한국정밀공학회지 제 21 권 제 8 호 (2004 년 8 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 8, August 2004.

와이어컷 방전가공기의 정밀제어를 위한 NURBS 보간기에 관한 연구

박진호#, 남성호*, 정태성*, 양민양**

A Study on the NURBS Interpolator for the Precision Control of Wire-EDM

Jinho Park#, Sungho Nam*, Taesung Jung* and Minyang Yang**

ABSTRACT

This paper deals with the precision NURBS interpolator for wire-EDM. Previous research about OAC (Open Architecture Controller) is mostly aimed at NC cutting machines such as milling or lathes, and hence these results are inadequate to apply to wire-EDM. In contradiction to NC machines, wire-EDM operates relatively slow feed rates and based on a feedback control loop to the machining process. The 2-stage interpolation method which reflects wire-EDM specific characteristics was proposed. The constant interpolation error could be acquired through 1st stage interpolation. Feed rate regulation was performed through 2nd stage interpolation. The suggested algorithm was implemented to test-bed PC-NC system. Computer simulations and the experimental machining were conducted.

Key Words: WEDM(와이어 방전가공기), CNC(수치제어장치), Interpolator(보간기), NURBS, Open architecture controller(개방형 제어기), PC-NC

기호설명

P_n =current sample point
P_{n+1} = next sample point
F =feed rate
S =total moving distance
T_S =sampling time
u =NURBS parameter
p =NURBS degree
U =knot vector
C =control point

1. 서 론

수치제어 공작기계를 운용하기 위해서는 공작기계 자체를 중심으로 가공프로세스, CNC장치의 특성에 대한 이해와 더불어 CAD/CAM 소프트웨어에 대한 이해가 중요하다. 특히 더욱 정교하고 복잡해져 가는 현대의 가공 대상물의 가공을 위해서는 CAD/CAM 소프트웨어의 적용이 필수적이다. CAD에서의 모델링 과정을 거친 모델은 CAM소프트웨어에서 직선과 원호의 조합으로 이루어진 NC 코드로 생성되고 이는 CNC 공작기계에 전송되어, 전송된 NC코드에 기초하여 수치제어 공작기계가 가공을 진행하는 것이 일반적인 수치제어 가공의 과정이다.

이러한 수치제어 가공기술과 관련하여 최근 주목 받고 있는 분야중의 하나가 NURBS (Non-

접수일: 2003 년 6 월 16 일; 게재승인일: 2004 년 6 월 11 일
교신저자, ㈜에자일텍 자동화사업부
E-mail: agiletec@yahoo.co.kr, Tel: (042) 869-3264
* 한국과학기술원 기계공학과(원)
** 한국과학기술원 기계공학과

Uniform Rational B-Spline)이다. NURBS는 다양한 기하학적인 형상을 다루기 위해 CAD/CAM 시스템에서 사용하는 한 방법으로서 실제 산업현장에서 필요한 다양한 형태의 곡면을 표현하는 능력이 뛰어나 대부분의 CAD/CAM 시스템에서 사용하고 있는 곡면 모델링을 위한 수학적 방법이다. 특히 자동차, 항공 산업 분야의 제품들과 같이 자유곡면을 많이 포함하는 경우에는 그 활용도가 더욱 증대되고 있다.[1~5]

CAM 시스템에서 NURBS와 같은 고급 곡선 모델을 사용하는데 반해 기존의 CNC에서는 이러한 형태의 곡선을 다룰 수 없었다. 일반적인 CNC에서 처리 가능한 명령은 직선운동과 원호운동의 간단한 형태만이 존재했기 때문에 두 시스템 사이에는 적절한 데이터 변환과정이 필수적이었다. CAD에서 모델링된 형상은 CAM에서 형상오차를 만족하는 대량의 미소직선과 원호의 조합으로 분해된 뒤 이를 CNC에 전송하는 방법을 사용하는 것이 전형적인 CAD/CAM과 CNC사이의 연동과정이었다. 이러한 방법은 데이터 변환오차, 데이터량, 고속 데이터전송 등에서 한계점을 가지게 된다. 특히 고정도 가공과 고속 가공의 적용에 있어서 중요한 문제점 중의 하나가 된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 하나의 방법으로 CAM 시스템에서 사용하던 NURBS 모델링 방법을 CNC에서 직접 처리하는 방안을 고려할 수 있다. 이를 위해서 NURBS곡선의 표현에 필요한 곡선정보를 CAM시스템에서 직접 CNC로 다운로드하고 CNC에서는 이 곡선정보를 해석해서 곡선정보에 따라 보간 및 가공을 수행하는 방법에 대해 최근 관련 연구가 진행되고 있다.[3~5]

그러나 CAD/CAM에서 NURBS를 처리하는 방식과 CNC에서의 방식에는 근본적인 차이가 있어 어려운 점이 많고, 또한 대부분의 연구가 절삭가공기를 대상으로 하고 있어 Wire-EDM에의 적용에 관해서는 거의 연구가 진행되지 않았다.[6~7, 11~14] 이에 본 논문에서는 Wire-EDM의 특수성을 고려한 NURBS 보간 알고리즘을 개발하고 이를 개방형 구조의 프로토타입 시스템으로 구현하였다.

2. 저속이송시스템에서의 워드방식보간

컴퓨터 및 마이크로 프로세서 관련 전자기술의 급속한 발달로 인해 최근의 CNC 시스템은 대부분 워드방식(Reference-word method)의 보간 방법을 사용하고 있다. 이러한 워드방식의 보간을 위한 기본적인 수식은 다음과 같은 형태로 기술할 수 있다.[8-9]

$$P_{n+1} = P_n + \Delta S, \quad \Delta S = F \cdot T_s \tag{1}$$

식(1)은 워드방식 보간 방법에 대한 기본수식으로서 ΔS는 단위 샘플링 주기에 이동하는 이동량으로서 두 보간점 사이의 거리에 해당한다. 위의 수식에서 샘플링 주기와 이송속도인 피이드(Feedrate)간에는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$F = \frac{\Delta S}{T_s} = \frac{S}{T_s \cdot N} \quad \text{(N: iteration number)} \tag{2}$$

위의 수식은 동일한 이송거리를 진행하는데 있어서 이송속도(Feed rate)가 작은 경우에는 더 큰 샘플링 주기를 사용할 수 있거나 더 많은 횟수의 연산이 가능함을 의미한다. 동일한 기하학적 형상에 대해 단지 이송속도의 변화만 있는 경우 이를 위한 연산횟수를 동일하게 고정하면 샘플링 주기는 식(3)과 같이 되어 이송속도에 반비례하게 됨을 알 수 있다.

$$T_s = \frac{S}{F \cdot N} \tag{3}$$

샘플링 주기는 한 시스템에서 하드웨어적인 사양에 따라 하나의 값으로 고정되게 되고, 동일한 기하학적인 형상이라면 이를 허용오차 이내로 보간하기 위한 연산횟수도 동일하다고 볼 수 있으므로 대략적으로 식(3)에서 샘플링 시간과 이송속도의 역수 관계를 알 수 있다. 보통 이송속도는 NC 코드상에 명기되어 고정되지는 않으나 일반적으로 적용되는 범위가 있으므로 작은 이송속도 범위에서는 샘플링 주기를 크게 할 수 있음을 나타낸다.

샘플링 주기가 커진다는 것은 결국 연산을 수행하는 프로세서에 걸리는 부하가 작아진다는 의

미가 되는데 여기서 발생하는 여유는 추가적인 다른 작업을 진행하거나 고급 기능을 부가할 수 있다는 의미가 된다. 일반적으로 Wire-EDM의 가공속도는 절삭가공기의 가공속도에 비해 훨씬 작기 때문에 일반적인 보간 방법 외에 특수한 형태의 알고리즘을 적용하는 것이 가능함을 알 수 있다.

3. CNC 에서의 자유곡선보간

일반적으로 수학적 곡선은 식(4)의 두 가지 형태로 표현할 수 있는데 NURBS의 경우는 매개변수 곡선(Parametric curve)의 한 종류로서 매개변수 곡선 중 가장 일반화된 형태이며 수학적인 표현 능력의 우수성 때문에 CAD/CAM 분야에서 선호되는 표현법이다. NURBS와 같은 매개변수 곡선 표시법은 매개변수만으로 각축의 운동을 독립적으로 유도할 수 있어 다축 공작기계나 로봇제어 분야에 쉽게 응용될 수 있는 측면이 있다. 기존의 직선 및 원호 운동의 조합과 달리 매개변수형 곡선에 대한 직접 보간을 통해 부드러운 운동경로를 생성함으로써 부드러운 동특성을 얻을 수 있게 된다.[1]

Implicit form: $f(x,y,z)=0$

Parametric form: (4)

$$C(u)=(x(u),y(u),z(u)) \quad a\le u\le b$$

NURBS는 다음의 수식으로 표현되는 B-스프라인 곡선으로서 B-스프라인은 단순 스프라인과 달리 반드시 곡선 위에 놓여있을 필요가 없는 제어점(Control point)과 각 제어점의 가중치(Weight) 그리고 절점(Knot)들로 정의된다. 식(5)는 NURBS곡선식을, 식(6)은 NURBS곡선의 기저(Basis)를 나타낸다.[10]

$$C(u)=\frac{\sum_{i=0}^{n}N_{i,p}(u)w_iP_i}{\sum_{i=0}^{n}N_{i,p}(u)w_i} \qquad (a\le u\le b) \tag{5}$$

$$N_{i,0}(u)=\begin{cases}1 & if\ u_i\le u\le u_{i+1}\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{6}$$

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

식(5)와 식(6)에서 벡터 $\{P_i\}$ 는 제어점(control points)으로서 조정다각형을 구성하고 $\{w_i\}$ 는 각 제어점의 가중치(weight)를, $\{N_{i,p}(u)\}$ 는 p차 B-스프라인 기저함수를 나타낸다. 기저함수는 다음 형태의 절점 벡터에 대해 정의된다.[10]

$$U=\{\underbrace{a,....,a}_{p+1},u_{p+1},....,u_{m-p-1},\underbrace{b,....,b}_{p+1}\} \tag{7}$$

여기서, U: non-decreasing sequence of real-number
p: Nurbs degree, n: no. of control points
m = n+p+1

일반적으로 동일한 형상의 곡선에 대한 매개변수 표현 방법은 유일하지 않은데, 실시간 매개변수 곡선 보간을 수식화 하기 위해 요구되는 점은 주어진 이송속도 V와 샘플링시간 T에 따라서 매 샘플링 시간 t_k 마다의 u_k를 지정하는 방법과 매개변수 영역에서가 아니라 시간 영역에서 보간 위치(x_k, y_k, z_k)를 등 간격으로 지정할 수 있는가 하는 것이다. 이차원 영역의 경우라면 식(8)로 주어진 NURBS 곡선에 대해

$$C(u)=(x(u),y(u)) \quad a\le u\le b \tag{8}$$

샘플링 시간 간격에 대해 이산화된 수식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}&t_k=T_s\cdot n \quad (n=0,1,2,\cdots)\\ &u_k=f(t_k)\\ &C(u_k)=(x_k,y_k)\end{aligned} \tag{9}$$

식(9)에서 매 주기의 샘플링 간격에 해당하는 매개변수 u_k를 적절히 계산하는 과정이 매개변수형 곡선에 대한 보간과정이 된다. 주어진 매개변수 곡선에 대해 이송속도항을 고려한 매개변수 곡선 보간법은 다음의 원리에 의한다.[1,10]

먼저 주어진 곡선 C(u)에 대한 속도 V(u)는 이 곡선을 따르는 속도이며 식(5)를 미분하여 구할 수 있다. Wire-EDM의 경우는 2차원 가공을 기본으

로 하게 되므로 2차원 평면상에서라면 수식은 다음과 같이 된다.

$$V(u)=\frac{dC(u)}{dt}=\frac{dC(u)}{du}\frac{du}{dt}=\left(\frac{dx}{du}i+\frac{dy}{du}j\right)\frac{du}{dt} \quad (10)$$

여기서, du/dt는 CAD 모델에 의한 기하학적 정적 정보와 CNC제어에 필요한 동적인 정보사이의 관계를 나타내는 함수로 곡선을 시간에 따른 명령을 생성하는데 필요한 정보를 담고있다. 이 du/dt를 구하기 위해 식(10)의 크기를 취하면 식(11)의 형태가 된다.

$$|V(u)|=\left|\frac{dC(u)}{du}\right|\frac{du}{dt}=\sqrt{(\frac{dx}{du})^2+(\frac{dy}{du})^2}\cdot\frac{du}{dt} \quad (11)$$

식(11)은 식(12)의 형태로 다시 표현되며, 식(12)의 해를 통해 워드방식 매개변수 보간을 수행할 수 있게 된다.

$$\dot{u}=\frac{du}{dt}=\frac{|V(u)|}{\left|\frac{dC(u)}{du}\right|}=\frac{V}{\sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2+\left(\frac{dy}{du}\right)^2}} \quad (12)$$

이 미분 방정식의 해는 이송속도 V(일정속도 또는 시간에 따라 변하는 속도)가 주어지면 u(t)를 구할 수 있으나, 일반적으로 구하기 어려우므로 $t=t_i$ 에서 Talyer시리즈 확장으로 근사하여 수치해석적으로 구하는 방법을 사용하였다. 이에 의한 식(12)의 해는 Taylor시리즈의 1차 항까지 고려했을 때 식(13)과 같다.

$$u_{i+1}=u_i+\frac{V(u_i)T_s}{\sqrt{\left(\frac{dx}{du}\right)^2+\left(\frac{dy}{du}\right)^2}} \quad (13)$$

4. 다단계 보간법을 이용한 Wire-EDM 용 정밀 NURBS 보간 알고리즘

식(13)에 의한 방법은 수식이 간단하여 구현하기가 용이하고 계산량이 많지 않아 실시간 보간의 측면에서 유리하다. 그러나 이 방법에는 두 가지 큰 제약이 있다. 첫번째로는 주어진 기하학적 정보에 대해 동적인 정보만을 고려함에 따라 실제의 이상적인 곡선과 보간된 곡선사이의 형상오차에 대한 고려가 없다는 것이고, 다른 하나는 매개변수에 대한 확장 과정에서 고차항의 무시에 따른 오차의 영향이다. 2차 이상의 더 높은 항을 고려할 수도 있지만 어느 항까지를 고려해야 할지 정량적인 해석이 곤란하기 때문에 문제점은 여전히 존재한다.

Fig.1은 일반적인 곡선을 미소직선 형태로 보간하였을 때 발생하는 형상오차를 나타내는 그림이다. 형상오차는 그림에서 EH로 표시된 반경오차(Radius error)와 ER로 표시된 코드오차(Chord error) 두 가지가 있을 수 있는데 반경오차의 경우 계산 정밀도의 향상을 통해 거의 무시될 수 있기 때문에 NURBS 보간의 경우 형상오차는 코드오차로 정의할 수 있다.

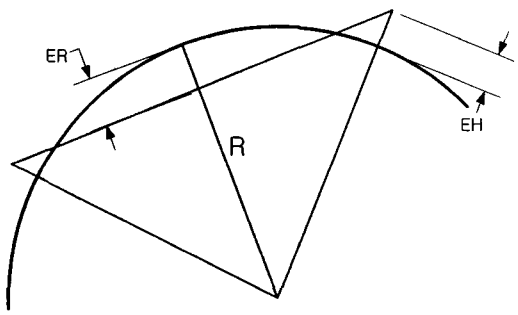


Fig.1 General interpolation error in non-linear curve

원호나 직선의 경우는 이상적인 곡선과 보간 곡선 사이의 보간 오차를 수학적으로 정확히 정의할 수 있는데 반해, NURBS의 경우는 이상적인 NURBS 곡선과 보간 곡선 사이의 오차를 정의하는 것이 곤란하다. 따라서 공학적으로 의미 있는 보간 오차를 계산하기 위해서는 수치해석적인 절차가 필요하게 된다. 그러나 CNC에서 수치해석적인 방법을 사용하는 것은 일반적으로 적절하지 않다. CNC에서 모션제어를 수행하기 위해서는 다량의 연산 작업을 고속으로 수행하는 것이 필요한데, 수치해석적인 방법은 큰 연산시간을 필요로 하기 때문에 일반적인 절삭가공용 CNC에서는 적당하지 않은 방법이라고 할 수 있다. 그러나, 식(3)으로부터 수mm/min정도의 저속이송에 의한 Wire-EDM

형태에서는 충분함을 알 수 있다.

4.1 2 단계 보간(2-Stage Interpolation)

본 연구에서는 수치해석적인 방법으로 보간 오차를 계산하여 이 보간 오차를 개별 공작기계의 BLU이하로 유지할 수 있도록 곡선을 미소 직선으로 분해하고 이를 다시 선형보간 하는 2단계 보간 방법을 적용하여 NURBS 곡선에 대한 형상 정밀도와 이송 정밀도를 동시에 만족하는 방법을 통해 고정도 NURBS 보간 알고리즘을 Wire-EDM에 적용시키려 한다. 이를 위해 보간 오차는 다음의 과정을 통해 계산된다.

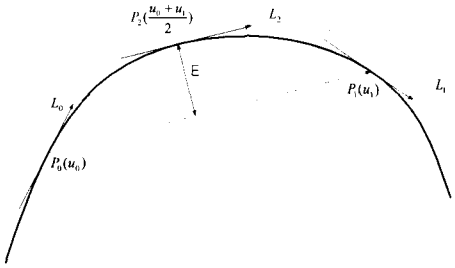


Fig. 2 Interpolation error computing process in NURBS interpolation

Fig.2에서 P_0 는 보간을 위한 현재 위치이다. 다음 샘플링 시간에 도달해야 하는 좌표를 P_1 이라고 할 때, E 는 곡선과 직선사이의 최대 거리로서 보간 오차에 해당한다. 먼저 P_1의 좌표는 매개변수 u에 대해 1차 Taylor시리즈 확장법을 통해 근사적으로 구하게 된다. 즉,

$$u_1 = u_0 + \frac{V(u_i)T_s}{\left\| \frac{dC(u)}{du} \right\|_{u=u0}}, \quad P_1 = P(u_1) \tag{14}$$

두 보간점을 연결하는 직선과 NURBS곡선 사이의 최대 오차에 해당하는 점을 P_2 라고 할 때, 두 보간점 사이의 실제 곡선이 완만한 곡선이라고 가정하면 그 중간 정도에 최대 오차점이 위치할 것 이라고 가정할 수 있다. 이 때에 해당하는 매개변수의 값과 이에 해당하는 좌표는 각각 다음과 같다.

$$u_2 = \frac{u_0 + u_1}{2}, \quad P_2 = P(u_2) \tag{15}$$

세 점간의 기하학적인 관계로부터 형상오차 E는 다음과 같다.

$$E = \frac{\left| (\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0})(x_2 - x_0) - (y_2 - y_0) \right|}{\sqrt{(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0})^2 + 1}} \tag{16}$$

여기서, $P_0 = \{x_0, y_0\}, P_1 = \{x_1, y_1\}, P_2 = \{x_2, y_2\}$

그러나, NURBS에서는 매개변수 u에 대한 곡선의 위치 벡터 $C(u)$ 가 비선형이기 때문에 P_2 의 위치는 최대 거리에 해당하지 않으며 따라서 계산된 E는 최대 보간오차가 되지는 않는다. 이를 보정하기 위해 위 그림에서의 3점에서의 곡선의 접선 벡터를 각각 L_0, L_1, L_2라 하면 이 접선 벡터는 곡선벡터 $C(u)$로부터 다음과 같이 주어진다.

$$L(u) = \frac{dC(u)}{du} = \frac{dx}{du} i + \frac{dy}{du} j \tag{17}$$

매개변수 곡선 C(u)의 k번째 미분을 $C^{(k)}(u)$라고 하면, 다음의 관계가 성립한다.[10]

$$C^{(k)}(u) = \sum_{i=0}^{n} N_{i,p}^{(k)}(u) P_i \tag{18}$$

$$N_{i,p}^{(k)}(u) = p(\frac{N_{i,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p} - u_i} - \frac{N_{i+1,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p+1} - u_{i+1}}) \tag{19}$$

식(18)과 (19)를 이용해 세 점에서의 접선 벡터를 계산하면, 2차원 평면상에서는 곡선의 기울기에 해당하므로 다음의 관계에 의해 최대 오차가 존재하는 구역을 구할 수 있다.

MaxError Position => Interval A : if $|L_0 - L_2| \geq |L_1 - L_2|$, else Interval B
여기서, interval A: P_0 와 P_2 사이
interval B: P_1와 P_2 사이

위의 관계에 따라 시작점과 종점에 대해 바이너리 탐색법(Binary search)을 사용하여 최대 형상오차를 계산하게 된다. 최대 형상오차를 수치해석적으로 계산하기 위해서는 반복 연산에 대한 제한이 필요한데 CNC 시스템의 경우 기본적인 형상오차는 서보 모터 엔코더 해상도에 의한 BLU(Basic Length Unit)의 정수배로 환산되므로 이를 통해 제한이 가능하다.

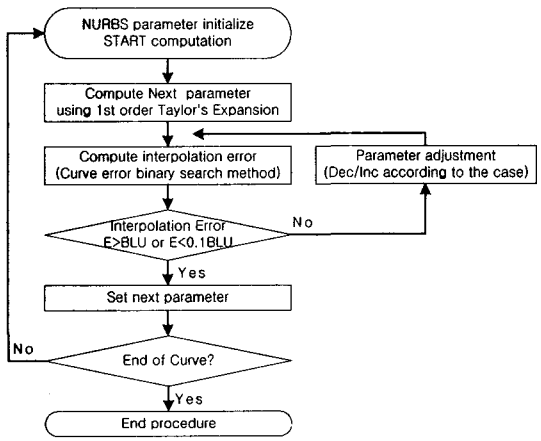


Fig. 3 Interpolation point search algorithm

계산된 형상오차에 대해 형상오차가 BLU를 초과하는 경우와 BLU 미만인 경우 Fig.3의 알고리즘에 의해 Taylor 시리즈의 1차 근사에 의한 매개변수를 조정하게 된다. 조정된 매개변수에 대해 위의 과정을 반복함으로써 형상오차가 특정 범위 안에 수렴하는 점을 최종 보간점으로 결정하게 된다.

CNC에서 형상보간을 위한 기준은 엔코더와 같은 위치 피드백 장치의 해상도로부터 결정되는 BLU가 된다. 기계의 이송 단위에 해당하는 BLU 이하의 연산정밀도는 실제 의미가 없기 때문에 BLU를 기준으로 형상보간 범위를 정하고 위의 과정을 반복함으로써 전체 구간에 대해 일정 범위의 형상오차를 가지는 미소 직선 형태로 NURBS 곡선을 1차 보간할 수 있다. 이렇게 형성된 1차 보간 결과에 대해 2단계로 피이드를 고려한 직선보간을 수행함으로써 자유곡선에 대한 정밀 보간을 수행할 수 있게 된다. Fig.4는 2단계 보간의 과정을 나타낸다.

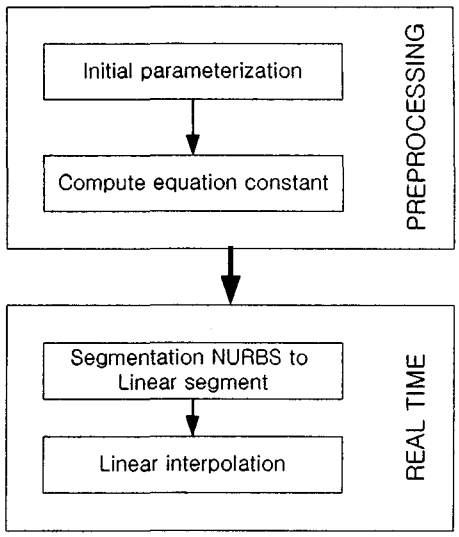


Fig.4 2-Stage NURBS interpolation procedure

5. 알고리즘의 적용과 구현결과

제안된 2단계 보간 알고리즘과 형상오차를 고려하지 않은 기존의 방법에 의한 차이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 결과를 비교해보았다. 식(20)은 시험을 위한 NURBS 곡선의 정보이다. 제어점에 대한 가중치는 균등하게 부여되었다.

$$p=3$$
$$U=\{0,0,0,1,2,2.5,3,4,5,5,5\} \quad (20)$$
$$C=\{\{0,0\},\{5,0\},\{5,5\},\{10,7.5\},\{15,7.5\},\{20,5\},\{20,0\},\{25,0\}\}$$

Fig.5는 각각 식(20)으로 정의되는 NURBS 곡선의 형상과 곡선의 기울기(Tangent), 곡률(Curvature)을 매개변수의 범위에 대해 계산하여 나타낸 그림이다. NURBS의 특징인 차수에 따른 곡선의 연속성이 나타나 있음을 알 수 있다. NURBS에 사용된 차수에 따라 곡선의 1차 미분, 2차 미분값에 대한 연속성이 달라지는데 보통 2차까지의 연속을 만족하는 형태를 많이 사용하게 된다. Fig.6은 NURBS 매개변수 u에 대한 Taylor시리즈 확장의 1차항만을 고려하여 보간한 결과에 대한 시뮬레이션 결과이다. 전체 구간에 걸쳐 보간오차가 분포되어 있는 것을 알 수 있다.

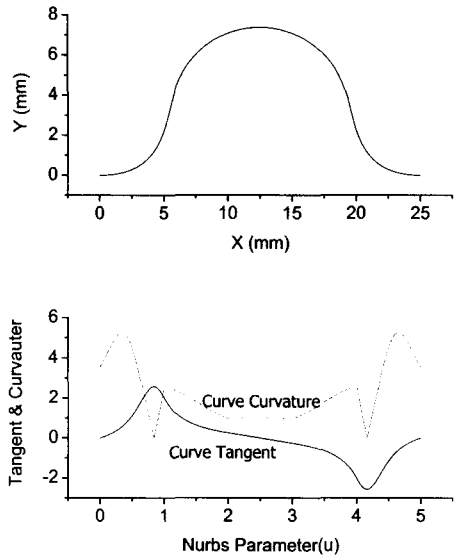
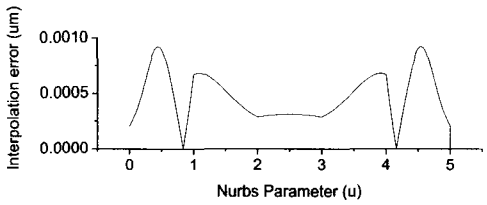
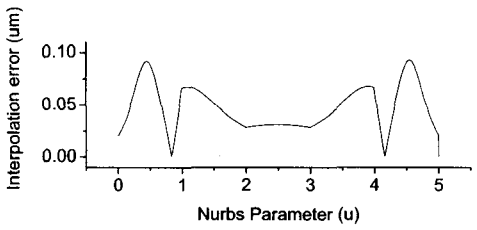


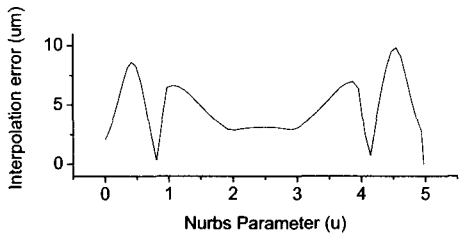
Fig. 5 Curve properties for simulation



(a) command feed: 10mm/min



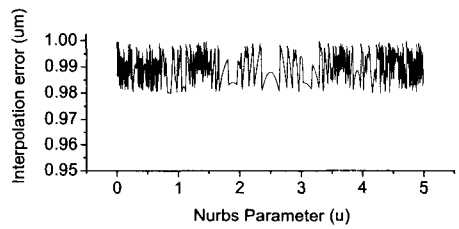
(b) command feed: 100mm/min



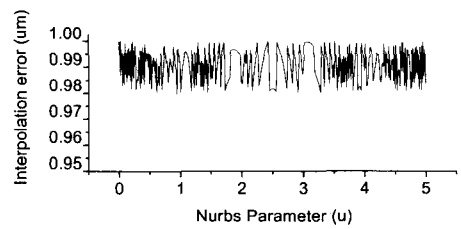
(c) command feed: 1000mm/min

Fig. 6 Interpolation error simulation results

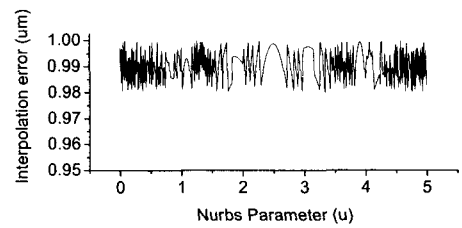
이송속도(feed rate)에 따라 그 크기가 변함을 알 수 있는데 오차의 양에 상관없이 각 경우 모두 곡선의 곡률과 비슷한 모양의 보간 오차를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 곡률과 보간오차 사이의 연관성을 나타낸다. 이러한 원인은 곡선의 기울기가 급하게 변하는 구간에서도 이송속도에 대한 고려만을 함으로써 보간 오차가 증대되기 때문이다. 이송속도가 큰 경우에는 보간 오차가 기계 BLU값을 넘어서고 있기 때문에 가공 오차가 크게 나타날 수 있다. 이송속도가 크지 않은 경우에도 곡률에 따라 보간 오차의 크기에 대한 변동이 존재하는데 어차피 BLU 단위이하의 움직임은 의미가 없는 움직임이 되기 때문에 불필요한 연산과정이 많음을 알 수 있다.



(a) Feedrate 10mm/min



(b) Feedrate 100mm/min



(c) Feedrate 1000mm/min

Fig. 7 Simulation result for proposed algorithm

Fig.7은 제안된 2단계 보간법에 의한 시뮬레이

션 결과이다. 앞서의 경우와 달리 전체 구간에 대해 보간 오차가 균등하게 분포되어 있는 것을 알 수 있으며 또한 이송속도의 변동과 곡률 변동에도 보간 오차가 BLU 단위를 넘어서지 않고 있음을 알 수 있다. 2단계의 보간 과정에서 기하학적인 보간 기준과 동적인 보간 기준을 각각 만족하기 위한 연산과정의 적용이 유효함을 나타내고 있다.

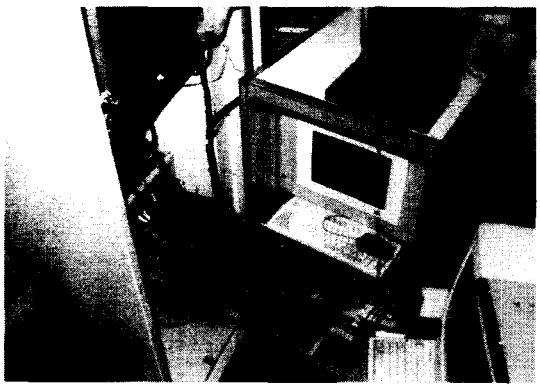


Fig. 8 Developed prototype open-CNC for Wire-EDM

시뮬레이션을 통해 확인된 2단계 보간 알고리즘을 개발된 프로토타입 시스템에 적용시켜 실제 동작 및 가공 성능을 확인하였다. 제안된 보간 알고리즘은 기존의 일반적인 보간 방법에 비해 정확한 계산이 가능한 반면에 연산시간이 길기 때문에 실제 실시간 시스템에서의 적용을 통한 확인이 필요하다. Wire-EDM의 경우 가공 이송속도가 절삭가공기에 비해 상당히 느리기 때문에 샘플링 주기로부터 발생하는 프로세서의 부하에 대한 여유가 크다. 따라서 이의 적용이 가능하게 된다.

Fig.9는 프로토타입 시스템에 적용된 2단계 NURBS 보간 알고리즘을 통해 실제 가공된 가공시편의 결과물이다. 수치제어를 위한 내부 알고리즘에서 반복연산과정이 들어감에 따라 연산시간과 가공시간사이에 차이가 발생할 수 있는 가능성이 있으나 프로토타입에 사용된 하드웨어 성능으로도 그러한 문제 없이 충분히 가공이 가능함을 알 수 있다. Wire-EDM이 적용되는 분야에 있어 가공물의 높이가 본 실험에 사용된 시편에 비해 두꺼운 경우가 대부분이므로 이러한 경우 실제 가공속도는 본 실험에서보다도 더 느려지게 되므로 제안된 알고리즘이 충분히 적용가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 9 Picture of machined workpice by prototype Wire-EDM system

6. 결 론

본 연구에서는 기존 개방형 제어장치 관련 연구에서 거의 다루어지지 않았던 Wire-EDM을 위한 개방형 수치제어 장치를 위한 정밀NURBS보간에 대해 연구를 수행하였으며 이를 통해 다음의 결과들을 얻을 수 있었다.

첫째, CNC에서의 NURBS 보간시 급격한 곡률 변화와 변곡점 등의 특이점이 존재하는 경우 매개변수 확장 근사법을 직접 적용하는 경우 불규칙한 보간오차가 존재하는 것을 에러모델과 컴퓨터시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

둘째, 저속 이송시스템의 특성을 고려하여 고정밀의 보간이 가능한 NURBS용 다단보간 방법을 제안하였으며, 이를 통해 전 구간에 대해 일정한 오차를 유지할 수 있음을 보였다.

제안된 알고리즘의 확인을 위해 상용 시스템에 대한 리트로핏과 시험가공을 통해 고정밀 제어를 위한 반복연산 기반의 알고리즘이 실시간으로 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Chou, J. and Yang, D.C.H., "Command generation for 3-axis CNC machining," ASME, J. Eng. Indust., Vol.13, pp.305-310, 1991.
2. Kiritsis, D., "High Precision Interpolation Algorithm for 3D Parametric Curve Generation," CAD, Vol.26, No.11, pp.850-856, 1994.

3. Zhang, G. and Greenway, R. "Development and Implementation of a NURBS Curve Motion Interpolator," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 14, pp. 27-36, 1998.
4. Hillaire, R., Marchetti, L. and Wright, P.,"Geometry for Precision Manufacturing on an Open Architecture Machine Tool (MOSAIC-PC)," Proceedings of the ASME, MED-Vol. 8, pp. 605-610, 1998.
5. Yeh, S. and Hsu, P., "The Speed-controlled Interpolator for Machining Parametric Curves," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 349-357, 1999.
6. Junkar, M. and Valentin, I., "Towards Intelligent Control of Electrical Discharge Machining," Proceedings, 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Berkley, California, pp. 442-447, 26-28 May, 1998.
7. Dauw, D. F., "High-precision wire-EDM by online wire positioning control," CIRP Annals Vol. 43, No. 1, pp. 193-197, 1994.
8. Koren, Y., Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, pp.134-141, 1983.
9. Altintas, Y., Manufacturing Automation, Cambridge univ. Press, 2000.
10. Piegl, L. and Tiller, W., The NURBS Book, Springer, 1995.
11. Fujita, S. and Yoshida, T., "OSE: Open system Environment for Controller - Development of an Open Architecture CNC with OSEC Specification," 7th IMEC, pp. 234-244, 1996.
12. Matsuka, H. and Sawada, C., "Japanese PC-based Open Control Systems for Manufacturing Equipment," International Journal of Japan Society for Precision Engineer, Vol. 30, No. 3, pp 204-209, 1996.
13. Sperling, W. and Lutz, P., "Designing Application for an OSACA Control," Proceedings of the ASME, MED-Vol .6-1, pp. 91-104, 1997.
14. Yang, M., Hong, W. and Choi, J., "New Interpolation Algorithm for Retrofitted NC," Third International Conference on Manufacturing Technology, pp.362-367, 1995.
15. Yang, M., Hong, W. and Lee, E., "Simultaneous 3D Machining with Real-Time NURBS Interpolation," J. of the KSPE, Vol.19, No.5, pp.89-94, 2002. 05.