

## 보간 길이 최적화에 의한 5축밀링 가공속도 향상

소범식\*, 정용호\*\*

### Machining Speed Enhancement for 5-Axis Milling by Step Length Optimization

So, B.S.\* and Jung, Y.H.\*\*

#### ABSTRACT

In this paper, an NC data optimization approach for enhancing 5-axis machining speed is presented. It is usual to use expensive commercial CAD/CAM programs for NC data of 5-axis machining, since it needs very large calculations for optimal tool positioning and orientation, tool path planning, and collision-free tool path generation. Since commercial CAD/CAM systems have similar functions and efficiency based on common algorithms of reliable theories, they do not have their own unique features for machining speed and efficiency. In other words, most commercial CAD/CAM systems consider only the characteristics of part geometry to be machined, which means that they generate almost the same NC data if the part to be machined is the same, even though different machines are used for the part. A new approach is proposed for optimizing NC data of 5-axis machining, which is based on the characteristics of the machine to be operated. As a result, the speed of 5-axis machining can increase without losing machining accuracy and surface quality.

**Key words** : 5-axis, Machining speed, Machine characteristics, Feed angle, CAD/CAM

#### NOMENCLATURE

- $\theta_i$  : Feed angle between the i-th and (i+1)-th NC blocks.  
 $S_i$  : step-length between the i-th NC block.  
 $r_i$  : Radius of curvature at the i-th NC block.  
 $X_i, Y_i, Z_i$  : Location data of the cutter at the i-th NC block.  
 $A_i, B_i, C_i$  : Orientation data of the cutter at the i-th NC block.  
 $v_i$  : Unit velocity vector of the cutter at the i-th NC block.  
 $H_i$  : Ratio between translational and rotational motion during the i-th NC block.  
 $\theta_i^T$  : Translational feed angle at the i-th NC

- block.  
 $\theta_i^R$  : Rotational feed angle at the i-th NC block.  
 $\theta_{OPT}^T$  : Optimal feed angle for Translational motion.  
 $\theta_{OPT}^R$  : Optimal feed angle for Rotational motion.

#### 1. 서 론

5축 가공은 3축 가공에 비해 추가적으로 장착된 두 개의 회전축으로 인해 공구의 자세를 적절하게 취할 수 있다. 따라서 3축 기계에서는 가공이 어려운 형상을 정밀하게 가공할 수 있을 뿐 아니라 공작물의 장착 횟수를 줄일 수 있으며, 또한 가공면의 품질을 높일 수 있기 때문에 생산성을 높일 수 있는 가공 기술이다. 최근의 5축 가공에 대한 연구는 공구 경로의 생성, 효율적인 공구자세, 충돌 및 간섭 방지 등 전통적인 5축 가공에 대한 연구에서 벗어나 5축 가공의 효율과 가공면의 품질을 높이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

\*부산대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*교신저자, 종신회원 부산대학교 기계공학부

- 논문투고일: 2006. 10. 17

- 심사완료일: 2006. 10. 30

Yazar 등이 절삭부하를 기준으로 3축 가공의 이송 속도를 최적화하는 연구<sup>11)</sup>를 제안한 이후, 절삭부하나 절삭불륨을 기준으로 이송속도를 계획하는 연구가 다양하게 진행되었으며, 그 결과 최근 몇몇 상용 CAM 시스템에서 이러한 연구 결과를 응용하여 5축 NC 데이터의 최적화 기능을 제공하고 있다. 그러나 이러한 방법은 지령된 이송속도와 실제 이송속도와의 차이를 고려하지 않기 때문에 일반적으로 지령된 이송속도와 실제 이송속도의 차이가 많은 고속 가공에서는 적용되지 않고 있다. 한편 동작의 효율을 높이기 위해 컨트롤러의 보간 알고리즘과 관련해서도 많은 연구가 있었다. 곡면가공에서 가공데이터가 짧은 직선 요소로 구성되어 있기 때문에 발생하는 이송속도의 불균일 문제와 실시간으로 과도한 양의 가공 명령(NC block)을 처리해야 하는 문제가 있는데, Han 등은 이송속도를 일정하게 하기 위해 선행 선독(look-ahead interpolation) 기능을 기반으로 하는 고속 가공 알고리즘을 개발하였다<sup>12)</sup>. 그러나 5축 가공에서는 3축 가공에서는 고려할 필요가 없었던 회전 동작이 포함되어 있기 때문에 기존의 3축 가공의 속도를 향상하는 방법을 그대로 적용할 수는 없다. 따라서 5축 가공에서 서로 독립적인 이송 동작 속도와 회전 동작 속도를 보간하여 동작 속도와 품질을 향상시키는 방법에 대한 연구가 진행되었다. Sarma는 부적당한 각속도에 의해 발생하는 저 품질 가공 면을 개선하기 위해 회전 동작 속도를 고려한 5축 동작 보간 방법을 제안하였다<sup>13)</sup>. Fleisig는 Wang 등에 의해 연구되었던 Nearly arc-length parameterized quintic-spline interpolation<sup>14)</sup>을 다축 가공에 적용하였으며, 공구의 등속 이송과 등속 자세 변화들 동시에 만족하는 보간 알고리즘을 제안하였다<sup>15)</sup>. Xu는 다축 가공에서의 기본 공구 궤적을 평면 곡선으로 생각하여 평면 음함수 곡선에 대해 이송 보간과 회전 보간을 전이함수를 이용하여 동시에 다루었다<sup>16)</sup>. Xua는 곡면과 곡면에 만나는 교선의 bi-parameter curve를 이용한 angular interpolator를 제안하였으며, 동시에 컨트롤러의 보간 알고리즘에서 사용되던 테일러 급수에 대한 절단 오차 문제를 극복하였다<sup>17)</sup>. 한편, 고속가공에서 발생하는 과도한 양의 가공 명령을 처리해야 하는 문제를 해결하기 위한 연구가 있었는데, Cheng 등은 기존의 공구경로를 NURBS 보간 곡선식으로 변환하고 이 곡선식의 매개변수를 NC 데이터 형식으로 적용하여 가공 속도를 높일 수 있음을 보였다<sup>18)</sup>. 그러나 대부분 가공 데이터는 기존의 직선과 원호로 구성된 NC 데이터 형식을 취하고 있기 때문에 NURBS 가공은 아직 널리 적용되지 못

하고 있다.

5축 가공에서 가공 경로를 변경하지 않고 속도와 동작의 효율을 높이기 위해 컨트롤러에 대한 많은 연구가 있었으며, 그 결과 최근에는 다양한 특성을 가진 우수한 성능의 컨트롤러가 출시되고 있다. 반면에 NC 데이터의 최적화에 대한 연구는 대부분 지령 이송 속도만을 최적화 대상으로 하고 있으며, 지령 이송속도와 실제 이송속도의 차이가 많은 5축 고속가공에는 효과적으로 적용되지 못하고 있다.

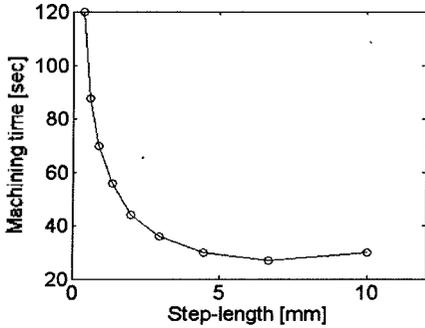
한편, 보간 길이(step-length)는 정밀도와 가공 데이터 양에 영향을 줄 뿐 아니라 컨트롤러의 가공속으로 인한 공구의 동작에도 영향을 주는 요소이다. 본 연구에서는 이와 같은 5축 고속 가공 기계와 컨트롤러의 동작 특성을 고려하여 보간 길이를 최적화함으로써 가공 속도를 향상하고 고품위 가공면을 생성 생성할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

## 2. 5축 가공속도에 영향을 주는 요소

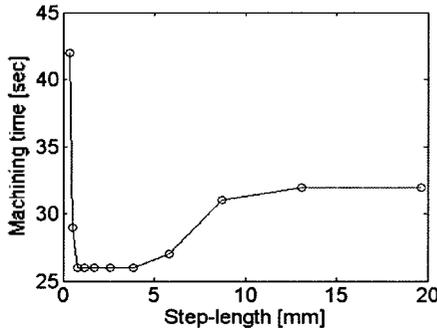
일반적으로 5축 기계 가공의 이송 속도는 가공 부하나 가공면의 품질, 생산성 등을 고려하여 적절한 이송 속도를 설정하여 NC 프로그램을 생성하게 된다. 그러나 실제 5축 공작 기계의 이송속도는 지령된 이송속도를 따라가지 못하는 경우가 있고, 이 경우 계획된 가공 시간과 가공 품질을 기대할 수 없다. 5축 가공의 이송 속도에 영향을 주는 인자에는 지령된 이송 속도와 주축의 회전 속도, 가공 경로와 가공 부하 등이 있다. 본 연구에서는 이 외에도 5축 고속 가공에서 지령된 이송속도와 실제 이송속도와의 차이를 발생시키는 원인을 분석하고 이를 고려한 속도 향상 방법을 개발하기 위해, 다음과 같은 인자들을 고려하였다.

### 2.1 Feed-angle

가공속도에 영향을 주는 요소는 여러 가지가 있지만 가공 경로에 관련된 것으로서 가공 궤적의 보간 길이와 곡률이 있다. 일반적으로 NC 프로그램의 보간 길이가 짧을수록 가공 정밀도가 높아지는 것은 잘 알려진 사실이다. 그러나 보간 길이가 짧은 경우 동일한 가공 궤적에 대해 더 많은 양의 NC 데이터를 필요로 하게 되며 컨트롤러는 이를 처리하기 위해 더 많은 연산 부하를 갖게 되고, 빈번한 가공속 동작을 발생하기 때문에 속도를 저하시키는 원인이 된다. 그러므로 Fig. 1(a)와 같이 가공 시간과 보간 길이의 관계는 반비례 관계가 성립한다.



(a) Machining time with classical controller



(b) Machining time with interpolating controller

Fig. 1. Machining time w.r.t. step length.

그러나 최근에는 대부분의 밀링 공작기계의 컨트롤러가 선행 선독 기능을 포함하고 있어서, 목표위치에 대해 지정된 공차범위를 만족하는 한 가감속을 줄이고 속도를 일정하게 유지하도록 한다. 따라서 보간 길이와 동작 시간과의 관계는 Fig. 1(b)와 같이 반비례 관계가 아닌 특정 보간 길이에 대해 최대의 속도를 가진다. Fig. 1에서의 그래프는 곡률이 일정한 궤적을 대상으로 하였지만 실제 가공 궤적에서의 곡률은 일정하지 않기 때문에 보간 길이와 곡률반경이 동시에 고려되어야 한다. 본 연구에서는 이러한 두 가지 요소를 동시에 고려하기 위하여 Feed-angle을 식 (1)과 같이 곡률반경에 대한 보간 길이의 비로 정의하였다.

$$\theta_i = \frac{S_i}{R_i} \quad (1)$$

## 2.2 가공 명령 처리 속도

기계의 동작제어를 담당하는 컨트롤러의 처리 속도와 제어 알고리즘은 그동안 꾸준히 향상되어 왔다. 특히 최근의 컨트롤러는 가공 명령 처리 시간은 1 ms 수준이며 이는 최대 1초에 1000개의 가공 명령을 읽

고 처리할 수 있음을 의미한다. NC 프로그램에서 이러한 컨트롤러의 가공 명령 처리 능력을 충분히 고려한다면 보다 정밀한 가공이 가능하다. 그러나 반대로 컨트롤러의 성능이 충분하지 못함에도 불구하고 짧은 보간 길이와 높은 이송속도가 지령된다면 지령된 이송 속도로 동작하지 못할 뿐만 아니라 불연속적인 동작으로 인해 좋은 가공결과를 기대할 수 없다. Fig. 1(b)의 그래프의 좌측에서 가공 시간이 증가되는 것도 이러한 이유 때문이다. 그러므로 가공 명령 처리 시간은 가공 속도를 제한하는 가장 우선적인 요소이며, NC 데이터는 컨트롤러의 가공 명령 처리 능력 보다 적은 개수의 가공 명령으로 구성되어야 한다.

## 2.3 연속 동작을 위한 기계의 가감속 성능

최근의 공작기계 서보모터는 고속의 동작을 위해 그 성능이 점점 높아지고 있으며 이것은 컨트롤러의 성능과 별개인 기계의 성능으로서 가공의 속도에 영향을 주는 중요한 요소이다. Fig. 1(b)의 그래프 우측에서 가공 시간이 증가되는 이유는 바로 이러한 가감속 성능이 충분하지 못하기 때문이다.

## 2.4 회전 동작에 대한 이송 동작의 비율

5축 공작 기계의 이송과 회전 동작을 위한 각각의 서보 모터의 용량과 기어비가 서로 다르기 때문에, 하나의 가공 명령을 수행하는 동안 이송 동작의 속도와 회전 동작의 속도가 서로 다를 수 있다. 따라서 이 두가지 속도가 최종적인 가공 속도에 영향을 미친다. 본 연구에서는 5축 가공의 이송동작과 회전 동작을 복합적으로 고려하기 위해 하나의 가공 명령을 수행하는 동안 회전변위에 대한 이송변위의 비율을 식 (2)와 같이 정의하였다. 이 비 값은 최고의 가공 속도를 결정하기 위한 최적의 feed-angle을 결정하는데 사용된다.

$$H_i = \frac{S_{t,i}}{S_{r,i}} = \frac{\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}}{\sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta C^2}} \quad (2)$$

## 3. NC 데이터 최적화

5축 가공에서 가공 경로를 변경하지 않고 가공 속도를 높이기 위한 여러 가지 방법들이 제안되고 있으나, 본 연구에서는 5축 고속 가공 기계와 컨트롤러의 동작 특성을 고려하여 가공 경로 상의 보간 길이를 최적화함으로써 가공 속도를 향상하고 고품위 가공 면을 생성할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 5축 가공의

가공 궤적은 일반적으로 직선 경로 보다는 곡률의 변화가 많은 경로가 일반적이다. 곡률의 변화가 많은 가공 경로의 경우, 동일한 가공 경로를 따라 가공하더라도 가공 명령 사이의 보간 길이가 다르면 공작 기계의 운동 방향이 변하게 된다. 공작 기계의 운동 방향의 변화는 곧 공작 기계의 가속도의 변화를 의미하므로, Fig. 1의 (b)와 같이 최적의 보간 길이로 가공 명령을 생성하면 그 공작 기계는 최고의 속도로 가공하게 된다. Fig. 2는 본 연구에서 제시하고 있는 보간 길이의 최적화 과정을 나타내고 있다.

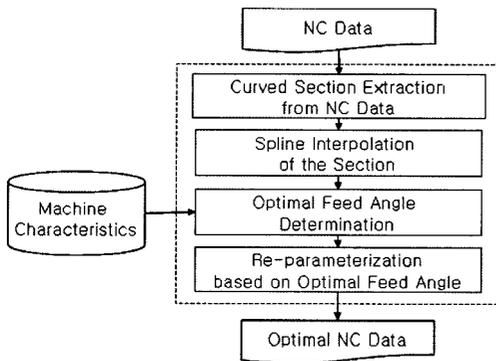


Fig. 2. Schematic diagram of NC data optimization.

먼저 NC 데이터에서 연속의 곡선 구간을 추출하고 스플라인 보간을 이용하여 곡선식으로 만든다. 또한 이 구간에 대해 동작의 속도를 좌우하는 독립적인 변수를 구하고 이를 이용하여 미리 측정된 특성 데이터베이스로부터 최적의 feed-angle을 구한다. 마지막으로 최적 feed-angle을 기준으로 보간 곡선 상에 새로운 NC 데이터를 생성함으로써, 기계와 컨트롤러의 특성을 고려하여 최고의 속도를 낼 수 있는 가공 명령을 생성한다.

### 3.1 연속 곡선구간의 선택

본 연구에서 보간 길이를 조절하는 대상이 되는 공

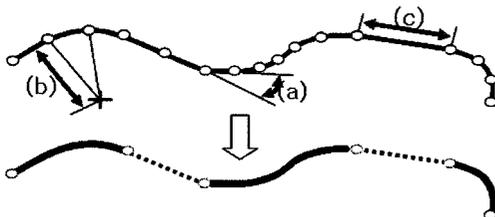


Fig. 3. Curved section extraction from the given NC data.

구 경로는 직선 구간이 아닌 곡선구간이다. 만약 곡선 구간이 아닌 직선이나 보서리에 대해 보간 길이를 변경할 경우 심각한 궤적오차를 발생시킬 수 있기 때문에 부드러운 곡선 구간의 선택은 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 곡선 구간을 선택하는 방법으로 식 (3)-(5)에 나타낸 것처럼 세 가지 조건을 이용하였다.

(a) Feed-angle condition

$$\theta_i = \text{acos}(v_i \cdot v_{i+1}) < \theta_c \quad (3)$$

(b) Curvature radius condition

$$r_{\min} < r_r < r_{\max} \quad (4)$$

$$\text{where, } r_i = \frac{|v_i| |v_{i+1}|}{2|v_i \times v_{i+1}|} (|v_i| |v_{i+1}|)$$

(c) Step-length condition

$$S_i = |p_{i+1} - p_i| \leq \sqrt{8} r_i e_{\max} \quad (5)$$

식 (3)은 공작 기계의 진행 방향이 급격히 변화하는 지점을 찾는 조건으로서, 이러한 점의 위치를 변경하면 많은 가공 오차를 야기할 수 있다. 따라서 Fig. 3 (a)와 같이 이러한 점의 전, 후의 가공 명령 지점들을 분리하여 연속 구간으로 선택한다. 식 (3)에서 feed-angle( $\theta_c$ )의 값은 공작 기계의 가속도 특성에 따라 다르게 지정할 수 있는데, 본 연구에서는 경험적으로 0.21을 사용하였다. 식 (4)는 연속한 세 점에서 계산된 곡률반경이 너무 크거나 작지 않도록 하는 조건식이다. 이는 곡률 반경이 너무 작거나 커서 부드러운 곡선으로 간주하기 어려운 경우를 제외하기 위한 조건식이다. 본 연구에서는  $r_{\min}$  값으로 공구의 반경을 택하였으며,  $r_{\max}$  값으로 가공할 공작물의 최대 길이를 택하였다. 식 (5)는 가공 명령의 보간 길이가 너무 긴 경우를 배제하기 위한 조건식이다. 보간 길이가 너무 긴 경우를 곡선 보간하면 오히려 오차를 야기할 수 있기 때문이다. 식 (5)에서  $e_{\max}$ 는 CAM 시스템을 사용하여 NC 데이터를 생성할 때 설정한 허용 오차 값이다.

### 3.2 스플라인 보간

앞에서 선택된 곡선구간의 가공 명령들에 대해 보간 길이를 매개변수로 하여  $C^2$  연속을 만족하는 스플라인 보간<sup>1)</sup>을 수행하여 3차 다항식의 곡선식을 구한다.

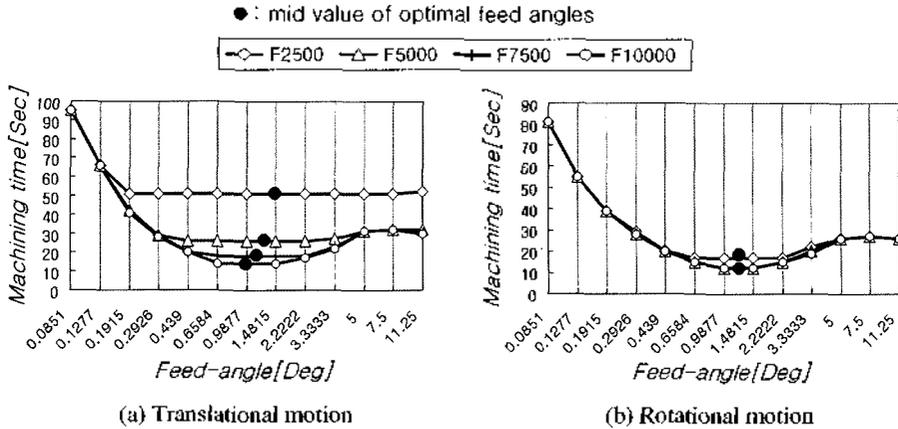


Fig. 4. 5-axis machining time vs. feed angle.

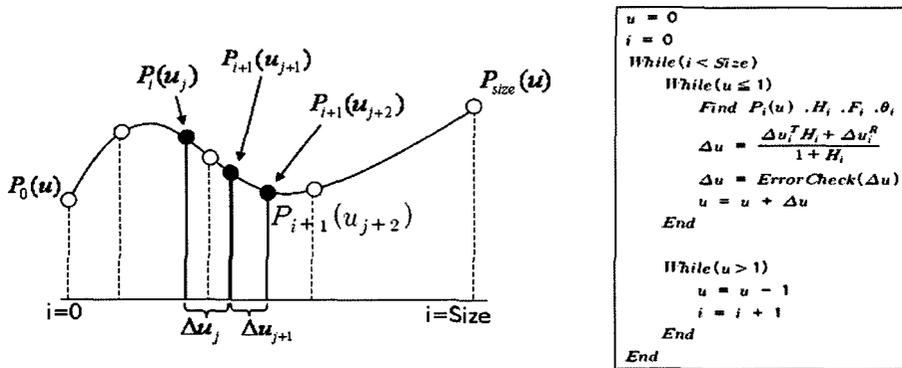


Fig. 5. New NC data generation algorithm by re-parameterization.

**3.3 최적 Feed-angle**

선행 선독 기능을 갖춘 최근의 공작 기계의 경우, Fig. 1(b)와 같이 가공 속도가 최대가 되는 최적의 feed-angle 값이 존재한다. 본 연구는 공작 기계가 최고의 속도를 내는 최적의 보간 길이를 갖는 가공 명령을 생성하는 것이 목적이므로, 주어진 공작 기계의 최적 feed-angle 값을 찾는 것은 매우 중요하다. 사용할 공작 기계의 동작 특성을 반영한 최적의 feed-angle 값을 찾기 위해, 5축 가공기의 이송 동작과 회전 동작에 대해 feed-angle 에 따른 가공 시간을 측정하였다. 실험 조건은 공작 기계가 무 부하 상태로 원형 궤적을 따라 가는 동안, 다양한 feed-angle에 따른 가공 시간을 측정하였다. Fig. 4는 이송 동작과 회전 동작에 대해 각각 측정된 결과를 나타내는데, 각 지령된 이송 속도에 대해 가장 적은 가공 시간을 나타내는 최적의 feed-angle 구간이 존재함을 알 수 있다. 또한 지령 이송속도가 높을수록 최적 feed-angle 구간의 폭이 좁아

지므로 보간 길이 최적화에 의한 속도향상은 더욱 효과적일 수 있다.

본 연구에서는 특성 그래프에서 최적의 feed-angle 구간의 중간값을 최적 feed-angle 값으로 선택하였으며, 이렇게 구한 최적 feed-angle 값으로 NC 데이터의 보간 길이를 최적화하게 된다.

**3.4 최적 NC 데이터의 생성**

앞에서 구한 최적의 feed-angle에 해당하는 보간 길이로 주어진 가공 궤적 상에 새로운 NC 데이터를 생성하면 최고의 가공 속도를 얻을 수 있다. 보간 길이가 수정된 새로운 NC 데이터는 스플라인 보간식에서 매개변수의 간격을 재조정함으로써 구할 수 있다.

그런데 Fig. 4의 (a)와 (b)에서와 같이, 5축 공작 기계의 이송과 회전 동작은 서로 독립적인 동작이므로, 이송과 회전 동작에 대해 구한 최적 feed-angle 값이 서로 다를 수 있다. 이 경우 새로운 NC 데이터

의 보간 길이를 구하는데 직접 사용될 수 없다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 가공 명령마다 회전에 대한 이송 동작의 비율( $H_i$ )을 구하고, 이를 이용하여 이송과 회전이 동시에 고려된 매개변수의 간격을 식 (6)과 같이 구하였다.

즉, Fig. 5와 같이 각 보간식의 매개변수  $u$ 가 0에서 1 사이에서 정의되어 있을 때, 식 (6)으로 구한 새로운 매개변수의 증분 값으로 주어진 가공 궤적 상에 새로운 NC 데이터를 생성한다. 이러한 과정을 매개변수가 1을 넘지 않는 동안 계속하여 새로운 NC 데이터를 생성한다. 매개변수가 1을 넘는 경우, 다음 구간에서의 매개변수 값을 구하여 새로운 NC 데이터를 생성함으로써, 전체 연속 구간의 가공 명령에 대해 보간 길이를 수정할 수 있다. 결과적으로 새롭게 생성된 NC 데이터는 공구 경로가 변하지 않으면서 보간 길이만 최적 feed-angle을 갖는 NC 데이터가 생성된다.

$$\Delta u = \frac{\Delta u_i^T H_i + \Delta u_i^R}{1 + H_i} \quad (6)$$

where,  $\Delta u_i^T = \frac{\theta_{OPT}^T}{\theta_i^T}$ ,  $\Delta u_i^R = \frac{\theta_{OPT}^R}{\theta_i^R}$

#### 4. 적용 및 결과

제안된 알고리즘을 실제의 경우에 적용하기 위해, 스위스의 MIKRON사<sup>10)</sup>의 UCP710 모델의 5축 밀링 가공기를 이용하여 실험을 수행하였다. 사용된 5축 가공기는 금형 가공 분야에 가장 널리 사용되는 테이블과 주축이 회전하는 형식이다.

제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 상용

CAD/CAM 프로그램에서 생성한 NC 데이터와 본 연구에서 제안한 알고리즘으로 최적화시킨 NC 데이터에 대해 각각의 가공 시간을 측정하고, 측정된 결과를 Table 1에 나타내었다.

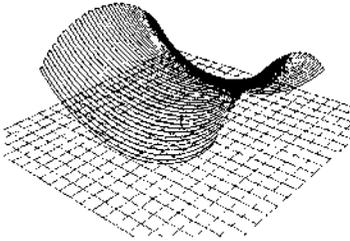
측정 대상은 대표적인 5축 가공 제품인 impeller와 안장 곡면이다. impeller의 경우, 상용의 CAD/CAM 시스템을 사용하는 경우 약 1390초가 소요되었으나, 본 연구에서 제안한 알고리즘으로 최적화된 NC 데이터를 사용하는 경우 약 580초가 소요되었다. 안장 곡면의 경우, 상용의 CAD/CAM시스템의 경우 약 429초가 소요된 반면, 본 연구의 방법을 사용하는 경우 약 319초가 소요되었다.

#### 5. 결 론

일반적으로 공작기계는 다양한 형식으로 제작되며, 사용되는 컨트롤러의 종류와 서보 모터의 용량 및 기어의 감속비 등이 서로 달라 기계적인 가감속 성능과 같은 하드웨어적인 특성이 다르다. 그러나 상용의 CAD/CAM시스템은 이러한 공작 기계의 특성을 고려하지 않고, 가공할 공작물의 기하학적 형상만을 고려하여 NC 데이터를 생성한다. 따라서 이렇게 생성된 NC 데이터는 사용될 공작 기계의 특성이 고려되지 않았기 때문에 공작기계의 성능을 충분히 사용하지 못하거나 실제 가공속도가 지정속도를 따라가지 못하여 만족할만한 가공 속도를 얻을 수 없다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 5축 공작기계의 동작 특성을 고려하여 5축 가공의 속도를 향상시킬 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 적용 실험을 통하여 기존의 상용 CAD/CAM 프로그램 보다 약 25% 이상의 속도 향상효과

Table 1. Application results

Tool path		
Methods	Impeller (F10000)	Saddle (F5000)
Commercial program (UniGraphics)	1390 seconds	429 seconds
Proposed algorithm	580 seconds	319 second

를 보였으며, 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Yazar, Z., Koch, K. F., Merrick, T. and Altan, T., "Feed Rate Optimization based on Cutting Force Calculations in 3-axis Milling of Dies and Molds with Sculptured Surfaces", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. 3, pp. 365-377, 1994.
2. Han, G. C., Kim, D. I., Kim, H. G., Nam, K., Choi, B. K. and Kim, S. K., "A High Speed Machining Algorithm for CNC Machine Tools", *IECON 99 Proceedings of the 25th Annual Conference of the IEEE*, pp. 1493-1499, 1999.
3. Sarma, R. and Rao, A., "Discretizers and Interpolators for Five-Axis CNC Machines", *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME - Transactions of The ASME*, Vol. 122, pp. 191-197, 2000.
4. Fleisig, R. V. and Spence, A. D., "A Constant Feed and Reduced Angular Acceleration Interpolation Algorithm for Multi-axis Machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 33, pp. 1-15, 2001.
5. Wang, F. C. and Yang, D. C. H., "Nearly Arc-length Parameterized Quintic-spline Interpolation for Precision Machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, pp. 281-288, 1993.
6. Xu, H. Y., "Linear and Angular Feedrate Interpolation for Planar Implicit Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 301-317, 2003.
7. Xua, H. Y., Zhoua, Y. H. and Zhangb, J. J., "Angular Interpolation of Bi-parameter Curves", *Computer-Aided Design*, Vol. 35, pp. 1-10, 2003.
8. Cheng, M. Y., Tsai, M. C. and Kuo, J. C., "Real-time NURBS Command Generators for CNC Servo Controllers", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 801-813, 2002.
9. Lee, K., "Principles of CAD/CAM/CAE Systems", 1st ed., Addison Wesley Longman, Inc., 1999.
10. Mikron Technology Group, <http://mikron.com>



### 소 범 식

1997년 영남대학교 기계공학부 학사  
1999년 영남대학교 기계공학부 석사  
2000년~현재 부산대학교 기계공학부 박사과정  
관심분야: System modeling and simulation, 5-axis high-speed machining, Software engineering, CAD/CAM



### 정 용 호

1983년 부산대학교 기계공학 학사  
1990년 서울대학교 기계설계학과 석사  
1993년 서울대학교 기계설계학과 박사  
1993년~1996년 삼성항공(주) 수석 연구원  
1996년~현재 부산대학교 기계공학부 교수

관심분야: Geometric Modeling, 5-axis high-speed machining, Assembly Modeling, CAD/CAM