

황삭 및 정삭을 고려한 통합형 NURBS 곡면 인터폴레이터

구 태 훈* · 지 성 철†

(2003년 6월 3일 접수, 2003년 9월 30일 심사완료)

Integrated NURBS Surface Interpolator Considering Both Rough and Finish Cuts

Taehoon Koo and Sungchul Jee

Key Words : CNC(컴퓨터 수치제어), Surface Interpolator(곡면 보간기), NURBS(비균일 유리 B 스플라인), G-code(G 코드), Feedrate(이송속도), Material Removal Rate(비절삭체적)

Abstract

Three-axis CNC surface machining entails a series of processes including rough cutting, intermediate cutting and finish cutting for a reference surface defined in CAD/CAM. This study is targeting development of an integrated NURBS surface interpolator that can incorporate rough, intermediate and finish cutting processes. In each process, volume to be removed and cutting condition are different according to the shape of a part to be machined and the reference surface. Accordingly, the proposed NURBS surface interpolator controls motion in real-time optimized for the machining conditions of each process. In this paper, a newly defined set of G-codes is proposed such that NURBS surface machining through CNC is feasible with minimal information on the surface composition. To verify the usefulness of the proposed interpolator, through computer simulations on NURBS surface machining, total machining time, size of required NC data and cutting force variations are compared with the existing method.

1. 서론

CNC 공작기계를 이용한 금형 등의 가공은 단순한 2 축 가공에서 시작하여 복잡한 3 차원 윤곽 가공으로 점점 그 형태가 복잡해지고 요구되는 윤곽정밀도 역시 높아져가고 있다. 3 축 윤곽가공을 위한 CAD/CAM 패키지에서는 설계된 곡면을 공구경로의 연속으로 재구성하여 CNC 시스템에 맞는 G 코드로 변환한다. 이렇게 표현된 NC 데이터는 보통 직선, 원호와 같은 공작기계의 단순 운동을 기술하고 있다. 그러나 CAD/CAM 에서 정의된 제품의 기하학적 형상은 직선, 원호의 형태를 넘어서 3 차원의 곡선과 곡면 등 다양한 기하학적 형상을 이용한다. 현재는 이것을 직선, 원호와 같

은 단순 움직임의 조합으로서 표현하고 있기 때문에 3 차원 윤곽가공을 위해서는 무수한 직선이송 G 코드들로 나열하여 가공하게 된다. 그 결과로서 설계된 제품의 형상이 복잡할수록 이를 가공하기 위한 G 코드, 즉 NC 데이터는 엄청나게 비대해지며 NC 데이터를 분할하여 저장하지 않는 이상 어디서부터가 황삭가공이며 어디서부터가 정삭가공인지 구분하기 힘들다. 그러므로 NC 데이터를 작업자가 현장에서 수정하는 것은 거의 불가능하며 더욱이 이것을 CNC 메모리에 한꺼번에 올려 처리하지 못하고 여러 번에 나누어 처리하는 것이 일반적이다. 이에 따라 별도의 데이터 저장장치와 전송장치(DNC) 같은 기기들이 요구된다. 또한, 분할된 직선이나 원호의 조각(segment)으로 구성된 G 코드는 각 조각마다 CNC의 제어 루프에 의해 가/감속 효과를 나타내게 되어, CNC는 짧은 직선 또는 원호 조각의 가공시에 요구되는 이송속도에 다다를 수 없게 되고 그 결과 가공면 마감의 악화를 유발할 수 있다.⁽¹⁾

* 단국대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 단국대학교 기계공학과
E-mail : scjee@dku.edu
TEL : (02)709-2911 FAX : (02)709-2569

따라서 본 연구에서는 위의 문제점을 보완하고 윤곽정밀도를 높일 수 있는 새로운 곡면처리 기법을 제시하고자 한다. 이것은 황삭(rough cut), 중삭(intermediate cut), 정삭(finish cut)의 3 단계로 나뉘는 전체적인 곡면가공 과정을 고려하고 각 과정에 알맞은 곡면 G 코드들을 새롭게 정의하여 포괄적인 곡면가공을 몇 개의 G 코드로 처리하는 방식이다. 그리고 각 절삭과정은 가공될 소재의 형상과 최종 절삭면에 따라 피삭량과 절삭조건이 다른데, 이러한 조정이 온라인(on-line) 상에서 모두 CNC 보간기 내부에서 실시간으로 이루어지는 특징이 있다. 그 결과 정밀한 이송속도 조정이 가능하고 직선 보간시에 나타나는 연속된 직선 조각들 사이의 가/감속 효과를 줄일 수 있어 보다 부드러운 곡면 표현이 가능하다. 직선 보간기를 이용하여 이와 비슷한 효과를 내기 위해서는 보다 빠른 마이크로프로세서와, 용량이 더 큰 데이터 서버, 그리고 더 빠른 데이터 통신을 위한 네트워크 카드 등이 필수적이어서 하드웨어 의존성이 높아진다. 이에 비해 제시된 곡면 보간기는 고속의 마이크로프로세서만으로 구현 가능하기 때문에 상대적으로 하드웨어 의존성이 작다.

본 논문에서 제시된 NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면 보간기는 곡면을 구성하는데 필요한 조정점(control point), 노트(knot), 가중치(weight)들을 G 코드로 직접 입력하고 이들을 이용하여 다양한 형상의 곡면을 자유롭게 표현할 수 있음은 물론, 조정점 사이의 국부 조정 능력을 갖고 있기 때문에 곡면의 형상을 쉽게 수정할 수 있다.⁽²⁾ 이에 반하여 기존에 연구되었던 곡면 보간기들은 단순히 매개변수 다항식의 계수를 G 코드로 직접 입력해 주는 방식을 이용했었기 때문에 곡면의 모양을 예측하기 힘들었고, 국부적인 조정능력을 갖추지 못했으며, 곡면의 변형과 수정이 매우 힘들었다. 제시된 곡면 보간기의 유용성을 검증하기 위해 C++ 언어로 프로그램을 작성하여 NURBS 곡면가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 제시된 방법의 성능을 총 가공시간, 요구되는 NC 데이터의 크기, 이송속도 및 절삭력 제어 정도의 관점에서 기존의 방법과 비교 분석하였다.

2. 통합형 NURBS 곡면 인터플레이터

2.1 NURBS 곡면가공을 위한 공구경로 계획

NURBS는 노트의 비균일한 성질과 각 조정점에 가중치를 적용한 B 스플라인 함수이며, NURBS 곡면은 식 (1)로 나타낼 수 있다.⁽²⁾

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

여기서 N 은 블렌딩(blending) 함수를, W 는 가중치를, P 는 조정점을 각각 나타낸다. 3 차원 곡면 가공에서 정의된 곡면을 가공하기 위하여 연속적인 공구경로들을 생성하고 나열해내는 공구경로 계획(tool-path planning)은 대개 매개변수 식으로 구성된 곡면에 대해 매개변수 (u,v) 의 값을 변화시켜 공구의 위치를 조정하는 방식을 취한다. 공구경로 계획법에는 공구경로 간격을 등간격으로 조절하는 방법 외에 등평면(iso-planar), 등매개변수(iso-parametric), 등스칼럼(iso-scallop) 방법이 있다.⁽³⁻⁶⁾ 본 논문에서 제시하는 보간기들은 모두 등스칼럼 방법을 취한다. 등스칼럼 방법은 현재의 공구경로에서 매 보간 때마다 규정 스칼럼 높이를 만족시키는 공구경로 간격방향의 매개변수 증분량을 구하고 이것을 바탕으로 다음 공구경로를 생성할 때, 추가로 제 3의 매개변수를 도입하여 매개변수쌍 (u,v) 점들에 대한 보간식 혹은 근사화된 식을 만들어 이용하는 방법이다.^(5,6) 기존의 등스칼럼 방법은 저장된 매개변수 값들을 바탕으로 다음 공구경로 전체를 새로운 매개변수에 대한 하나의 보간식 혹은 근사식으로써 구성한다. 따라서 곡면의 형상이 복잡할 경우 보간 혹은 근사 오차가 발생할 수 있어 공구경로 계획이 정확히 이루어지지 못할 수 있다.

이러한 단점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 공구경로 전체가 아니라 ‘국부적인’ 보간을 바탕으로 공구경로를 생성하는 방식을 도입한다. 한편 공구경로 계획에서 다음 공구경로는 현재 공구경로 방향의 역방향으로 되돌아오므로, 다음 공구경로의 생성시 현재의 공구경로를 따라 다음 공구경로에 대해 저장된 데이터를 역으로 꺼내어 쓰게 된다(LIFO: Last Input First Out). 본 논문에서는 이러한 메모리 구조에 적합한 알고리즘인 스택 기법을 적용하였다. 우선, 규정 스칼럼 높이를 만족시키는 다음 공구경로 간격 방향으로의 매개변수 증분량을 매 샘플링 단계마다 계산하여 스택(stack)에 저장하고 저장된 값의 일부를 다음 공구경로에서 조금씩 꺼내어 사용하는 방식이다. 즉, 이전 공구경로로부터 구해진 매개변수 세 쌍 (u_0, v_0) , (u_1, v_1) , (u_2, v_2) 를 스택으로부터 꺼내어 이 세 쌍의 매개변수로 형성되는 공구경로의 일부에 대한 보간식을 구성하고 이 구간에서 규정 이송속도를 만족시키는 보간점을 찾는 방법이다. 이때 라그랑지(Lagrange) 보간식을 사용하였으며, 매개변수 세

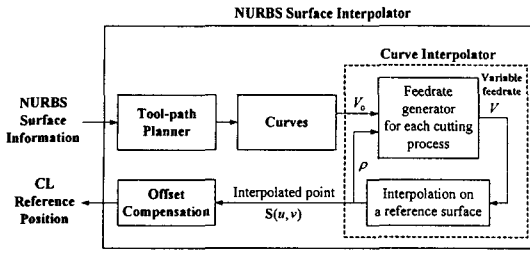


Fig. 1 Overview of the proposed interpolator

쌍이 이루는 보간 영역을 ‘가변 윈도우(variable window)’라 칭한다. 이송속도를 만족시키는 다음 보간점은 반드시 가변 윈도우 내에 존재해야만 하며, 그렇지 못할 경우 필요한 만큼의 매개변수쌍을 스택에서 꺼내어 가변 윈도우를 재구성한다.

한편, 매개변수 식을 이용하는 곡선 혹은 곡면에서의 실시간 보간 알고리즘은 공구의 현재 위치에서 한 샘플주기 동안 이송해야 할 거리를 만족시키는 정확한 매개변수 값을 계산하는 것이다. 본 논문에서는 1 차 비례식과 이분법(bisection method)을 이용하여 요구되는 이송속도를 만족시키는 매개변수 값을 계산한다. 그러나 이 값은 최종 가공면 즉, CAD 혹은 CAM 에서 정의된 곡면을 지시하는 것이기 때문에 실제 CNC 에서 사용하기 위해서는 공구의 접촉점에서 공구반경을 고려하여 Z 축 방향으로의 공구 및 잔여 절삭깊이에 대한 오프셋(offset)의 보상이 이루어져야 한다. 본 논문에서 제시하는 NURBS 곡면 인터플레이터의 개략적인 구조를 Fig. 1 에 도시하였다.

2.2 NURBS 곡면가공의 일괄처리 과정

3 축 윤곽가공에서는 일반적으로 직육면체의 모재를 이용하여 CAD/CAM에서 정의된 곡면을 목표표로 황삭, 정삭 혹은 황삭, 중삭, 정삭의 일련 과정을 거쳐 가공한다. 생산 현장에서 이용되는 가장 보편적인 방법은 수많은 블록(block)의 G01 코드를 이용하여 각 과정에 알맞은 공구와 미리 정의된 규정 이송속도에 맞춰 일정 속도로 절삭하는 방법일 것이다. 즉, 각 절삭과정에서 최종 절삭면(기준면)에 따라 피삭량과 절삭조건이 다름을 인지하고 각 과정에 적합한 절삭깊이와 이송속도를 결정하게 된다. 절삭깊이는 공구와 최종 절삭면의 형상에 따라 결정하고 이송속도는 절삭깊이, 스피indle(speed) 속도, 스피indle 동력(power)에 따라 결정하게 된다.

황삭가공에서는 지름이 큰 공구를 택하고 절삭깊이를 크게 하거나, 절입량을 작게 하는 대신 이

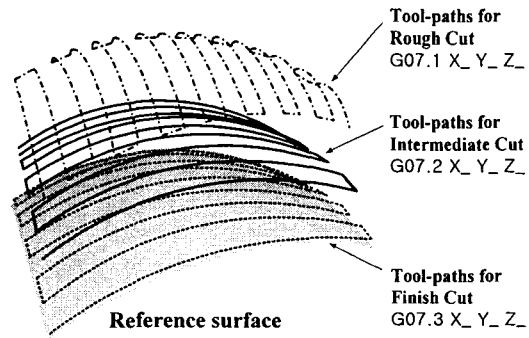


Fig. 2 Batch processing of whole cutting using integrated surface interpolators

송속도를 빠르게 한다. 그리고 정삭가공으로 갈수록 이송속도와 절삭깊이를 줄이는 것이 일반적이다. 또, 황삭가공에서는 스피indle 모터가 낼 수 있는 최대 동력을 고려하여 절삭속도를 규정하는 것이 효과적일 것이다. 이와 관련하여 가공면의 품질을 높이기 위해 가공시에 절삭방향에 반대 방향으로 나타나는 절삭저항 즉, 절삭력을 일정하게 유지하면 가공면 품질을 높일 수 있다는 것은 익히 알려진 사실이다. 기존의 연구방법은 이송속도와 절삭깊이에 따라 피삭량이 달라짐을 고려하여 NC 데이터(G01 코드)를 바탕으로 절삭력을 예측하고 이송속도를 조절해서 절삭력을 구속하는 방식이었다.⁽⁷⁾ 그러나 본 논문에서 제시하는 방법에는 수많은 NC 데이터들이 필요 없으며, 이송속도를 조절하기 위한 기존의 방법이 오프라인(off-line) 방식이었던데 반하여 제시된 알고리즘은 온라인(on-line) 방식인 차이가 있다. 제시된 방법에서는 아래 Fig. 2 와 같이 기준면을 가공하기 위해 각 과정에 적합한 새로운 형식의 NURBS 곡면 G 코드를 정의하여 가공한다. 각 절삭과정에 대한 G 코드 형식을 Table 1 에 정리하였다.

2.2.1 황삭을 위한 곡면 인터플레이터

황삭을 위한 보간에서는 가공시간을 최소화하기 위하여 절삭가공시의 피삭량을 극대화시키는 방법을 제시한다. 본 논문에서 제시하는 알고리즘은 공구의 형상을 바탕으로 절삭깊이를 최대도 하며 CNC 공작기계의 가능한 최대 절삭조건하에서 가공할 수 있도록, 평엔드 밀과 볼엔드 밀 두 가지에 대하여 절삭깊이와 이송속도를 실시간으로 조절하는 방식이다. 우선, Fig. 3 의 (a)와 같이 공구날 전체를 이용하여 가공할 때의 이송속도를 정한다. 이 경우의 절삭단면적과 이송속도를 각각 기준 절삭단면적($A_0 = A_1 + A_2$)과 기준 이송속도(V_0)로 정한

Table 1 Example format of the proposed NURBS surface G-codes

NURBS Surface G-codes	Description
G07.1 BR (or FR) U_V_D_L_LF_HF_H_M_ X_Y_Z_W_K_...	G07.1: a new NURBS surface G-code for rough cut G07.2: a new NURBS surface G-code for intermediate cut G07.2: a new NURBS surface G-code for finish cut BR: ball-end mill type FR: flat-end mill type
G07.2 BR (or FR) U_V_D_L_F_H_M_ X_Y_Z_W_K_...	U: number of tool-path direction control points V: number of tool-path interval direction control points D: tool diameter L: limit of depth of cut LF: minimum feedrate (reference feedrate) HF: maximum feedrate F: feedrate
G07.3 BR U_V_D_L_F_S_ X_Y_Z_W_K_...	H: remaining depth of cut M: side step distance S: allowable scallop height X, Y, Z: control point dimension W: Weight K: Knot

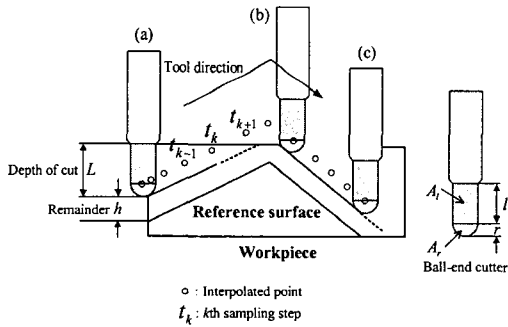


Fig. 3 Variable-feedrate interpolation depending on depth of cut at rough cut

다. 이것은 각각 최대 절삭깊이와 최저 이송속도에 해당된다. 가공시 공구경로를 따라 변화하는 절삭단면적은 3 축 수직형 CNC 공작기계의 경우 Z축 방향의 절삭깊이 L 에 대한 함수로 나타낼 수 있으며, 여기에 이송속도 V 를 곱하여 비절삭체적(MRR: Material Removal Rate)을 구할 수 있다. 실시간 절삭깊이 $L(t)$ 에 따른 절삭단면적 A 및 가변 이송속도 V 에 의한 비절삭체적을 기준 절삭단면적 A_0 와 기준 이송속도 V_0 에 의한 기준 비절삭체적과 같게 놓고, 이송속도 V 에 대해 정리하면 아래의 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$V = \begin{cases} \left(\frac{\pi r + 4(L_0 - r)}{\pi r + 4(L - r)} \right) V_0 & \text{for ball - end mill} \\ \left(\frac{L_0}{L} \right) V_0 & \text{for flat - end mill} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 r 은 볼엔드 밀의 볼노우즈(ball-nose) 반경이고, L_0 는 A_0 에 대한 절삭깊이($L+r$)이다. 즉, 기준 절삭단면적에 대한 최대 절삭깊이와 기준 이송속도에 해당하는 최저 이송속도에 대해, 보간기는 곡면 전체를 따라 실시간으로 변화되는 절삭단면적에 대해 이송속도를 변화시켜 기준 비절삭체적에 맞춰 비절삭체적을 일정하게 유지시킬 수 있다.

식 (2)의 가변 이송속도 V 는 공구의 볼노우즈 반경 이상의 절삭깊이에 대한 것이다. 반면에 Fig. 3 의 (b)와 같이 절삭깊이가 r 이하인 경우에는 절삭단면적에 대한 복잡한 계산이 요구된다. 그러나 실시간 연산을 행하는 보간기의 특성상 연산량이 많은 복잡한 계산은 지양되어야 하고 정밀한 계산에 따른 효과 역시 미미하다. 따라서 본 논문에서는 볼노우즈 부분만이 묻혔을 경우에는 최대 이송속도로 이송토록 하였다.

비절삭체적의 불균일은 절삭력의 불균일과 직결되는데, 비절삭체적과 평균 절삭력(average rigid force) 사이의 비례 관계는 이미 밝혀진 바 있다.^(8,9) 따라서, 황삭을 위한 곡면 보간 알고리즘은 CNC 공작기계 시스템에서 가공 가능한 최대 절삭력에 맞춰 절삭력이 일정하게 가공할 수 있도록 이송속도를 식 (2)와 같이 실시간으로 조정하는 방법을 취할 수 있다. 그러나, 현장에서 CNC 공작기계 시스템이 갖는 최대 절삭력의 한계를 알고 사용하기란 쉽지 않은 일이다. 따라서 제시된 곡면 인터플레이터에서는 작업자가 최대 절삭깊이, 최소 이송속도와 최대 이송속도를 직접 정해주는

방식을 택한다. 즉, 최대 이송속도는 CNC의 절삭 속도 및 동력을 고려하여 가변 이송속도 V 를 제한하는 것이며, 가변 이송속도는 사용자가 규정한 최대 이송속도를 넘지 않도록 한다.

황삭가공에서는 CAD/CAM에서 정의된 곡면의 형상을 바로 생성하지 않고 최종 가공면과 비교하여 약간의 절삭두께만을 남기고 나머지 피삭재를 제거하는 것이 일반적이다. 제시하는 인터플레이터 역시 CAD/CAM에서 정의된 기준곡면에 대하여 남겨질 절삭두께를 규정하고 기준곡면에 대한 오프셋의 실시간 보정을 실시한다. 한편, Fig. 3의 (c)와 같이 공구의 날이 없는 부분이 가공면과 부딪히거나 공구 물림대(척(chuck), 아머(arbor))가 가공면과 접촉하지 못하게 하기 위하여 절삭깊이 L 을 적절히 조절해줄 필요가 있다. 따라서 절삭깊이 L 은 사용자가 지정한 최대 절삭깊이와 기준곡면에 대해 남겨져야 할 잔여 절삭두께, 그리고 주어진 소재와 기준곡면에 대한 Z축 방향으로의 거리를 고려하여 계산된다. 결과적으로 황삭공에서의 공구 오프셋 보정을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{CL} = \begin{cases} S(u, v) + hn_z & \text{if } L < L_0 \\ S(u, v) + (h + L - L_0)n_z & \text{if } L \geq L_0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서, n_z 는 Z방향의 단위 벡터이고, h 는 잔여 절삭두께를 의미한다. 따라서, 황삭가공 후 남겨질 가공면은 최소한 사용자가 정의한 잔여 두께 이상을 갖는다.

곡면 보간기는 매 샘플주기마다 보간점과 다음 공구경로로의 공구경로 간격 방향의 매개변수 증분값들을 계산하는데 공구경로 간격에 대한 계산은 아래의 식 (4)와 (5)를 이용한다.

$$\Delta u_k = 0 \quad (4)$$

$$\Delta v_k = \frac{\Delta w}{(\mathbf{n} \times \mathbf{t}) \cdot \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{v}}} \quad (5)$$

식 (5)에서 Δw 는 공구경로 간격(side step distance), \mathbf{n} 은 곡면의 단위 법선벡터, \mathbf{t} 는 공구경로 방향의 단위 접선벡터를 나타낸다.

이상과 같은 NURBS 곡면의 황삭가공을 위한 새로운 G 코드 입력방식은 Table 1의 G07.1로 정의된다.

2.2.2 중삭을 위한 곡면 인터플레이터

정삭 과정 이전에 거치게 되는 중삭가공에서는

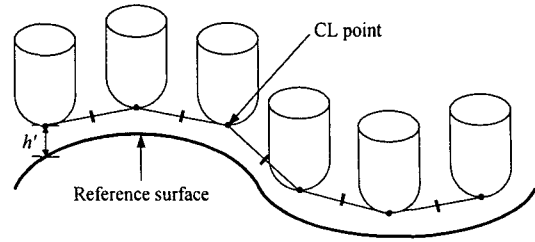


Fig. 4 Constant-feedrate interpolation for intermediate cut

정삭가공에서 필요한 기준면 이상의 잔여 절삭두께를 남기고 모두 절삭하게 된다. 이 과정을 통해 황삭가공 후 얻게 된 거친 가공면을 보다 부드럽게 하고 기준면 이상의 잔여 두께를 정삭가공에서 필요한 두께 이내로 맞추는 작업을 실시한다. 이 과정에서는 절삭깊이가 황삭가공에 비하여 크지 않고 황삭면의 높이와 요구되는 잔여 절삭두께의 차가 크지 않다고 가정한다. 따라서 황삭과 동일한 공구경로 계획법을 바탕으로 Fig. 4와 같이 일정 이송속도로 가공하되 공구경로 간격은 정삭가공에 비해 훨씬 넓고 황삭가공에 비해서는 좁은 간격으로 설정한다. 그 결과 정삭가공에서 균일한 깊이로 균일한 절삭면이 얻어질 수 있도록 가공면의 결(스캐럽)을 조정한다. 이때 사용되는 공구경로 간격 방향의 매개변수 증분량은 황삭가공에서와 마찬가지로 식 (4)와 (5)를 이용한다. Table 1에 나타난 바와 같이 중삭가공의 G 코드(G07.2)는 대부분 황삭가공을 위한 G 코드(G07.1)와 동일하나, 최저 및 최고 이송속도 대신 일정 이송속도 F 를 입력하는 점에 차이가 있다.

2.2.3 정삭을 위한 곡면 인터플레이터

황삭과 중삭가공에서는 기준면에 대한 공작물의 잔여 절삭두께가 충분하다고 가정하고 공구의 위치 보정을 단순히 Z축 방향으로만 하였다. 그러나 정삭과정에서는 절삭깊이가 매우 작고 공구와 접촉하여 절삭된 면이 공작물의 최종 가공면이 되기 때문에 기준면에 대한 공구접촉점을 정밀하게 계산해야 할 필요가 있다. 따라서 정삭과정은 앞서 제시된 황삭과 중삭에 비하여 알고리즘이 매우 복잡하다. 정삭과정에 대한 기존의 공구 보정은 아래의 식 (6)을 이용해왔다.

$$S_{CL} = S(u, v) + r(\mathbf{n} - \mathbf{n}_z) \quad (6)$$

기존의 방법은 곡선인 공구접촉(CC) 경로를 직선 조각으로 분할하여 표현함에 따라 생기는

chord 높이오차(chord height error) δ 가 일정하게 되는 공구접촉점을 계산하고 공구접촉점 사이(거리 λ)를 직선 보간하는 방식을 취한다. 이 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = 2\sqrt{\delta(2\rho - \delta)} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 곡면의 곡률반경이다. 그러나 이 방식에서는 각 공구접촉점을 정확히 VT (T : 제어루프의 샘플주기)의 정수배만큼씩 위치시킬 수 없으므로 이송속도 오차가 발생하게 된다. 또한, 공구접촉점 사이에서 일정한 이송속도를 유지토록 보간점을 구한다 하더라도 굴곡이 존재하는 가공면에 대해서는 공구의 이송속도가 일정하지 않을 수 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서, 본 논문에서는 이러한 이송속도의 차이를 줄이고 굴곡이 있는 가공면에 대하여 비절삭체적을 일정하게 유지시킬 수 있도록 식 (8)을 이용하여 공구접촉 경로상의 이송속도를 조정한다.

$$V = \frac{V_0}{1+L/(2\rho)} \quad \text{where } L \leq r \quad (8)$$

이때 곡면의 곡률반경 ρ 는 실시간으로 구해져 반영된다. 그 결과 이송속도를 일정하게 하는 경우보다 균일한 절삭력을 유지할 수 있으며, 이는 2 차원 가공실험을 통해 검증된 바 있다.⁽¹¹⁾

식 (8)을 이용하기 위해서는 선행된 절삭과정에서 얻어진 잔여 절삭두께, 즉 정삭가공에서 공구의 절삭단면적이 일정해야 하는 가정이 필요하다. 이것을 만족시키기 위하여 첫째, 중삭 (혹은 황삭) 인터플레이터를 이용하여 처리된 가공면에서와 정삭에서 쓰이는 공구경로 계획 방법을 동일한 것으로 한다. 둘째, 정삭가공에서는 공구경로 간격이 매우 조밀하며 현재 공구경로의 절삭단면적이 이전 공구경로의 절삭단면적과 대부분 겹치도록 한다. 그 결과, 공구경로 방향의 이송속도 변화에 따른 비절삭체적의 변화에 비해 공구 절삭단면적의 미세한 변화는 그 효과가 미약하다고 볼 수 있다. 정삭과정에서의 공구경로 간격 방향에 대한 계산은 황삭 및 중삭가공과 동일하게 식 (4)와 (5)를 이용하되, 규정 스킵 높이 σ 를 만족시키도록 공구경로 간격 Δw 를 아래 식 (9)와 같이⁽¹²⁾ 조정해준다. 여기서, (\pm) 기호는 각각 곡면이 볼록한 경우(+)와 오목한 경우(-)를 나타낸다.

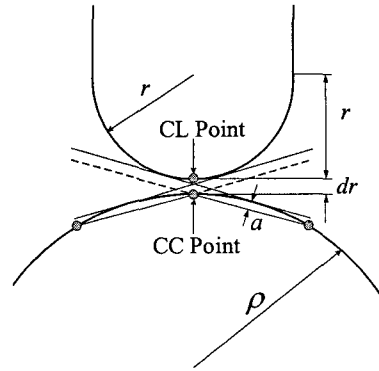


Fig. 5 Compensation of the error component due to the tool offset

$$\Delta w = \sqrt{\frac{8\rho ar}{\rho \pm r}} \quad (9)$$

끝으로, 각 보간점 사이를 선형적으로 움직이는 CNC의 특성상, 볼랜드 밀의 볼노우즈 형상에 기인하여 기준면이 볼록한 경우에는 가공면이 미세하게나마 손상될 수 있다. 이를 방지하기 위해 Fig. 5 에서와 같이 공구의 최종 위치를 dr 만큼 조정하는 것이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 아래의 식 (10)을 이용하여 공구의 위치를 보정한다.⁽¹³⁾ 여기서, a 는 Fig. 5 에 나타난 바와 같이 보간을 통해 구해진 이웃하는 두 공구접촉점을 잇는 직선 선분과 공구접촉 경로 사이의 거리를 의미한다.

$$S_{cz} = S(u, v) + \frac{r\rho}{\rho - a}(n - n_z) \quad (10)$$

정삭과정에 대한 G 코드는 Table 1 의 G07.3 으로 정의되며, 중삭의 G 코드(G0.7.2)와 비교해 잔여 절삭두께는 필요치 않은 반면, 규정 스킵 높이의 입력이 요구된다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서 제시된 NURBS 곡면 인터플레이터의 성능을 검증하기 위하여 Visual C++를 기반으로 한 컴퓨터 시뮬레이터를 구축하고, 3 축 CNC 밀링머신에서의 평랜드 밀과 볼랜드 밀을 이용한 NURBS 곡면가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 기존의 G01 코드를 이용한 직선 보간법과 본 논문에서 제시된 G07 코드를 이용한 NURBS 곡면 보간법의 결과를 비

Table 2 Cutter and machining conditions for the NURBS surface machining

Process	Tool diameter (mm)	Axial cutter length, L_0 (mm)	Side step distance (mm)	Feedrate (m/min)	Remaining depth of cut (mm)	Cutter type
Rough cut	12	30	12	1.5~3.0	3	flat
Intermediate cut	6	30	2	1	1	flat
Finish cut	3	15	variable	0.5	-	ball

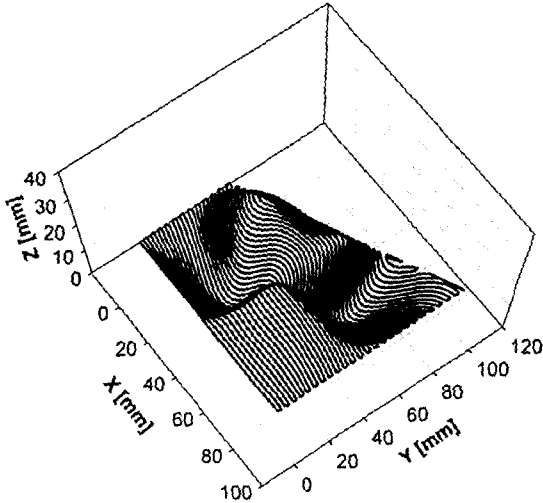


Fig. 6 NURBS surface

Table 3 Comparison of NC data size

Process	Linear Interpolator	NURBS Surface Interpolator
Rough Cut	96 KB (3,076 blocks)	1 KB (1 block)
Intermediate Cut	466 KB (15,016 blocks)	1 KB (1 block)
Finish Cut	297,984 KB (96,281 blocks)	1 KB (1 block)

Table 4 Comparison of machining time (sec)

Process	Linear Interpolator	NURBS Surface Interpolator
Rough Cut	58.48	39.88
Intermediate Cut	398.50	160.48
Finish Cut	31,996.60	3,601.91

교하였다. G01 코드는 0.001 mm의 일정한 chord 높이 오차를 만족하는 직선 조각들로써 구성하였으며, 보간 주기는 모두 0.01 s로 설정하였다. 또한, 시뮬레이션에서 모재의 크기는 90 mm×100 mm×50 mm로 가정하였다.

3 차의 6×6 조정점들로 형성된 Fig. 6 과 같은

NURBS 곡면의 가공에 대해, 기존 방법과 제시된 방법의 NC 데이터의 크기, 총 가공시간, 보간기의 이송속도 출력을 비교하였으며, 비절삭체적과 절삭력의 비례관계를 이용하여 가공시에 걸리는 절삭력을 비교하였다. 이 경우의 황삭, 중삭, 정삭 과정에 대한 공구 및 절삭조건은 Table 2 와 같다. 황삭가공의 경우에 제시된 인터플레이터에서는 이송속도가 1.5~3.0 m/min의 범위에서 변속될 수 있도록 하였으며, 기존의 직선 보간방법에 대해서는 이송속도를 1.5 m/min로 설정하였다. 이때 공구경로 간격은 공구 지름의 크기를 유지하도록 하였다. 중삭에서는 황삭에 비하여 보다 조밀하게 공구경로 간격을 설정하였다. 정삭가공에서는 등스칼럼 방식의 공구경로 계획법을 이용하여 공구경로를 조정하였으며, 허용 스칼럼 높이는 0.01 mm로 하였다. 직선 보간방법과 제시된 인터플레이터와의 공정한 비교를 위해 모든 경우에 대해 동일한 공구경로 계획방법을 적용하였다.

Table 3 과 4 에는 두 방법에 대한 NC 데이터의 크기와 가공시간을 각각 비교하였으며, Fig. 7 은 각 과정별로 하나의 CL(cutter location) 경로상에서의 이송속도 출력을 비교한 것이다. Table 3 에서는 CNC의 초기화 및 가공 시작점으로서의 이동을 위한 공통의 NC 데이터를 제외하고, 순수 가공에 필요한 데이터만의 크기를 비교하였다. Table 3 의 결과로부터, 기존의 직선 보간방법은 황삭에서 정삭과정으로 갈수록 필요한 공구경로의 수가 늘어남에 따라 요구되는 직선 블록의 수가 그에 비례하여 급격하게 증가하고 NC 데이터의 크기가 비례해짐을 알 수 있다. 반면에 제시된 NURBS 곡면 인터플레이터는 각 과정에 무관하게 한 블록의 데이터로 실행될 수 있으므로, 기존 데이터 저장 및 전송장치 등의 기기가 필요치 않음을 확인할 수 있다. 또한, Table 4 에서 제시된 방법은 기존의 방법에 소요되는 가공시간을 획기적으로 줄일 수 있음을 볼 수 있다. 기존의 방법은 공구경로를 직선 조각으로 분할하여 보간할 때 분할점에서 불가피하게 발생하는 가/감속 효과에 의해 Fig. 7 과 같이 분할점마다 이송속도가 기준속도에 미치지 못하게 되고 이것이 누적되어, 가공의 정밀도가 증가할수록 가공시간이 크게 증가하게 된다. 반면에 제시된 방법은 Fig. 7 의 결과에서 볼 수 있듯이 일정하게 이송속도를 제어할 수 있어서, 주어진 곡면에 대한 정삭가공에서는 가공시간을 약 1/9로 단축시킬 수 있다. 따라서 제시된 방법은 생산성

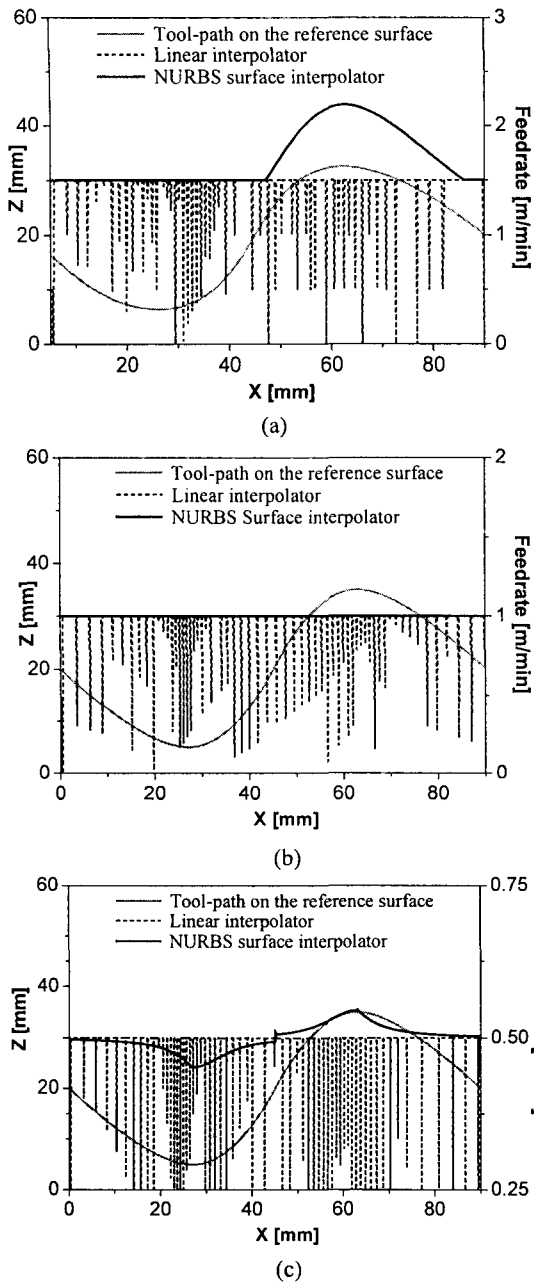


Fig. 7 Comparison of CL feedrates for each process: (a) rough cut; (b) intermediate cut; (c) finish cut

을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. Fig. 7에서 제시된 방법의 이송속도는, (a)의 황삭인 경우에는 절삭깊이의 변화(주어진 소재의 Z 좌표가 50 mm)에 따라 절삭동력을 최대한으로 균일하게 유지할 수 있도록 변속되고, (b)의 중삭에서는 일정하

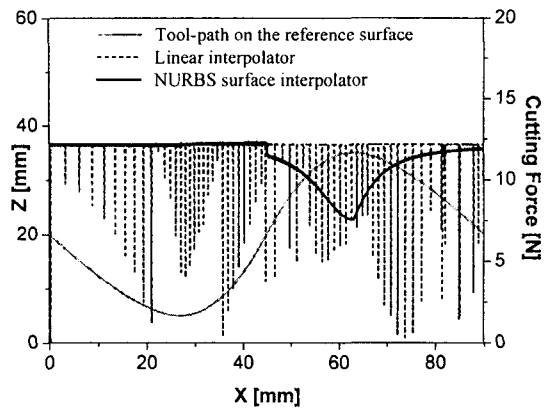


Fig. 8 Comparison of cutting forces for finish cut

게 유지됨을 확인할 수 있다. 정삭에서는 제시된 방법의 경우 공구경로의 곡률에 따라 비절삭체적이 일정하게 되도록 이송속도를 조정하므로, Fig. 7(c)와 같이 이송속도에 완만한 변화가 나타남을 볼 수 있다.

끝으로 Fig. 8에는 정삭과정에서의 절삭력을 비교하였다. 이것은 비절삭체적과 절삭력 사이의 비례관계를 이용하여 계산한 결과이며⁽¹⁰⁾, 이때 비절삭동력(specific power)은 $12,000 \text{ N/mm}^2$ 으로, 스피들속력은 2,700 rpm으로 가정하였다. 정삭과정을 위해 제시된 방법은 비절삭체적을 일정하게 하는 가변속 알고리즘과 매 샘플링시간마다 원하는 이송속도 만큼의 거리를 정확히 보간할 수 있는 특성을 갖기 때문에, 각 직선 분할점에서 가/감속이 일어나는 기존의 방법과 비교하여 보다 균일한 절삭력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 제시된 방법의 절삭력에서 공구경로 후반부의 불룩한 부분에서 절삭력이 감소하는 부분이 생기는 것은 공구 접촉 경로가 기준면을 손상시키는 것을 방지하기 위한 공구위치 보정으로 이 부분에서 절삭깊이가 줄어들었기 때문으로 해석할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 NURBS 곡면의 CNC 가공을 위해 새로운 G 코드를 정의하였으며, 이 G 코드에 기초한 통합형 NURBS 곡면 인터플레이터를 제시하였다. 제시된 인터플레이터는 황삭, 중삭 및 정삭 과정의 각 절삭조건에 적합하게 이송속도를 실시간으로 제어한다. 즉, 황삭에서는 최대 절삭동력을 고려하여 이송속도를 조정하고, 중삭에서는 일정한 이송속도를 유지하며, 정삭에서는 굴곡이 있는 가공면에 대하여 비절삭체적을 일정하게 유지

제시된 NURBS 곡면 인터플레이터의 유용성을 검증하기 위하여, 굴곡이 존재하는 NURBS 곡면을 대상으로 황삭, 중삭, 정삭가공에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 제시된 방법과 기존의 직선분할 보간 방법을, 요구되는 NC 데이터의 크기, 총 가공시간, 이송속도 및 절삭력 제어 정도의 관점에서 비교하였다. 시뮬레이션 결과로부터 제시된 곡면 인터플레이터는 굴곡이 있는 곡면가공에 대하여 NC 데이터의 크기 및 가공 소요시간을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였으며, 이를 근거로 산업현장에 적용될 경우 생산성 향상에 기여할 수 있음을 예상할 수 있다. 기존의 방법이 일정 이송속도를 취하는 반면, 제시된 방법은 황삭과 정삭에서 비절삭체적에 따라 이송속도를 가변시켰으며, 특히 정삭과정을 위한 곡면 인터플레이터는 균일한 절삭깊이를 가정한 곡면가공에 있어서 일정 절삭력을 유지시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 제시된 방법이 기존의 직선분할 보간 방식에서 나타나는 가/감속 효과를 극복할 수 있는 점과 더불어 가공면의 정밀도 향상을 기대할 수 있게 하며, 앞으로 제시된 방법을 실제의 3차원 가공실험을 통해 검증할 계획이다.

후 기

본 연구는 2002 학년도 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) Vickers, G. W. and Bradley, C., 1992, "Curved Surface Machining through Circular Arc Interpolation," *Computers in Industry*, Vol. 19, pp. 329~337.
- (2) Piegl, L. and Tiller, W., 1995, *The NURBS Book*, 2nd Edition, Springer.
- (3) Lee, S. G. and Yang, S. H., 2001, "CNC Tool Path Planning for Free-Form Sculptured Surface with a New Tool Path Interval Algorithm," *Journal of the KSPE*, Vol. 18, No. 6, pp. 43~49.
- (4) Seong, W., Choi, C. H., and Song, O., 1999, "A Toolpath Generation for CNC Machining of Free-form Surfaces," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 4, pp. 129~137.
- (5) Suresh, K. and Yang, D. C. H., 1994, "Constant Scallop-height Machining of Free-form Surfaces," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 253~259.
- (6) Lo, C. C., 2000, "CNC Machine Tool Surface Interpolator for Ball-End Milling of Free-Form Surfaces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, pp. 307~326.
- (7) Park, H. D. and Yang, M. Y., 1989, "A Study on the Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling Process," *Transactions of the KSME*, Vol. 13, No. 3, pp. 433~442.
- (8) Smith, S. and Tlustý, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169~175.
- (9) Kloypayan, J. and Lee, Y. S., 2002, "Material Engagement Analysis of Different Endmills for Adaptive Feedrate Control in Milling Processes," *Computers in Industry*, Vol. 47, pp. 55~76.
- (10) Jee, S. and Koo, T., 2002, "NURBS Surface Interpolator for Constant Cutting Forces in Ball-End Milling," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 9, pp. 1888~1896.
- (11) Farouki, R. T., Manjunathaiah, J., Nicholas, D., Yuan, G.-F. and Jee, S., 1998, "Variable-Feedrate CNC Interpolators for Constant Material Removal Rates Along Pythagorean-hodograph Curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, pp. 631~640.
- (12) Lin, R. S. and Koren, Y., 1996, "Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 118, pp. 20~28.
- (13) Lo, C. C. and Lin, R. S., 2001, "An Improved Method for Scheduling the Tool Paths for Three-axis Surface Machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 133~147.