

복합 사이클 코드 지령 방식의 다중곡면 가공을 위한 실시간 곡면 보간기

구태훈*, 지성철#

Real-Time Surface Interpolator for Multiple Surface Machining Based on a Surface Cycle Command

Taehoon Koo* and Sungchul Jee#

ABSTRACT

The present CNC machining system if without any CAM software has been limited to 2D or 2.5D plane cut using lines, arcs and curves. If the CNC is equipped with a surface interpolation module and a surface reorganizing module inside it, we can easily try 3D surface machining without aid of CAM software. The existing NURBS surface interpolator is simple and direct to use for a unit surface. However, it enables only machining of each reference surface individually even when machining a simple composite surface. In this paper, we propose a method which can unify and reorganize various reference surfaces with a newly defined NURBS surface cycle command: a multi-repetitive cycle command such as in a CNC turning center. We also introduce a reorganizing rule for reference surfaces using NURBS properties. The usefulness of the proposed method is verified through computer simulation.

Key Words : Cycle code (사이클 코드), G code (G 코드), NURBS (비균일 유리 B 스플라인), Real-time interpolator (실시간 보간기), Composite surface (합성곡면), Knot vector (노트 벡터)

기호설명

$N_{i,k}, N_{j,l}$ = basis functions of B-spline
 n, m = number of control points in u, v direction
 U, V = knot vectors
 k, l = orders of polynomial segments of B-spline
 $P_{i,j}$ = control points
 $W_{i,j}$ = weights
 u, v = parametric values

1. 서론

오늘날의 CNC 를 이용한 금형 가공 시스템에서 CAM 프로그램을 이용하지 않고서는 2D 혹은 2.5D 의 제한된 평면 가공만 가능할 수 밖에 없다. 이것은 기존의 보간 시스템이 직선, 원호, 곡선에 한정되어 있어 3 차원 곡면 절삭이 불가능하기 때문이다. 만약 곡면 데이터를 자체적으로 처리할 수 있는 보간 모듈을 CNC 내에 갖추고 있다면, 작업자가 곡면 가공 지령 코드들을 직접 입력하여

접수일: 2007 년 6 월 11 일; 게재승인일: 2007 년 6 월 18 일

* 단국대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 단국대학교 기계공학과

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

CAM 프로그램 없이도 간단한 3 차원 곡면 가공을 시도할 수 있을 것이다. 바로 이러한 문제를 해결하고자 제시된 것이 CNC 곡면 보간 시스템이다. 이와 비슷한 개념으로 CAD/CAM 소프트웨어가 융합된 STEP NC 시스템이 있으나 기존 시스템과는 패러다임을 달리한다.¹ 즉, 호환이 되지 않는다. 상기의 CNC 곡면 보간 시스템에서는 사용자가 직접 곡면식을 구성해서 입력해야 하므로 사용이 매우 어려운 단점이 있었으므로, 이 문제를 해결하기 위한 일환으로 보다 직관적이고 곡면식의 구성이 간편한 NURBS 곡면 보간 시스템이 제시된 바 있다.^{2,6} 그러나 NURBS 곡면 보간 시스템은 설계에 이용된 많은 곡면들이 서로 접합되고 이웃되어 있는 경우에도 개별적인 곡면 단위로 밖에 처리하지 못하는 문제점이 있다.

본 연구는 단위곡면들을 조합하여 보다 넓고 광범위한 곡면들을 효율적으로 보간, 절삭하는 방법을 모색하는 의도에서 추진되었으며, 더 나아가 CAD/CAM 소프트웨어의 NC 데이터 생성과정 즉, 후처리(post-processing) 과정에서 NURBS 곡면 보간 G 코드를 지원한다면 보다 큰 장점을 갖게 된다. 기존에는 다수의 평면, 곡면을 무수한 직선들로 분할하여 위치, 이송 정보들을 나타내었기 때문에 가공하려는 기준곡면의 가공정밀도를 높이려면 NC 데이터의 양을 늘려야 했다. 또는 곡면을 곡선 보간 NC 데이터를 이용하여 곡선 단위로 분할하여 가공하는 방법이 있으나 사용이 매우 제한적이다. 더 나아가 이 방법들은 보간기 내부의 종감속 효과로 인한 가공정밀도 저하, 대용량 메모리와 별도의 DNC 장치 등이 요구되는 단점이 있다. 따라서, CAD/CAM 에서 정의된 기준곡면을 그 자체로 해석하는 것이 곡면 가공에 대한 가공정밀도를 높이는 좋은 대안이 될 수 있다. 그리고 실제의 CAD/CAM 에서는 단위곡면의 크기가 작고, 또한 여러 곡면을 조합/조립하여 복잡하고 큰 제품을 설계하는 것이 일반적이므로, 기존의 곡면 보간 방식은 단위곡면의 효율적인 해석에 초점이 맞춰져 있었기 때문에 여러 곡면을 접합하여 어떤 제품을 설계하더라도 단위곡면으로 나뉘어져 처리될 수 밖에 없는 한계가 있다. 이렇게 나뉘어진 곡면들을 곡면 보간기를 이용하여 차례로 가공하게 되면 경계면에서의 공구경로가 중복되는 등의 비효율적인 공구경로의 운영, 각 곡면의 접합부에서 발생하는 공구간섭, 파절삭 등

의 문제들이 발생할 수 있다. 기존 연구들에서는 곡면 보간기를 이용하여 이러한 합성곡면들이 이루는 전체 가공영역을 통합, 재구성하는 알고리즘을 제시하지 못했다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 단위곡면의 효율적인 해석에 초점이 맞추어져 있었던 것에서 나아가 단위곡면들을 조합, 조립하여 정의된 합성곡면에 대한 효율적인 처리 방법을 제시한다. 이는 기존 CNC 선반에서의 복합 사이클 코드 지령처럼 합성곡면의 가공을 위한 복합 사이클 코드 지령 방식의 실시간 곡면 보간 방법이다. 이 방법은 사용자가 직접 G 코드를 입력하여 사용할 수 있고, 제시된 방법을 통하여 곡면 보간기는 입력된 다수의 곡면들을 재해석하여 실시간 방식의 공구경로 생성과 보간을 행한다. 더 나아가 CAM 소프트웨어의 NC 데이터 생성, 즉 후처리 과정과 연계하여 자동으로 곡면 보간 NC 데이터를 생성하기 위해서는 설계 곡면에서 곡면 구성 정보를 추출해야 하므로 제시된 방법은 CAD/CAM 시스템의 모델링 방식 중 곡면 단위의 설계 및 취급에 용이한 곡면 모델러(surface modeler)에서 보다 사용이 유리하고, 솔리드 모델러(solid modeler)에서는 가공면에 대한 곡면 데이터 출력 기능이 지원되는 시스템에서 유용하리라 판단된다. 단순 곡면을 반복하여 가공하는 방법과 비교해 합성곡면을 사용자 정의에 따라 재구성하여 가공하는 방법의 유용성을 제시된 곡면 보간 사이클 코드를 이용한 NC 데이터의 예와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 보간 결과를 통해 살펴보았다.

2. 곡면 정보의 재구성과 사이클 코드

2.1 NURBS 곡면의 접합

NURBS 곡면은 아래 식 (1)과 같이 표현된다.^{7,8}

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

여기서 i, j 는 0 에서부터 각각 n, m 까지 증가하는 인덱스(index)를 의미하고, P_{ij} 는 조정점, W_{ij} 는 가중치, $N_{i,k}$ 와 $N_{j,l}$ 는 비균일 유리 기저함수를 나타낸다. 기저함수는 아래 노트(knot)들을 이용하여

정의되는데, 이러한 노트들은 아래 식 (2), (3)과 같이 표현되고 이를 노트 벡터(knot vector)라 한다.

$$U = \{ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{p+1} \} \quad (2)$$

$$V = \{ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{q+1} \} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)은 각각 일반적인 NURBS 곡면을 구성하는 매개변수 u, v 방향에 대한 노트들의 집합이며, 0 에서 1 사이의 차례로 증가하는 값들로 구성된다. 이 때 p 와 q 는 차수(degree)를 나타내며, NURBS 의 오더(order)는 각각 $k(=p+1)$ 와 $l(=q+1)$ 로 표기한다. 노트 벡터 U, V 의 최종 인덱스는 $r(=n+k)$ 과 $s(=m+l)$ 이며, 각각 $n+k+1$ 개와 $m+l+1$ 개의 노트가 필요하다.

보통 CAD/CAM 에서 NURBS 곡면을 이용하여 제품을 디자인 할 경우에는 단일 곡면들을 이용하여 제품의 부분 부분을 정의하고, 정의된 곡면들을 조립하여 제품의 형상을 구성한다. 그 과정에서 곡면의 한계를 명확히 정의하고 사용하기 위하여 NURBS 곡면을 구성하는 노트들을 시작과 끝에서 각각 k 와 l 번씩 중복하여 사용한다. 즉, 식 (2)와 (3)에서와 같이 최초 0 번째의 노트부터 p 와 q 번째까지의 노트들을, 그리고 $n+1$ 과 $m+1$ 번째부터 말까지의 노트들을 보통 동일하게 구성한다. 그리고, 사용자가 의도적으로 곡면들의 경계를 서로 연결하여 접합시키면 곡면들은 기본적으로 위치 연속 관계를 갖는다. 예를 들어 아래 Fig. 1 과 같이 ${}^1S(u,v), {}^2S(u,v), {}^3S(u,v)$ 의 세 곡면이 연결되어 있는 경우, ${}^1S(u,v), {}^2S(u,v)$ 는 u 방향으로 연속이고 ${}^1S(u,v), {}^3S(u,v)$ 은 v 방향으로 연속인 관계를 갖는데, 이는 u 방향으로는 ${}^1S(1,v) = {}^2S(0,v)$, v 방향으로는 ${}^1S(u,1) = {}^3S(u,0)$ 의 관계를 만족하는 것을 의미한다. 이 경우 NURBS 곡면은 교선에서의 조정점, 곡선의 차수, 노트의

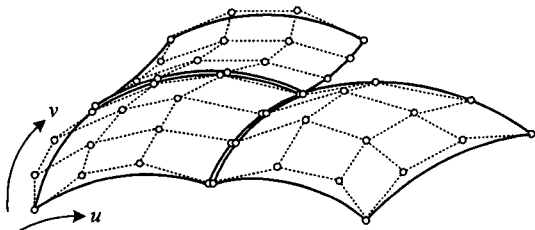


Fig. 1 Composite surface

배열이 동일하도록 설정된다. 본 연구에서는 이러한 NURBS 의 성질을 만족하는 합성곡면들을 대상으로 각 곡면들을 통합하여 효율적으로 처리하고자 기존 NURBS 곡면 보간기와 함께 새로운 곡면 처리 사이클 코드를 정의하여 이용하고자 한다. 곡면 처리 사이클 코드의 목적은 합성곡면을 사용자가 지정하는 방식으로 효율적으로 분해, 재구성하여 처리하는 데 있다. 이 방법은 여러 개의 곡면을 하나의 곡면으로 재구성한 후 기존 NURBS 곡면 보간기를 사용하여 처리하거나, 작고 많은 수의 단위곡면들로 구성된 실체면을 몇 개의 큰 곡면들로 재구성하여 처리하는 방식이다. 특히, 사용자가 의도하는 대로 기존의 단위곡면을 접합하는 것이 중요하다. 따라서 다음에서는 NURBS 합성곡면을 재구성하기 위하여 인접한 두 곡면을 접합하는 과정을 소개한다.

우선 인접한 두 곡면을 하나로 접합하는 과정에 앞서, 두 곡면의 경계가 접합되었는지 확인하는 과정이 요구된다. NURBS 를 구성하기 위해 사용자가 정의하는 요소들은 조정점 P_{ij} , 가중치 W_{ij} , 노트 벡터 U, V 이므로 곡면의 교선을 이루는 양 경계값에서 이들의 값이 동일하다면 해당 경계면은 완전히 접합되어 있다. 즉, Fig. 1 의 곡면과 같이 ${}^1S(1,v) = {}^2S(0,v)$ 혹은 ${}^1S(u,1) = {}^3S(u,0)$ 부분에서 두 곡면이 만난다. 그 다음 두 곡면이 갖고 있는 조정점 모두를 매개변수 u, v 방향의 순서대로 재배열하여 두 곡면을 통합한 새 곡면의 조정점으로 이용한다. 예를 들면 ${}^1S(1,v) = {}^2S(0,v)$ 의 경우, 합성곡면의 조정점 P_{ij}^{rw} 는 아래와 같이 나타낼 수 있다. P_{ij}^{rw} 는 가중치 W_{ij} 가 부여된 조정점(weighted control point)을 의미한다.

$$P_{i,j}^{rw} = \begin{cases} {}^1P_{i,j}^{rw} & i=0, \dots, n_1; \quad j=0, \dots, m \\ {}^2P_{i-n_1,j}^{rw} & i=n_1+1, \dots, n_1+n_2; \quad j=0, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

여기서, ${}^1P_{n,j}^{rw}$ 는 ${}^2P_{0,j}^{rw}$ 와 같기 때문에 식 (4)에서 제외되었다. 그리고 u 방향으로 인접한 곡면이 통합되는 경우 통합 후의 새로운 조정점에 대한 최종 인덱스 n' 은 통합되기 이전의 인덱스 n_1, n_2 를 이용하여 식 (5)와 같이 표현 가능하며, 새 노트의 최종 인덱스 r' 은 n' 을 이용하여 식 (6)으로 표현된다.

$$n' = n_1 + n_2 \quad (5)$$

$$r' = n' + p + 1 \quad (6)$$

접합 곡면을 표현하는 u 방향의 새 노트 벡터 U' 은 접합 전 곡면들의 경계점에서 노트들의 배열이 비균일 하도록 배열되어야 하므로 U' 의 요소 중 $u_{n+1} = u_{n+p}$ 를 만족시키도록 한다. 그리고 나머지 노트들에 대해서는 접합 전 곡면들의 노트 간격 비율을 유지시켜 기존 곡면의 형상을 유지하도록 한다. 이렇게 접합된 곡면 정보를 이루는 새로운 노트의 구성은 매개변수 u 방향에 대한 노트 벡터 U' 으로서 식 (7)로 나타낼 수 있다. 매개변수 v 방향에 대한 노트 벡터 V' 은 변형 없이 그대로 이용한다.

$$U' = \begin{cases} {}^1u_i & i = 0, \dots, n_1 + p \\ {}^2u_{i-n_1} + {}^1u_{n_1+k} - {}^2u_0 & i = n_1 + k, \dots, n_1 + n_2 + k \end{cases} \quad (7)$$

이와 같이 노트 값을 접합될 곡면 방향에 대하여 각각 중복되는 시작 매듭과 끝매듭 값이 같도록 접합될 곡면에 대한 노트값들에 전체적으로 ${}^1u_{n+k}$ 만큼의 수를 더하는데, 이렇게 각 노트들에 어떠한 값을 일정하게 더하거나 빼도 전체 곡면 식에는 아무런 변화가 없다. 이것은 식 (8)~(10)에서 보듯이 노트의 값보다도 각 노트간의 간격비가 더 중요하기 때문이다. 식 (8)~(10)은 매개변수 u 가 $u \in [u_i, u_{i+1})$ 라고 가정할 경우 2 차 NURBS 곡면을 구성하는 기저함수를 나타낸 것이다. 즉, 기저함수를 일반식으로 나타낸 식 (8)~(10)을 이용하면, 접합 전 곡면들의 기저함수들과 새로 배열된 노트 구간을 구성하는 기저함수를 비교하여 검증할 수 있다.

$$N_{i-2,2}(u) = \frac{u-u_{i-2}}{u_i-u_{i-2}} N_{i-2,1}(u) + \frac{u_{i+1}-u}{u_{i+1}-u_{i-1}} N_{i-1,1}(u) \quad (8)$$

$$N_{i-1,2}(u) = \frac{u-u_{i-1}}{u_{i+1}-u_{i-1}} N_{i-1,1}(u) + \frac{u_{i+2}-u}{u_{i+2}-u_i} N_{i,1}(u) \quad (9)$$

$$N_{i,2}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+2}-u_i} N_{i,1}(u) + \frac{u_{i+3}-u}{u_{i+3}-u_{i+1}} N_{i+1,1}(u) \quad (10)$$

한편, 연결 부위에서는 노트값의 중복 횟수가 오더 p 만큼 되어야 한다. 그렇지 않을 경우 합성 곡면은 식 (8)~(10)에서 예상할 수 있듯이 하나의 B 스플라인(spline) 식을 형성하지 못한다. Fig. 2 에는 이렇게 두 노트 벡터의 합성에 있어서 중복되는 값을 회색 음영 부분으로 표시하였고, 새 노트벡터 U' 을 구성하는 노트를 점선으로 표

시하였다. Fig. 3 은 4x4 의 조정점을 갖는 두 곡면을 매개변수 u 방향으로 접합한 새 곡면의 예를 나타낸다.

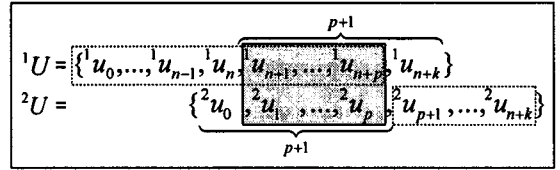


Fig. 2 Composite knots

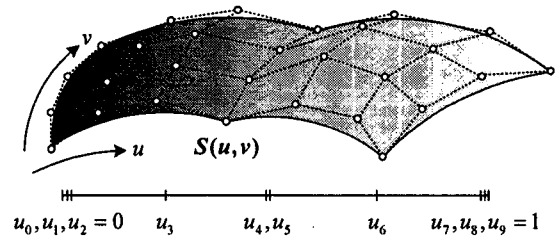


Fig. 3 Connected surface

마찬가지로 ${}^1S(u,1) = {}^3S(u,0)$ 부분에서 두 곡면이 만나는 경우, 즉 v 방향으로 인접한 곡면이 통합되는 경우에 대해 새 조정점의 최종 인덱스를 m' , 새 노트 벡터의 최종 인덱스를 s' 으로 정의하여 아래 식 (11)과 (12)로 나타낼 수 있다.

$$m' = m_1 + m_2 \quad (11)$$

$$s' = m' + q + 1 \quad (12)$$

그리고, 조정점 $P'_{i,j}$ 과 매개변수 v 방향의 노트 벡터는 각각 식 (13), (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P'_{i,j} = \begin{cases} {}^1P_{i,j} & i = 0, \dots, n; \quad j = 0, \dots, m_1 \\ {}^2P_{i,j-m_1} & i = 0, \dots, n; \quad j = m_1 + 1, \dots, m_1 + m_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$V' = \begin{cases} {}^1v_j & j = 0, \dots, m_1 + p \\ {}^2v_{j-m_1} + {}^1v_{m_1+k} - {}^2v_0 & j = m_1 + k, \dots, m_1 + m_2 + k \end{cases} \quad (14)$$

이렇게 노트 벡터의 수정 및 재구성으로 기존 곡면의 형상을 보존하며 하나로 통합할 수 있는 이유는 B 스플라인이 갖는 국지성(locality)에 기인한다.

2.2 NURBS 곡면 정보의 재구성

앞 절에서는 곡면의 식을 직접 수정하지 않고,

NURBS 곡면이 갖는 구성 요소들을 재구성하여 연결된 두 곡면의 형상을 유지하면서 하나의 곡면으로 통합할 수 있음을 설명하였다. 본 절에서는 두 곡면의 경계면이 접합되어 있거나, 혹은 곡면이 접합되어 있지는 않으나 사용자가 CAD 시스템의 도움 없이 NURBS 곡면 사이클 보간 지령을 이용하여 곡면 정보를 통합하고 한꺼번에 가공 처리하고자 하는 경우를 고려한다. 이를 위해 각 경계면에서 어떻게 NURBS 곡면의 구성 요소들을 재구성하여 사용할 수 있는지에 대해, 여러 가지 접합 사례들을 바탕으로 고찰해 보기로 한다.

NURBS 곡면 보간에서는 기본적으로 사용자가 G, K, W, X, Y, Z 등의 블록 지령을 기반으로 자유 곡면을 정의하기 때문에³ 곡면의 모양이 평면, 원통과 같은 모양을 이루지 않는 이상 곡면 모양을 정확히 예측하기 어렵다. 따라서, 사용자가 직접 곡면을 연결하여 정의하고자 한다면 두 곡면의 접선을 이루는 매개변수 곡선의 차수 p , 조정점 P_{ij} , 가중치 W_{ij} 와 노트 벡터 U, V 의 노트 배열을 동일하게 구성하여 양 곡면의 접합을 시도하려 할 것이다. 예를 들어 접합되는 곡면의 각 경계면에 대해 NURBS 곡면 속성을 일치시켜서 Fig. 3 과 같이 ${}^1S(1,v) = {}^2S(0,v)$ 의 조건으로 u 방향의 곡면 접합을 시도할 수 있다. 이러한 경우 사용자가 $(n_1+1) \times (m+1)$ 개의 조정점들로 이루어진 NURBS 곡면에 $(n_2+1) \times (m+1)$ 개의 조정점들로 이루어진 NURBS 곡면을 접합하고자, 해당 G 코드로 지령된 ${}^1P_{n_1,j}^w = {}^2P_{n_2,j}^w$ 의 조건과 접합점과 관계된 노트들의 NC 블록을 일치시켜 위치 연속의 관계를 맺도록 입력할 것이다. $n_1 = n_2$ 의 경우에는 앞 절에서 설명한 곡면의 접합 과정을 따르지만, Fig. 4 와 같이 NC 데이터를 구성하는 경우를 고려하지 않을 수 없다. Fig. 4 는 두 곡면이 접합되어 있으면서도 접합곡면의 접선을 기준으로 두 곡면의 매개변수 방향이 서로 반대인 경우이다. 즉, u, v 방향의 조정점들과 노트 벡터가 역으로 배열되어 접합되는 경우이다. 이러한 경우 두 곡면의 접합 여부를 판별한 뒤, 두 NURBS 곡면의 구성 요소들을 각각 비교하여 한 곡면의 매개변수 방향에 맞추어 입력된 데이터를 재배열한다. 이렇게 접합될 곡면 구성 정보의 순서를 재배열하는 사전 단계를 거치면 식 (4)~(7)을 이용할 수 있다.

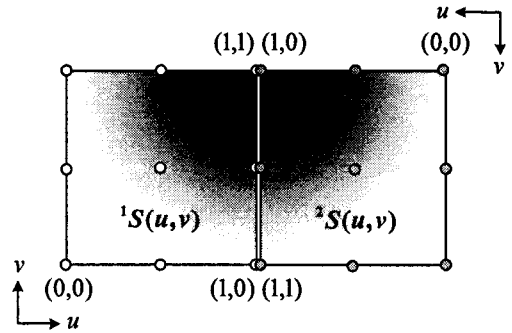


Fig. 4 Connected surface in reverse

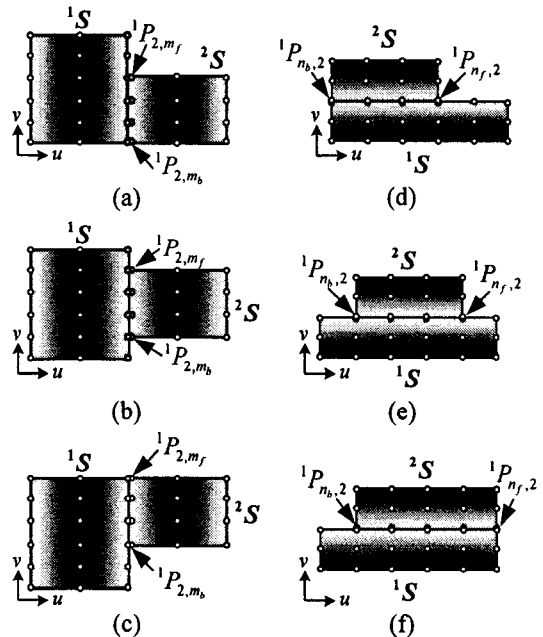


Fig. 5 Partially connected surfaces in the parametric u and v directions

한편, Fig. 5 와 같이 사용자가 NC 블록을 직접 입력해서 곡면의 접합을 시도하는 또 다른 방법을 생각해 볼 수 있다. 즉, 곡면의 경계 속성 일부를 일치시키고 접합을 시도하는 경우를 고려해 볼 수 있다. 그러나 접합되는 두 곡면의 접선을 구성하는 조정점들이 직선적으로 배열되고 접선의 양 끝점을 이루는 노트들이 단혀 있지 않는 한, 각 NURBS 구성 요소들을 일치시키더라도 두 곡면이 만날 수 없다. 이렇게 두 곡면이 만나지 못하는 경우라면 접합될 곡면의 NURBS 식을 사용자가

계산한 뒤, 곡면 속성을 직접 구성해야 두 곡면을 접합할 수 있을 것이다. 그러나, 사용자가 접합될 곡면의 식을 직접 재구성하는 일은 매우 어렵기 때문에 두 곡면이 평면적으로 접하거나 혹은 그렇지 않더라도 NURBS 속성을 자동 조정하여 곡면을 강제 접합하는 방법을 구상하였다. 이 방법에서는 앞 절과 마찬가지로 조정점과 노트의 배열을 수정하여 접합면을 기준으로 기준면을 분할, 재통합하여 몇 개의 분할곡면들로 재구성한다. 다만, 곡면 보간 사이클 코드를 입력할 때 사용자가 곡면 분할 방식을 선택하는 NC 블럭을 함께 입력하여 곡면의 통합 방향과 방법을 정의하여 사용하도록 하였다. 분할 곡면 Fig. 5 의 (a), (b), (c)는 매개변수 u 방향으로 부분 접합된 경우를 나타낸다. 여기에서 편의상, 곡면의 일부가 접합되는 피접합 곡면을 ‘기본곡면’으로 정의하고, 이 기본곡면이 부분적으로 접합되는 곡면을 ‘부분곡면’으로 정의한다. Fig. 5 에서는 기본곡면 1S 이 부분곡면 2S 에 접합되었으며 조정점이 일치하는 위치에 따라 최대 3 개의 곡면으로 분할되도록 하였다. 이에 대한 접합 사례들을 각각 Fig. 6 의 (a), (b),

(c)로 표현하였다. 이 때는 사용자가 부분곡면 2S 를 중심으로 곡면을 재구성하고자 하기 때문에 조정점 $^1P_{i,j}^w, ^2P_{i,j}^w$ 중에서 $(n_1+n_2+1) \times (m_2+1)$ 개의 조정점과 노트 벡터 $^1U, ^2U$ 를 재구성하여 통합 곡면 $^1S'$ 을 구성한다. 그러면, $^1S'$ 을 제외한 나머지 곡면 영역을 구성해야 하는데, Fig. 6 에서 볼 수 있는 바와 같이 통합 곡면의 구성에 제외된 나머지 곡면 영역을 이루는 조정점들과 노트 벡터를 수정하여 이루는 조정점들을 합하여 새로운 곡면 $^2S'$ 혹은 $^2S'$ 과 $^3S'$ 를 구성한다. 이 때 접합되는 통합 곡면 $^1S'$ 과 위치 연속을 관계를 유지하도록 매개변수 v 방향의 노트 벡터를 수정하여 $^1S'$ 과 접하도록 하는데, 접선에 이르는 매개변수 v 방향의 노트 벡터 구성을 v 방향의 오더 l 번 만큼 반복한다. 즉, 닫힌 곡면을 구성하여 각 곡면을 연결한다.

이렇게 Fig. 6 의 (a), (b), (c)와 같이 매개변수 u 방향으로 NURBS 곡면을 부분적으로 접합시키는 사례에 대해서 조정점 $^1P_{i,j}^w, ^2P_{i,j}^w$ 와 노트 벡터 $^1U, ^2U$ 를 이용하여 식 (15)~(20)으로 새 분할 곡면 $^1S', ^2S', ^3S'$ 을 각각 구성할 수 있다.

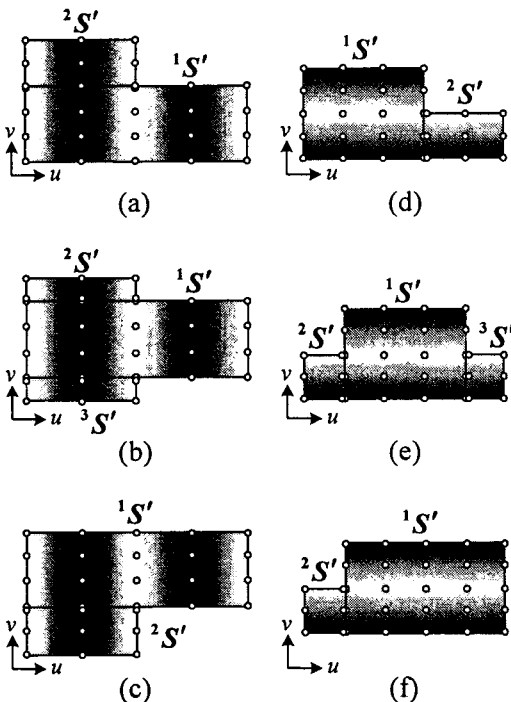


Fig. 6 Reorganized surfaces

$$^1P_{i,j}^w = \begin{cases} ^1P_{i,j}^w & i=0, \dots, n_1; \quad j=m_b, \dots, m_f \\ ^2P_{i-n_1,j}^w & i=n_1+1, \dots, n_1+n_2; \quad j=0, \dots, m \end{cases} \quad (15)$$

$$^2P_{i,j}^w = ^1P_{i,j}^w \quad i=0, \dots, n_1; \quad j=m_f, \dots, m \quad (16)$$

$$^3P_{i,j}^w = ^1P_{i,j}^w \quad i=0, \dots, n_1; \quad j=0, \dots, m_b \quad (17)$$

$$^1V' = ^2V \quad (18)$$

$$^2V' = \begin{cases} ^1v_{m_f+q} & j=m_f+q, \dots, m_f+2q \\ ^1v_j - ^1v_{m_f+q} & j=m_f+2q+1, \dots, m_1 \end{cases} \quad (19)$$

$$^3V' = \begin{cases} ^1v_j & j=0, \dots, m_b \\ ^1v_{m_b+1} & j=m_b+1, \dots, m_b+l \end{cases} \quad (20)$$

여기서, Fig. 5 의 (a), (b), (c)와 같이 곡면이 분할, 재구성될 곡면 $^1S'$ 에서 기존의 두 곡면의 조정점 $^1P_{i,j}^w, ^2P_{i,j}^w$ 이 서로 일치하는 조정점들에 대하여 각 조정점이 갖는 열의 인덱스 j 의 최초 인덱스 값을 m_b , 최종 인덱스 값을 m_f 라 정의한다. 이 중, $^1S'$ 의 노트 벡터 U' 은 식 (7)을 이용하고, 노트 벡터 V' 은 식 (18)을 이용하여 접합 전 곡면 2S 를 중심으로 통합 곡면 $^1S'$ 을 형성한다. 나머지 $^2S', ^3S'$ 에 대한 노트 벡터 $^2U', ^3U'$ 은 기존 1S 의 노트 벡터 1U 를 그대로 이용하고, 매개변수

v 방향의 새 노트 벡터 ${}^2V'$, ${}^3V'$ 은 각각 식 (19) 와 (20)을 이용하여 구성한다. 그 결과, Fig. 6 과 같이 분할된 곡면 ${}^2S'$, ${}^3S'$ 은 통합된 곡면 ${}^1S'$ 과 위치 연속 관계를 가지며 접합된다. 마찬가지로 방법으 Fig. 5 의 (d), (e), (f)의 경우와 같이 v 방향으로 부분곡면이 접합된 경우, 식 (21)~(26)과 같이 조정점 $P_{i,j}^w$ 와 노트 벡터 U' 을 구성할 수 있다.

$${}^1P_{i,j}^w = \begin{cases} {}^1P_{i,j}^w & i = n_b, \dots, n_f; \quad j = 0, \dots, m_1 \\ {}^2P_{i,j-m_1}^w & i = 0, \dots, n; \quad j = m_1 + 1, \dots, m_1 + m_2 \end{cases} \quad (21)$$

$${}^2P_{i,j}^w = {}^1P_{i,j}^w \quad i = n_f, \dots, n; \quad j = 0, \dots, m_1 \quad (22)$$

$${}^3P_{i,j}^w = {}^1P_{i,j}^w \quad i = 0, \dots, n_b; \quad j = 0, \dots, m_1 \quad (23)$$

$${}^1U' = {}^2U \quad (24)$$

$${}^2U' = \begin{cases} {}^1u_{n_f+p} & i = n_f + p, \dots, n_f + 2p \\ {}^1u_i - {}^1u_{n_f+p} & i = n_f + 2p + 1, \dots, n_1 \end{cases} \quad (25)$$

$${}^3U' = \begin{cases} {}^1u_i & i = 0, \dots, n_b \\ {}^1u_{n_b+1} & i = n_b + 1, \dots, n_b + k \end{cases} \quad (26)$$

만약, 1S 과 2S 이 접합된 곡면의 경계가 뒤바뀌어 있다면, 예를 들어 Fig. 5 의 (d), (e), (f)와 같이 ${}^1S(u,1)$ 의 경계에 2S 이 접합되지 않고, ${}^1S(u,0)$ 에 2S 이 접합되는 경우라면 1S 과 2S 의 기본곡면 및 부분곡면의 관계를 역으로 인식하여 처리 가

능하다.

정리하면, 어떠한 NURBS 곡면에 부분적으로 NURBS 곡면을 접합하려 할 경우, 접합되는 곡면의 조정점과 가중치들을 기본곡면과 일치시켜 부분곡면을 중심으로 기본곡면을 재구성한다는 것이다. 단, 기본곡면은 몇 개로 분할되는 대신, 접합되는 부분곡면의 양끝은 노트의 구성 요소들이 k 또는 l 번 만큼 반복되어 닫혀 있는 상태(clamp)를 조건으로 한다. 이것은 접합시킬 부분곡면을 중심으로 곡면이 재구성되어 접합되고 나면, 접합된 곡면을 제외한 나머지 영역을 재구성하여 접합된 곡면과 위치 연속 관계를 쉽게 맺도록 하기 위함이다. 즉, 곡면 보간 사이클 코드는 사용자가 정의한 단위 NURBS 곡면을 의도하는 대로 통합하여 처리하는 것이 목적이므로 접선에서의 조정점의 개수가 동일하면 통합하여 처리하고, 다른 경우에는 접합되는 곡면의 변형을 감수하더라도 위치점 접합방식을 만족하도록 각 곡면을 접합 처리할 수 있도록 유도하는 것이다. 이외에 각 곡면의 접합에 대하여 조정점을 중복하여 연결하는 방법 등도 있겠으나 이것은 통합되기 이전의 곡면의 모양들과 비교하여 곡면의 변형이 심하기 때문에 고려하지 않는다.

2.3 NURBS 곡면 보간 사이클 코드 지령

새로운 사이클 코드의 지령은 새로운 G 코드

Table 1 Proposed NURBS surface cycle command

NURBS surface cycle command	Description
G106.1	G106.1 : a new repetitive cycle command for the NURBS surface interpolator
G106.2	G106.2 : a new multiple cycle command for NURBS surfaces I : Tool-path planning method (I1 = iso-parametric, I2 = iso-scallop) E1 : Preferentially create a biggest surface E2 : Set priority to the first NURBS surface block E3 : Combine surfaces in the parametric u -direction E4 : Combine surfaces in the parametric v -direction P : First block number (N blocks) Q : Last block number (N blocks) W : Safety height (0 = return to initial position) D : Tool diameter M : Side step distance S : Allowable scallop height F : Feedrate

의 정의에서부터 시작한다. 앞서 소개한 NURBS의 속성값을 변경시키는 것으로써 곡면의 통합, 분리에 대한 내용을 언급했으나 실제 CNC에 입력해서 사용하기 위해서는 기존 코드 체계와 호환을 이루며 곡면의 통합을 의미하는 별도의 지령, 즉 사이클 코드 지령을 마련해야 한다. 따라서, Table 1에 새로운 곡면 보간 사이클 코드에 대한 두 가지 지령 형식을 정의하였다. 즉, R 블록과 고정 사이클 지령 그리고 이송 지령을 조합하여 단위곡면의 반복 사이클 가공이 가능한 G106.1 코드와 P 블록과 Q 블록을 동시 지령함으로써 지정된 곡면들을 하나 혹은 여러 개의 곡면으로 재구성하는 G106.2 코드이다.

G106.1 코드는 기존 머시닝센터의 고정 사이

클 코드들과 유사하게 단위곡면을 반복 가공하는 것이 가능하도록 처리한 고정 사이클 코드이다. 알고리즘과 정의 방법이 매우 간단하여 앞 절에서 비증을 두어 언급하지 않았다. 이것은 사용자가 입력한 단위 곡면의 공구경로를 사이클 취소지령 내에서 사용자가 입력한 매 이송지령마다 반복 생성해 내는 것으로써 단위곡면을 여러 개 다중 생성하여 처리할 때 유용하다. G106.2 코드는 기존 터닝센터의 복합 사이클 코드와 유사한 형태로 지정 문번호의 NC 코드들을 통합처리 가능하도록 하였다. 이외에도 각 곡면 보간 사이클 지령과 함께 입력되는 파라미터들을 Table 1에 함께 나타내었다. Table 1의 파라미터 중 I블록은 G106.2로 재구성된 곡면에 대한 공구경로 계획법을 결정한다.

Table 2 Example of the proposed NURBS surface cycle command

NC code list	Description
N01 G05 P10000; N02 G90 G00 Z0.;	N01 : Beginning of high precision contouring mode N02 : Rapid traverse to start position
N03 G106.2 I1 E1 P10 Q20 W15. D5. M0.01 S0.001 F500.;	N03 : Surface interpolation cycle command using parameters below
N10 G06.23 U6 V6 D5. L0. F500. S0.001; X0. Y0. Z0. W1.;	- tool-path planning by the iso-parametric method
X10. Y0. Z0. W1.;	- unifying the block numbers N10 to N20
.	- rapid traverse vertically to the safety height of Z40 mm at each surface
.	- use a 5 mm diameter tool
.	- set the side step distance to be 0.01 mm
.	- set the allowable scallop height to be 0.001 mm
.	- feedrate of 0.5 m/min
N20 G06.23 U6 V6 D5. L0. F500. S0.001; X50. Y50. Z0. W1.;	N10 : G06.23 NURBS surface interpolation for finish cut
X60. Y0. Z0. W1.;	N20 : G06.23 NURBS surface interpolation for finish cut
.	
.	
.	
N30 G106.1 W40.;	N30 : Surface interpolation cycle command using below NURBS surface interpolation block
N40 G06.23 U6 V6 D3. L0. F500. S0.001; X50. Y50. Z0. W1.;	(rapid traverse vertically to the safety height of Z40 mm at each surface)
X60. Y0. Z0. W1.;	N40 : G06.23 NURBS surface interpolation for finish cut
.	
.	
.	
N50 G91 X10.;	N50 : Rapid traverse incrementally to X10 mm
N60 G80 M05;	N60 : Cancellation of fixed NURBS surface cycle command and spindle stop
N70 G00 Z40.;	N70 : Rapid traverse to Z40 mm
N80 G05 P0;	N80 : Finish of high precision contouring mode

즉, I1 일 경우 등매개변수법(iso-parametric method)을 이용하여 보간하고, I2 일 경우 등스칼롭법(iso-scallop method)을 이용하여 보간할 수 있도록 정의한다. 이외에도 이송속도 F, 공구직경 D, 복귀 안전높이 혹은 초기점 복귀 선택 W, 공구경로 간격 지령 M, 스칼롭 구축도 S 등을 나열하여 가공 조건을 명시한다. 마지막으로 곡면 통합 방식 E 블록을 정의하는데, 이는 사용자가 통합할 기본곡면을 지정하는 것이다. 다시 말해 사용자가 다수의 곡면을 어떠한 기준으로 병합하거나 분리하느냐를 NC 블록으로 지령하는 것이다. E 블록의 지령값이 1 이면 한쪽 매개변수 방향으로 곡면들을 통합한 뒤, 통합된 곡면들끼리 또다른 매개변수 방향으로 통합을 시도하여 최대의 접합곡면을 얻도록 한다. 지령값이 2 이면 사용자가 지정한 첫 보간 곡면을 기점으로 통합하고, 지령값이 3 이면 매개변수 u 방향으로 곡면을 우선 통합하고, 지령값이 4 이면 매개변수 v 방향으로 우선 통합한다. 이 때 곡면들이 통합, 분리되는 과정에서 M, S, W 등 기존의 NC 지령 블록들과 많은 부분 중복되거나 해당 G 코드가 지령될 때에만 유효한 동시지령 NC 블록으로 처리한다. 본 논문에서는 고정도 운곽제어 모드(G05) 사용 중에도 새로운 G106.1 곡면 보간 사이클 코드 사용에 한하여 증분지령과 G80 사이클 취소지령이 유효하도록 가정하였다. FANUC 의 경우 NURBS 보간 모드 중에는 NURBS 보간 이외의 보조기능 지령 등은 사용하지 못하도록 제한하고 있다.

Table 2 에 곡면 보간 사이클 코드를 이용하여 곡면을 정의한 예를 간략하게 나타내었다. Table 2 에서의 G06.23 코드는 정상 과정을 위해 정의된 NURBS 곡면 보간 G 코드이다.³

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3 차원 컴퓨터 그래픽스를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제시하는 사이클 코드 지령에 기초한 가공 방법의 유용성을 입증하고자 하였다. Fig. 7 은 CAD 에서 정의한 키보드의 키를 모델링한 것이다. 동일한 모양의 키 여러 개를 연속하여 가공하고자 하는 경우 제시된 곡면 보간 사이클 코드 G106.1 을 이용하면 동일한 모양의 곡면을 연속, 복사하여 가공하는 것이 용이하다. Fig. 8 은 이렇게 G106.1 을 이용하여 6×6

개의 조정점을 갖는 하나의 NURBS 곡면을 6 개로 복사한 공구경로 생성의 예를 나타낸다. 그림에서 각 단위곡면 가공마다 사용자가 입력한 안전

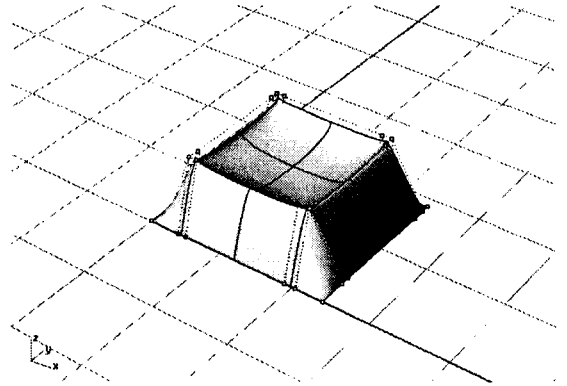


Fig. 7 Unit reference surface

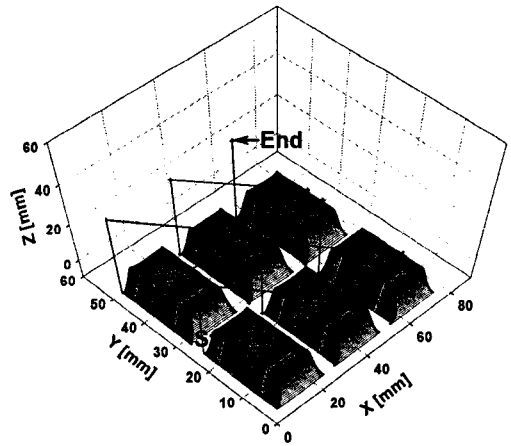


Fig. 8 Tool-path generation using G106.1 code

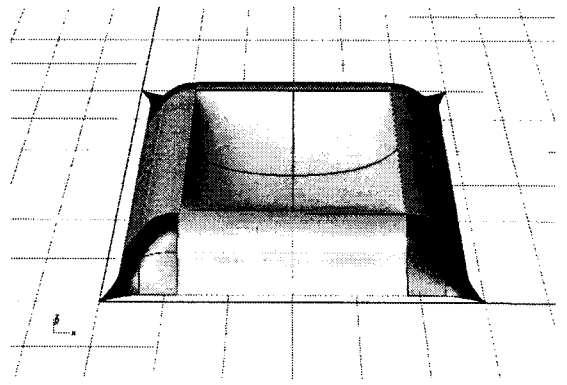


Fig. 9 Composite surface of nine NURBS surfaces

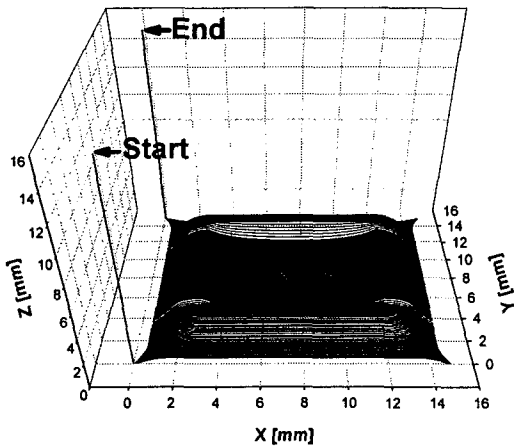


Fig. 10 Tool-path generation using G106.2 code

높이만큼 이송하여 공구경로를 연속시키는 것을 알 수 있다. 이 때, G106.1 과 함께 동시 지령된 안전높이는 40 mm 이다. 따라서, G106.1 코드를 이용하면 모델링된 단위곡면에 대한 NC 코드를 복사하여 사용할 필요가 없어 중복되는 NC 코드를 줄일 수 있다.

다음으로 단위곡면들을 접합한 합성곡면 가공의 예제를 Fig. 9 와 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 9 는 9 개의 단순한 NURBS 곡면을 위치 접합시킨 탁상시계 커버 모양을 나타내며, Fig. 10 은 Fig. 9 의 9 개의 단위곡면들을 하나로 통합시킨 후 가공 공구경로를 생성한 예이다. 여기에서는 G106.2 의 입력과 함께 동시지령 E1 을 입력하여 합성곡면 생성시 최대 곡면의 크기를 갖도록 하였다. Fig. 10 의 결과에서 알 수 있듯이 9 개로 조각난 NURBS 곡면들을 하나로 통합하여 공구경로를 생성할 수 있기 때문에 단위곡면 보간 G 코드만을 이용하여 보간할 때와 비교해 곡면의 공구경로가 겹치는 등의 비효율적인 공구 운용이 나타나지 않는 장점이 있다.

4. 결론

기존의 곡면 보간 시스템이 단위곡면을 효과적으로 해석하는 데에만 국한되어 있던 것에 반하여, 본 논문에서는 단위곡면을 반복 가공할 수 있도록 구성하거나 각 단위곡면을 접합하고 재구성하여 합성곡면을 생성한 뒤 이를 통합 처리하는 실제적인 활용 방법을 제시하였다. 제시된 방

법은 기존 머시닝센터의 고정 사이클 코드들과 같이 지령된 NURBS 곡면 보간 코드를 반복하여 가공할 수 있도록 한 점과 기존 터닝센터의 복합 사이클 코드들과 같이 지정된 문번호 내의 NURBS 곡면 보간 G 코드들을 통합, 재구성하여 처리할 수 있도록 한 점에서 기존 단위곡면 보간 방식의 처리 방법과 차별성이 있다. NC 코드 예제와 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 통합 공구경로의 생성을 통해서 제시된 방법의 유용성을 확인하였다. 그 결과, 기존 NURBS 곡면 보간 코드와 더불어 본 논문에서 제시하는 NURBS 곡면 보간 사이클 코드를 통해 NURBS 단위곡면의 반복 가공과 NURBS 합성곡면의 처리 및 가공이 가능하기 때문에 3 차원 곡면가공이 보다 자유로워질 수 있을 것으로 예상된다. 향후 매우 복잡하게 접합된 곡면들도 전체 통합 보간 처리가 가능하도록 보다 일반화된 규칙을 고안하고 곡면 접합의 가능 여부 검사 및 곡면 접합으로 인한 오차 추정 기능, 트리밍 (trimming) 기능, 과절삭 검사 기능 등과 같이 곡면가공에 필수적인 또다른 요소들을 추가, 보완하면 NURBS 곡면 보간기를 이용한 가공이 보다 자유롭고 강력해질 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 2005 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

1. Suh, S., "STEP-NC Technology Realizing Information-based Intelligent Manufacturing System," Journal of KSPE, Vol. 19, No. 2, pp. 26-32, 2002.
2. Koo, T. and Jee, S., "Intelligent NURBS Surface Interpolation System with Embedded Online Tool-Path Planning," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 9, pp. 156-163, 2006.
3. Koo, T. and Jee, S., "Integrated NURBS Surface Interpolator Considering Both Rough and Finish Cuts," Journal of KSME, A, Vol. 27, No. 11, pp. 1958-1966, 2003.
4. Koo, T. and Jee, S., "Real-Time Tool-Path Generation for 3-Axis CNC Machining of NURBS

- Surfaces,” Journal of KSME, A, Vol. 27, No. 8, pp. 1418-1425, 2003.
5. Jee, S. and Koo, T., “NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling,” Journal of KSME, A, Vol. 26, No. 9, pp. 1888-1896, 2002.
 6. 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.
 7. Piegl, L. and Tiller, W., “The NURBS Book,” 2nd Edition, Springer, pp. 117-139, 1995.
 8. Piegl, L., “On NURBS: A Survey,” IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 11, Issue 1, pp. 55-71, 1991.