path viewer which interprets the G-codes for NURBS surfaces and displays whole tool-paths are also developed and included in our real-time control system. The proposed system is evaluated through actual machining in terms of size of NC data, machining time, regulation of feedrate and cutting force focused on finish cut in comparison with the existing method.

**Key Words** : CNC (컴퓨터수치제어), NURBS (비균일 유리 B-스플라인), Surface interpolator (곡면 보간기), Surface machining (곡면가공), 온라인 공구경로 계획 (Online tool-path planning), G 코드 (G code), 이송속도 (Feedrate), 절삭력 (Cutting force), 실시간 제어 (Real-time control)

### 1. 서론

근래의 3 차원 윤곽가공에서는 CAD/CAM 에서 기준곡면을 정의하고 CAM 소프트웨어의 후처리기 (post-processor)를 통하여 황삭(rough cut), 정삭(finish

cut) 혹은 황삭, 중삭(intermediate cut), 정삭에 대한 일련의 NC 데이터를 생성한다. 이 때, 정의된 모든 곡면에 대하여 직선 보간 G 코드로 분할 표현하여 가공하며, 기준곡면에 대한 근사 정확도를 높이기 위하여 곡면을 표현하는 NC 데이터의 양

접수일: 2006 년 6 월 26 일; 게재승인일: 2006 년 8 월 9 일

\* 단국대학교 대학원 기계공학과

# 교신저자: 단국대학교 기계공학과

E-mail: scjee@dku.edu, Tel: (02) 709-2911

을 늘리거나 곡면을 곡선 단위로 분할하여 해석할 수 있는 곡선 보간 G 코드를 이용한다.<sup>1</sup> 전자의 경우 보간기 내부의 중감속 효과로 인한 가공정확도의 저하와 대용량의 메모리 공간 혹은 DNC 등이 요구되는 단점이 있다. 따라서 기존의 이송속도 최적화 알고리즘 역시 동일한 영향을 받으며, 오프라인 방식에서 동작한다.<sup>2</sup> 후자의 경우 곡선 보간을 위한 NC 지령 명령어가 표준화되지 않아 적용하기 어려운 문제가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 일환으로 CAM 의 곡면처리 모듈을 CNC 에 내장시키려는 STEP-NC 와 같은 연구들이 진행 중이다.<sup>3</sup> 그러나 STEP-NC 의 경우 ISO 6983 을 이용하는 기존 시스템과의 호환이 어렵다는 단점을 갖고 있다.

따라서, 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 기존의 가공시스템과 호환이 가능하고 사용자가 가공하려는 3 차원 단위곡면을 쉽게 가공할 수 있는 NURBS 곡면 보간 시스템을 제시한다. 제시된 시스템에서는 NURBS 곡면을 이용한 단위곡면 가공을 위해 새로운 G 코드를 정의하여 사용하며, 기존 G 코드와 병용하여 사용할 수 있다. 새로운 G 코드로써 정의된 NURBS 곡면가공 코드는 가공될 소재의 형상과 최종 절삭면에 따라 요구되는 피삭량과 절삭조건이 다를 고려하여 절삭 후 잔여 절삭깊이 등을 부가적인 파라미터로 입력함으로써, 각 절삭 과정에 맞는 지능적이고 효율적인 공구경로 계획을 제공한다. 제시된 시스템은 ISO 6983 을 이용하는 기존의 시스템들과 호환 가능한 방식으로 구현되며 CAD 데이터와 연계하여 곡면가공을 위한 완전 온라인(online) 처리 방식의 곡면가공 모듈로써의 활용이 용이하다. 즉, 제시된 곡면 보간 시스템은 CAD/CAM 에서 정의된 기준곡면을 곡면 단위로 통째로 해석하여 가공하기 때문에 곡선을 직선으로 근사화 할 필요가 없고, 그 결과 CAM 의 후처리가 매우 간결해지며 단위곡면 전체가 소량의 NC 데이터만으로도 표현이 가능하다. 무엇보다도 곡면 전체가 지능적인 온라인 방식으로 처리되기 때문에 기존 방법에 비해 보다 매끄러운 3 차원 윤곽 가공면을 기대할 수 있다는 장점이 있다.<sup>4</sup>

본 논문에서 제시된 NURBS 곡면 보간 시스템을 곡면 단위의 해석이 가능하고 실제 가공이 가능한 3 축 개방형 PC-NC 밀링 시스템에 구현하여 그 효용성을 검증하였다. 본문에서는 구축된 시스

템의 간략한 H/W 및 S/W 의 구조를 소개하며, 이를 이용한 절삭 실험의 결과를 요약하였다. 실시간 공구경로 생성능력, 요구되는 NC 데이터의 크기, 이송속도 조정능력, 절삭력의 균일 정도, 단위곡면당 가공시간을 기존의 곡면 보간방법과 비교하여 제시된 방법의 유용성을 평가하였다.

## 2. 제시된 NURBS 곡면 보간 시스템

본 연구에서 제시되는 NURBS 곡면 보간기를 이용하면 사용자가 G 코드를 직접 입력하는 방식으로 3 차원 곡면의 가공이 가능하다. 그러나 3 차원 곡면가공을 위해서는 기존의 CAD/CAM 시스템을 이용하는 것이 일반적이므로, Fig. 1 과 같은 구조의 곡면 보간 시스템을 제안한다. 이 시스템에서 NURBS 곡면 보간기를 활용함에 있어서,

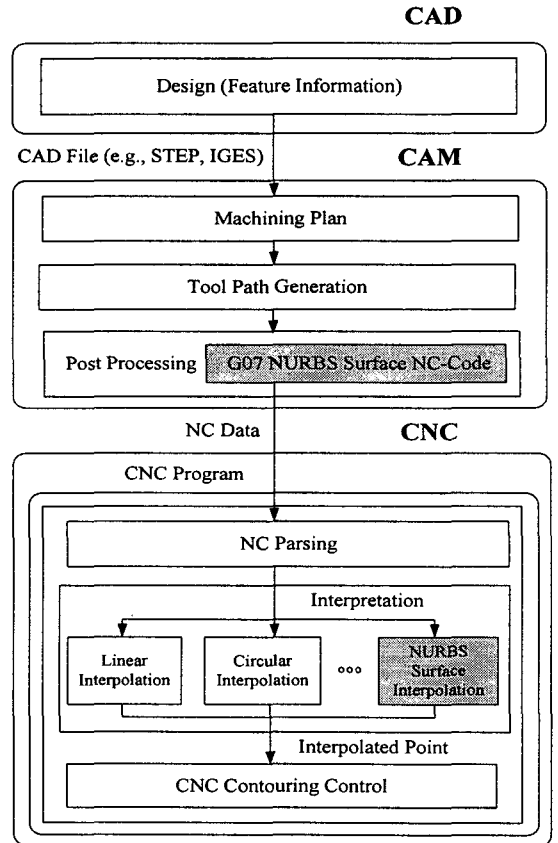


Fig. 1 Schematic process of the proposed interpolation system

CAM 과 CNC 에서 각각 요구되어지는 부분을 Fig. 1 에 회색 음영의 블록으로 표시하였다. 본 연구에서는 곡면처리 알고리즘이 CNC 내부에 적재되어 기존의 직선, 원호의 처리 방식과 같이 G 코드 입력방식을 이용하여 온라인으로 처리되며, 이를 위한 NC 데이터는 CAM 소프트웨어에서 후처리 과정을 거친 것으로 가정하여 실험에 적용하였다.

### 2.1 온라인 공구경로 생성 방법

기존의 연구에서는 곡선 보간 알고리즘을 응용한 등매개변수(iso-parameter) 방법과<sup>5</sup> 매개변수 다항식으로 표현된 단순하고 제한적인 곡면 형상을 대상으로 등스캘럽 방식의 곡면 보간 알고리즘이 제시되었다.<sup>6</sup> 이들은 모두 매개변수 다항식의 계수를 직접 G 코드 데이터로 구성하는 방법을 이용하였다.

그러나, 등매개변수 방법을 이용하는 알고리즘은 단순한 반면 가공시간이 오래 걸리는 단점이 있고, 기존의 등스캘럽 방식에 대한 알고리즘은 자유로이 곡면을 정의할 수 있는 NURBS 곡면에 대해서는 적용시킬 수 없다. 더 나아가 사용자가 매개변수 다항식을 직접 입력해야 하기 때문에 곡면의 형상을 예측할 수 없는 단점이 있다. 또한, 기존의 곡면 보간 방식으로는 NURBS 를 이용하는 CAD/CAM 의 기준곡면에 대응시키기에 무리가 있다. 따라서, 본 연구에서는 CAD/CAM 에서 정의된 곡면을 그대로 해석하거나 근사화하여 후처리 할 목적으로, 식 (1)과 같은 NURBS 곡면식을<sup>7</sup> 그대로 온라인상에서 해석하도록 하였다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{ik}(v) N_{jl}(u) V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m W_{ij} N_{ik}(v) N_{jl}(u)} \quad (1)$$

그리고, 본 연구에서는 등스캘럽 공구경로 생성을 위해 곡면의 보간시에 각 보간점마다 공구경로 간격 방향(side-step direction)으로 규정 스캘럽 높이를 만족하는 거리만큼의 매개변수값을 Fig. 2(a)와 같이 스택(stack)에 저장하여 다음 공구경로 생성에 이용하는 방법을 사용하였다. 이 때 각 보간점마다 계산되어 메모리에 저장된 값들에 대해 다음 공구경로 생성시 Fig. 2(b)와 같이 일정량을

꺼내어 국부적인 보간식을 구성하고, 생성된 보간식 내에서 수치해석적 반복 알고리즘을 통하여 공구의 이송 보간점을 계산한다.<sup>8</sup> Fig. 2 의 (c)와 (d) 는 다음 공구경로 생성을 위해 계산된 공구경로 간격 방향의 매개변수들이 곡면 정의 영역의 상한값을 초과하는 경우에 대한 처리 방법을 나타낸다. 매개변수  $v(u)$ 는 정의된 곡면의 영역을 지나지 않아야 하므로, Fig. 2(d)와 같이,  $v^*_k > 1$ 의 경우에 대해 항상  $v^*_k = 1$  이 되어야 한다. 또한,  $v^*_k \geq 1$ 인 경우  $u_{min}$  과  $u_{max}$  의 범위를 조정하여 보간이 모두 이루어진 구간을 제외해야 하므로  $v^*_k = 1$ 이 되는  $u_k$  값들의 최소, 최대값을 기억하여  $v^*_k \geq 1$ 인 경우의 곡면상의 보간점들이  $S(u_{min}, v^*_k)$  와  $S(u_{max}, v^*_k)$  의 사이를 오가도록 설정한다. 마지막으로, 이러한 왕복을 반복한 결과  $S(u_{max}, v_{max})$  와  $S(u_{min}, v_{min})$  의 간격이 규정 스캘럽 높이를 만족할 때 보간 알고리즘을 종료해야 한다. 이 때,

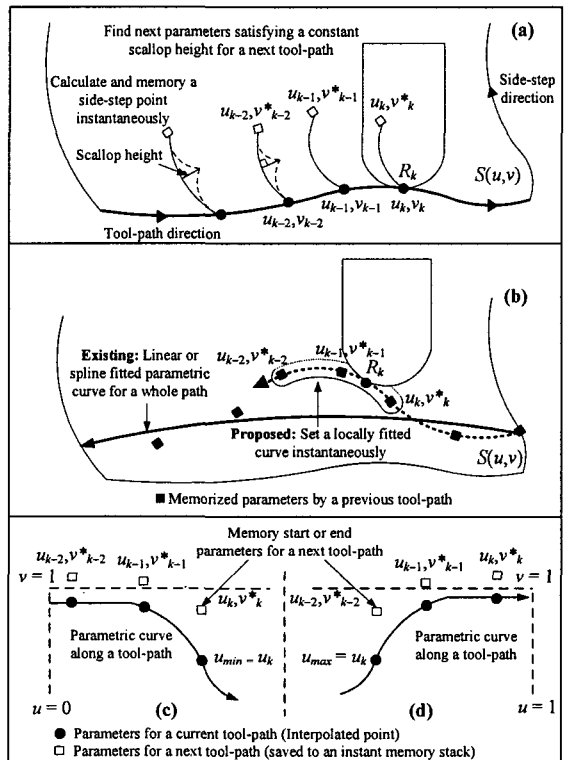


Fig. 2 Schematic of intelligent online tool-path planning for NURBS surfaces

$u_{\min}$  과  $u_{\max}$  의 값은 국부 보간내  $v^*_k < 1$  이 되는 최초의  $u_k$  값이다. 공구경로 방향이 매개변수  $u_k$  가 0 에서 1 로 변화될 경우  $u_{\min}$  으로 설정하고,  $u_k$  가 1 에서 0 으로 변화될 경우  $u_{\max}$  로 설정한다. 만약  $u_{\min}$  과  $u_{\max}$  값이 설정되기 이전에  $v^*_k \geq 1$  인 경우에 대한 매개변수들이 계산되었다면 Fig. 2(c) 와 같이 이를 다음 공구경로 생성을 위한 메모리 영역에 저장하지 않는다.

**2.2 지능형 이송속도 생성 알고리즘**

굴곡이 존재하는 곡면의 가공시 엔드밀을 균일한 속도로 이송시킨다 하더라도 곡면의 곡률에 따라 비절삭체적(material removal rate)이 달라진다. 고속가공을 지향하고 있는 현대의 가공추세에 따라 절삭깊이는 줄고 전체적인 평균 절삭력은 감소되었다. 그러나 갈수록 굴곡이 많으며 미세하고 복잡한 형상이 금형 등의 제품에 요구되고 있어 가공중에 절삭력의 변동이 커질 수 있다. 절삭력의 불균일 현상에 대한 가공면의 영향은 이미 잘 알려져 있는 바이다.<sup>2</sup>

곡면 보간기는 가공면의 곡면구성을 위한 입력 정보로 CAD/CAM 에서 생성된 기준곡면의 입력 정보를 이용한다. 따라서 공구접촉(CC) 경로를 기준으로 보간이 이루어진다. 그러나 이 방법은 무조건 CC 경로에 대하여 등간 보간하고 각 점에서 곡면에 수직한 법선벡터 방향의 공구 윗셋만을 고려하여 공구위치(CL) 보간점을 계산하는 방식이기 때문에 굴곡이 큰 곡면의 정삭가공에서 소재의 잔여 절삭깊이가 일정하더라도 CL 경로에 대한 이송속도의 가감속량이 증가하게 된다. 그 결과 이송계서보 특성상 형상정확도가 불량해지고 절삭력이 급격히 증가할 수 있으며, 더 나아가 공구손상과 진동의 원인이 될 수 있다. 따라서 이것을 고려하여 곡면의 굴곡에 따른 비절삭체적의 차이를 구속하고 균일한 절삭력을 얻을 수 있도록 하였다. 즉, CL 이송속도의 변동이 작게 되도록 식 (2)와 같이 공구의 이송속도를 곡면의 곡률반경을 이용하여 조절하는 방법을 적용하였다.<sup>4</sup>

$$V_r = \frac{V_0}{1 + \delta/(2\rho)} \tag{2}$$

식 (2)는 곡면이 볼록한 경우와 오목한 경우에

대한 비절삭체적이 같도록 구속하기 위해, 평면 절삭의 비절삭체적을 두 경우에 대한 비절삭체적과 각각 등가로 놓고 CC 경로상의 이송속도  $V_r$  에 대해 정리한 결과이다. 여기서, 이송속도  $V_0$  는 사용자가 지정한 CC 경로에 대한 기준 이송속도이고  $\rho$  는 3 차원 곡률반경으로서 곡면이 볼록한 경우 (+)기호를, 오목한 경우 (-)기호를 갖는다. 절삭깊이  $\delta$  는 정삭에 앞서 중삭 가공에서 잔여 절삭깊이가 균일하게 가공되어 기준곡면에 대해 일정한 높이를 이루고 있다고 가정한다. 마지막으로, CC 경로에 대한 가변 이송속도  $V_r$  은 가공을 고려해 설정된 상한값 내에서 동작하도록 설정하였다.

**2.3 실시간 곡률반경 계산 알고리즘**

본 절에서는 식 (2)에서 이용하는 곡면의 곡률반경  $\rho$  를 계산하는 방법을 제시하고자 한다. 이것은 기준곡면을 보간하는 보간점들을 이용하여 등스칼롭 방식에 적합한 새로운 방법이다. 공구경로 방향에 대한 곡면의 곡률반경을 계산하는 일반적인 식은 식 (3)과 같이 표현된다.<sup>4,6</sup>

$$\rho(u) = \frac{\left| \frac{\partial S}{\partial u} \right|^4}{\frac{\partial S}{\partial u} \times \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} \times \frac{\partial S}{\partial u}} \tag{3}$$

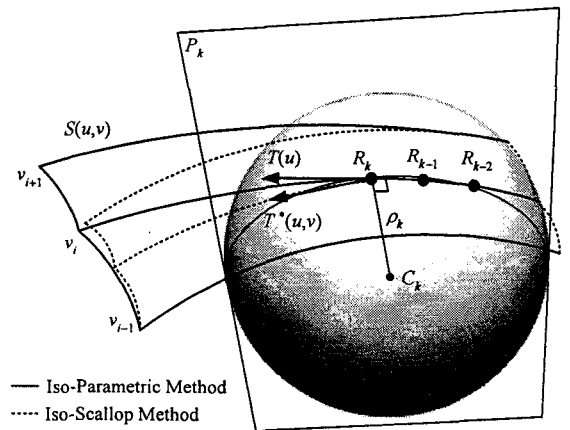


Fig. 3 Real-time calculation of surface curvature in tool-path direction

이 식은 등매개변수 방법에는 적합하나 등스캘립 방법에는 그렇지 못하다. 그 이유는 식 (3)이 공구 경로 방향에 대한 접선벡터  $T(u)$ (Fig. 3 참조)와 곡면상의 수직 법선벡터를 이용하기 때문에 등매개변수 방법과는 공구경로의 접선방향이 부합되나, 등스캘립 방법에서는 Fig. 3 과 같이 공구경로 방향으로의 접선방향이 두 개의 매개변수에 대한 식  $T^r(u,v)$ 로써 표현되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 식 (3)을 이용하는 기존의 방법 대신 Fig. 3 과 같이 CC 경로를 따라 실제 보간된 세 점들로 구성된 3 차원의 원을 이용하는 방법을 제시한다.

먼저 보간기를 거쳐 계산된 각 3 개의 보간점들이 일직선상에 있지 않다고 가정하면, 공간상에서 이 세 점을 지나는 평면의 방정식은 식 (4)와 같다.

$$px + qy + rz + s = 0 \quad (4)$$

Fig. 3 에서  $R_k(x_k, y_k, z_k)$  는 기준 좌계의 현재 보간점이고 이전 단계의 보간점을  $R_{k-1}(x_{k-1}, y_{k-1}, z_{k-1})$  과  $R_{k-2}(x_{k-2}, y_{k-2}, z_{k-2})$  라 하면 이들 세 기준점(reference point)의 좌표를 이용하여 식 (4)의 계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p = (z_{k-2} - z_k)(y_{k-1} - y_k) - (z_{k-1} - z_k)(y_{k-2} - y_k) \quad (5)$$

$$q = (x_{k-2} - x_k)(z_{k-1} - z_k) - (x_{k-1} - x_k)(z_{k-2} - z_k) \quad (6)$$

$$r = (x_{k-1} - x_k)(y_{k-2} - y_k) - (x_{k-2} - x_k)(y_{k-1} - y_k) \quad (7)$$

$$s = \{(y_{k-2} - y_k)(z_{k-1} - z_k) - (y_{k-1} - y_k)(z_{k-2} - z_k)\}x_k - \{(x_{k-1} - x_k)(y_{k-2} - y_k) - (x_{k-2} - x_k)(y_{k-1} - y_k)\}z_k + \{(x_{k-1} - x_k)(z_{k-2} - z_k) - (x_{k-2} - x_k)(z_{k-1} - z_k)\}y_k \quad (8)$$

그리고 세 기준점을 포함하는 임의의 구면에 대한 아래 식 (9)와

$$(x - C_x)^2 + (y - C_y)^2 + (z - C_z)^2 - \rho^2 = 0 \quad (9)$$

식 (4)를 연립하여 원의 중심좌표  $C(C_x, C_y, C_z)$  와 반경  $\rho$  를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & q & r & 0 \\ -2x_k & -2y_k & -2z_k & 1 \\ -2x_{k-1} & -2y_{k-1} & -2z_{k-1} & 1 \\ -2x_{k-2} & -2y_{k-2} & -2z_{k-2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -s \\ -x_k^2 - y_k^2 - z_k^2 \\ -x_{k-1}^2 - y_{k-1}^2 - z_{k-1}^2 \\ -x_{k-2}^2 - y_{k-2}^2 - z_{k-2}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 방법의 장점은 무엇보다도 공구경로 방향의 곡률반경을 계산하기 위해 보간기에서 계산된 3 점의 좌표 외에는 곡면에 대한 부가적인 정보가 필요 없으며 NURBS 곡면이 아닌 여타의 곡면과 곡선에 대해서 모두 적용이 가능하다는 점이다.

### 3. 실험 결과

제시된 보간 시스템의 성능 평가를 위해, Fig. 4 와 같은 3 축의 개방형 PC-NC 밀링 시스템을 구축하였다. 실험에는 모두 2 대의 독립된 PC 를 이용하여 실시간 제어 및 절삭력 데이터 획득을 수

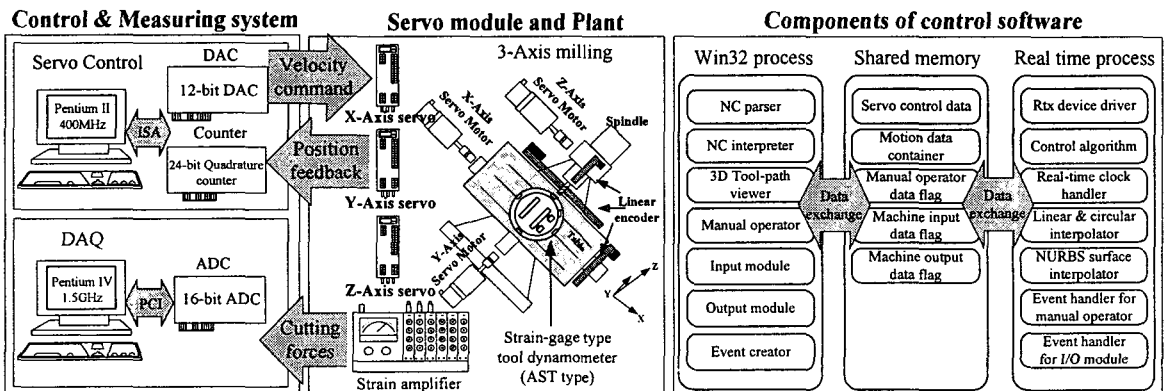


Fig. 4 System diagram (H/W and S/W configuration)

행하였다. 각 축의 서보 모듈로는 Yaskawa 사의 450W 3 상 AC 모터(X, Y 축)와 33:1 의 감속기어가 부착된 100W 3 상 AC 모터(Z 축)를 이용하였고, 백래시를 보정하기 위하여 0.5  $\mu\text{m}$  의 분해능을 갖는 리니어 엔코더를 밀링 테이블에 별도로 장착하였다. 각 축의 서보 파라미터는 Table 1 과 같다. 서보 지령을 위한 12 bit DAC 와 24 bit 카운터 보드를 내장한 PC 를 이용하여 폐환 제어시스템을 구성하였다. 제어에 쓰인 PC 는 MS Windows 기반으로 GUI 환경을 갖추었으며, 각 축 서보 모듈의 실시간 제어를 위하여 Ardence 사의 RTX(Real-Time eXtension) 를 이용하였다. 그리고 나머지 PC 로는 LabVIEW 를 이용하여 공구동력계로부터의 절삭력 신호 획득을 위한 DAQ 시스템을 갖추었다.

개발된 곡면 보간 시스템은 곡면을 무수한 공구경로의 연속으로 표현하기 때문에 가공될 곡면의 형상과 공구경로를 검증하기 위하여 3 차원 공구경로 뷰어가 요구된다. Fig. 5 는 실험을 위해 선정된 굴곡이 심한 NURBS 곡면의 연속적인 CC 경로를 개발된 3 차원 공구경로 뷰어에 나타낸 것이다.

Table 1 Parameters of the experimental system

Parameters	X and Y-axis	Z-axis
Open-loop gain	120 $\text{s}^{-1}$	74 $\text{s}^{-1}$
Time constant	30 ms	7 ms
Basic length-unit	0.5 $\mu\text{m}$	
Sampling time	1 ms	

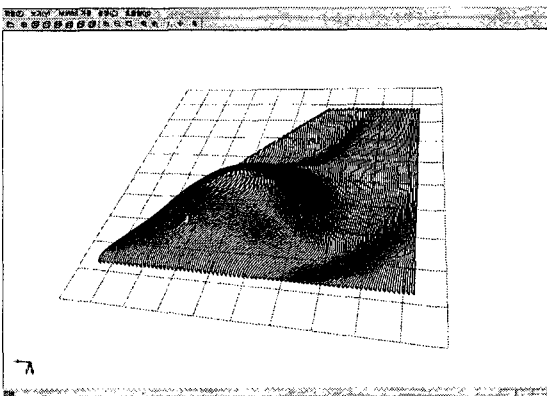


Fig. 5 Continuous CC paths for unit NURBS surface machining

Table 2 Comparison of NC data size for NURBS surface machining (KB)

Interpolator	Linear	Proposed
Data size	5203.97	0.72

Fig. 5 와 같은 곡면의 가공을 위하여, CAD 파일에서 이 곡면을 정의하고 기존의 직선 분할 방식으로 후처리할 경우와 제시된 NURBS 곡면 보간 G 코드(본 연구에서 G07 로 정의함)로 후처리될 경우를 가정하여 정상 가공에 필요한 NC 데이터의 크기를 Table 2 에 비교하였다. 우선 CAD 파일은 Rhino 3D 를 이용하여 표준 IGES 형식으로 생성하였으며, 직선 분할 방식의 후처리 과정은 Z-map 을 이용하는 상용 CAM 소프트웨어를 사용하였다. 이때, 후처리를 위해 5 mm 직경의 볼엔드 밀, 0.01 mm 의 공구경로 간격, 0.001 mm 의 chord 높이 오차(chord height error)를 설정하였고, 이송속도는 580 mm/min 으로 하였다. CAD 파일의 크기는 6.96 KB, 후처리 결과 얻어진 NC 데이터의 크기는 5203.97 KB 를 이루었다. 이것을 NURBS 곡면 보간 G 코드로 대체시킬 경우 0.72 KB 의 NC 데이터만으로도 표현이 가능함을 알 수 있다.

가공의 기준곡면은 6×6 의 조정점을 갖는 NURBS 곡면이며, 가공소재는 60×100×50 mm 크기의 6061 알루미늄을, 공구는 직경이 5 mm 인 초경재질의 두날 볼엔드밀을 사용하였다. 소재는 정상 가공을 위하여 약 2.5 mm 의 절삭깊이가 남겨지도록 황삭과 중삭을 거쳐 선가공되었다. 주축의 회전속도를 2700 rpm, CC 경로에 대한 이송속도  $V_0 = 580 \text{ mm/min}$  으로 하여 정상된 가공물의 형상을 Fig. 6 에 나타내었다.

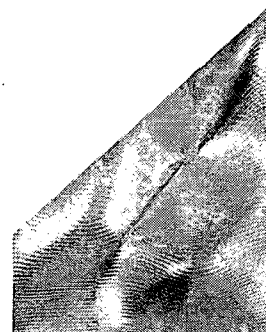


Fig. 6 Machined NURBS surface

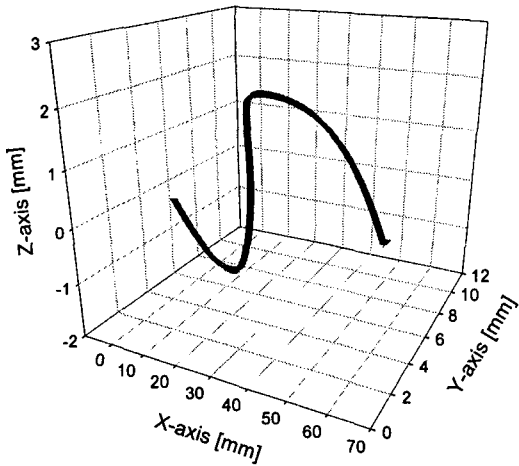


Fig. 7 A tool-path on the machining surface

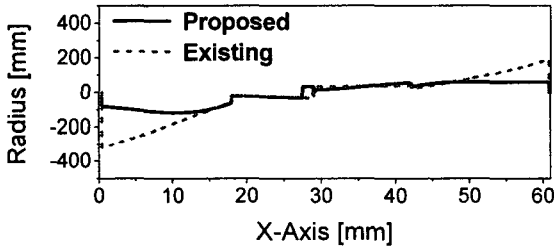


Fig. 8 Comparison of calculated surface radii of curvature along the tool-path in Fig. 7

Fig. 7 은 Fig. 6 과 같은 가공면상의 공구경로의 일부를 나타낸 것으로, 제시된 보간 알고리즘의 이송속도 조절 능력을 살펴보기 위하여 선정된 굴곡이 큰 입의의 구간이다. 이 공구경로에 대해, 제시된 곡률반경 계산 알고리즘의 결과를 식 (3)을 이용하는 기존의 방법과 비교하여 Fig. 8 에 나타내었다. 이는 Fig. 7 의 공구경로를 따라 실시간 계산된 곡률반경을 Fig. 7 에서 축 변위가 가장 큰 X 축 데이터에 대응시켜 나타낸 것이다. 곡면의 굴곡이 완만한 부분에 대해서는 두 방법에 큰 차이가 없었으나, 굴곡이 공구경로 간격 방향으로 존재하는 경우에는 해당 매개변수( $v$ )의 변동이 생기므로 Fig. 8 의 결과에서와 같이 기존 방법의 계산 결과는 제시된 방법과 많은 차이가 있음을 볼 수 있다.

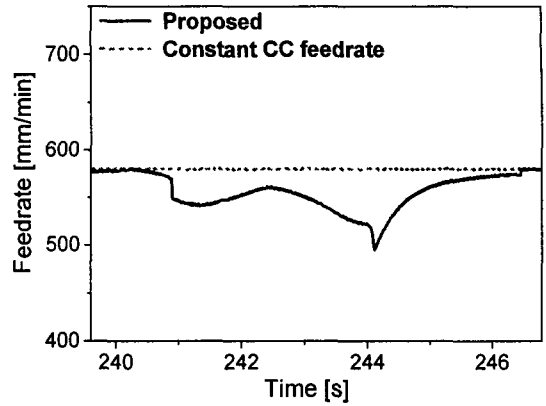


Fig. 9 Comparison of reference feedrates

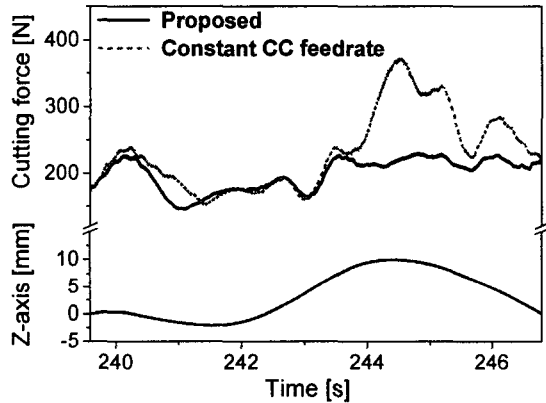


Fig. 10 Comparison of averaged cutting forces

Fig. 9 와 Fig. 10 에는 동일한 공구경로에 대해, 제시된 곡률반경 계산 알고리즘에 기초한 이송속도 조절을 실행하는 경우와 CC 경로를 따라 일정 이송속도로 가공하는 경우의 보간기 출력 이송속도와 절삭력을 각각 비교하였다. 절삭력은 스트레인 게이지 방식의 공구동력계를 이용하여 측정하였으며, 평균 절삭력의 추이를 살펴보기 위해 500 개의 데이터(0.5 s의 시간 간격에 해당)를 누적 평균한 이동평균(moving average)을 취하였다. Fig. 9 는 CC 경로에 대한 실시간 이송속도 조정 결과를 나타내는데, 특히 곡면의 곡률변화가 뚜렷한 볼록한 구간에서 절삭력의 증가를 고려하여 기존 이송속도 대비 최대 15% 정도 감속됨을 볼 수 있다. 그 결과 Fig. 10 에서와 같이, 곡면의 굴곡에 따른 비절삭체적 변화의 고려 없이 CC 경로에 대해 등

간 보간방식을 행하는 기존 보간기에 비하여 제시된 보간 방식이 보다 균일한 평균 절삭력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

Table 3 Comparison of machining time (s)

Method	Machining time
Iso-parametric	1312.858
Proposed	986.193

끝으로, 기존의 등매개변수 방법을 적용할 경우와 제시된 등스칼럽 방식의 곡면 보간기를 적용한 경우의 가공 소요시간을 Table 3 에 비교하였다. 이것은 Fig. 5 의 곡면에 대해 규정 스칼럽 높이를 0.01 mm 로 설정한 결과이며, 가공시간이 기존 방법에 비해 25% 가량 단축되었다. 가공시간의 감소 효과는 스칼럽 높이를 작게 할수록 더욱 커지게 된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 NURBS 곡면의 CNC 가공을 위해 지능형 NURBS 곡면 보간 시스템을 제시하였다. 이 시스템은 새로이 정의된 G 코드에 기초한다. 제시된 시스템의 NURBS 곡면 보간기는 새롭게 제시된 곡면의 곡률반경 계산 알고리즘을 바탕으로 정상 과정의 절삭조건에 적합하도록 이송속도를 실시간으로 조절한다. 즉, 굴곡이 있는 가공면에 대하여 비절삭체적을 일정하게 유지시킬 수 있도록 CC 경로상의 이송속도를 조정하여 보다 균일한 평균 절삭력을 제공해준다. 또한 제시된 NURBS 곡면 보간기에서는 보간과 공구경로 계획이 모두 온라인상에서 함께 이루어진다. 따라서 CAD/CAM 에서 정의된 기준곡면을 곡면 단위로 통째로 해석하여 가공하는 것이 가능하여 복잡한 형상의 곡면 가공에 대해 효율적이라고 사료된다.

제시된 시스템을 3 축 개방형 PC-NC 밀링 시스템에 구현하여 그 유용성과 성능을 기존의 곡면 보간 방법과 비교하였다. 제시된 곡면 보간기는 굴곡이 있는 곡면가공에 대하여 기존 방식에 의한 NC 데이터의 크기 및 가공 소요시간을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 정상 가공에 있어 제시된 곡면 보간기는 균일한 절삭깊이를 가정한 곡면가공에 대해 실시간 이송속도 조정으로 일

정 절삭력을 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 제시된 NURBS 곡면 보간 시스템이 실용화되면, 곡면가공을 위한 NC 데이터의 비약적 축소와 균일 조도를 유지하면서도 가공시간의 단축이 가능하다고 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-041-D00086).

#### 참고문헌

- Hong, W. P., Yang, M. Y. and Lee, E. K., "Simultaneous 3D Machining with Real-Time NURBS Interpolation," Journal of the KSPE, Vol. 19 No. 5, pp. 89-94, 2002.
- Kim, S. J., Jung, T. S. and Yang, M. Y., "Feedrate Optimization Using CL Surface," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 4, pp. 39-47, 2004.
- Suh, S. H., "STEP-NC Technology Realizing Information-based Intelligent Manufacturing System," Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 2, pp.26-32, 2002.
- Jee, S. and Koo, T., "NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling," Transactions of the KSME, A, Vol. 26, No. 9, pp. 1888-1896, 2002.
- Tsai, M. C., Cheng, C. W. and Cheng, M. Y., "A Real-Time NURBS Surface Interpolator for Precision Three-Axis CNC Machining," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 12, pp. 1217-1227, 2003.
- Lo, C. C., "CNC Machine Tool Surface Interpolator for Ball-End Milling of Free-Form Surfaces," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, No. 3, pp. 307-326, 2000.
- Piegl, L. and Tiller, W., "The NURBS Book," 2nd Edition, Springer, 1995.
- Koo, T. and Jee, S., "Real-Time Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Machining of NURBS Surfaces," Transactions of the KSME, A, Vol. 27, No 8, pp. 1418-1425, 2003.