

본 연구 논문은 '94년도 한국 과학 재단 핵심 연구 지원에 의하여 수행 되었음

# 자유 곡면의 3 축 NC 가공을 위한 초기 공정 계획 기능의 자동화

강 재 관\*

## Automated Initial Process Planning System for Three-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces

Jae-Kwan Kang\*

### ABSTRACT

In this paper, the automated initial process planning for 3-axis NC machining of sculptured surfaces is presented. The solution algorithms determining three process planning functions, i.e. machining feasibility, setup orientation and feasible machine selection are developed. The machining feasibility is determined by means of BSM(Binary Spherical Map) which derives its solution quickly in algebraic form, and the setup orientation is determined so that the cutting force is minimized. Finally, the feasible machine is determined by computing the minimum motion ranges of each control axis. The developed algorithms are tested by numerical simulations, convincing they can be readily implemented on the CAD/CAM system as a process planner.

**Key Words :** Process planning(공정 계획), Machining feasibility(가공 가능성), Cutting force prediction(절삭력 예측), Setup orientation(셋업 자세), Machine selection(기계 선정).

### 1. 서론

공정 계획이란 소재로부터 제품을 경제적, 효율적으로 생산하는데 필요한 체계적인 제조 공정의 결정으로 정의된다<sup>(1)</sup>. 공정 계획의 수행은 지금까지 대부분 공정 계획 전문가에 의존했으나 다품종 소량 생산에 따른 잦은 공정 계획의 필요성, 산업 발달에 따른 다양하고 복잡한 형상에 대한 공정 계획의 요구, 그리고 공정 계획 전문가의 부족 등으로 말미암아 공정 계획 기능을 자동화 시키려는

노력이 최근 크게 주목 받고 있다.

그러나 지금까지 공정 계획의 자동화는 대부분 구멍 가공이나 다면체 형상의 가공에 관한 연구가 대부분이고 자유 곡면에 관한 연구는 극히 제한적이다. 이는 자유 곡면의 경우 다면체 형상에 비하여 공정 계획 전문가에 의한 공정 계획 기능이 명확하지 않으며 또한 구멍이나 다면체 형상과 달리 형상의 표현 방법이 복잡 다양하여 공정 계획의 기초 단계인 형상의 인식부터가 쉽지 않음에 기인한다<sup>(2)</sup>. 그러나 자유 곡면 가공을 위한 공정 계획의 자동화

\* 경남대학교 산업공학과

도 고가의 NC 장비를 효율적으로 사용하고 가공 생산성을 향상 시킨다는 측면에서 반드시 해결해야 할 과제이다. 특히 자유 곡면은 복잡한 수학적식으로 정의되는 형상의 특성상 정확한 공정 계획은 컴퓨터로만 계산 가능하며 이는 기존의 공정 계획 전문가가 할 수 없었던 기능까지도 제공할 수 있음을 의미한다.

일반적으로 자유 곡면에 대한 설계 정보가 3 축 NC 가공에 필요한 제조 정보로 변환되기까지는 대략 Fig. 1 과 같은 공정 계획 기능의 단계를 거친다.

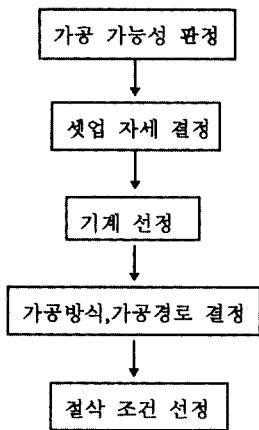


Fig. 1 The process planning procedure for 3-axis NC machining of sculptured surfaces

여기서 가공 가능성 판정이란 주어진 곡면에 3 축 가공 가능한가를 판정하는 것을 말하며 3 축 가공이 결정 되면 공구와 공작물 간의 셋업 자세를 결정하게 된다. 다음으로 결정된 셋업에 준하여 가공에 필요한 작업 범위를 고려하여 가공 가능한 기계를 선정하고 가공 방식, 가공 경로 등의 결정과 마지막으로 스피indle 회전 속도, 이송 속도 등 절삭 조건을 지정한다.

지금까지 자유 곡면의 NC 가공에 필요한 공정 계획에 관한 연구로는 Bezier 곡면의 3축 가공 가능성 판정에 관한 Tseng<sup>(3)</sup>, Kim<sup>(4)</sup>의 연구와 복잡한 자유 곡면의 다축 가공 가능성 판정과 필요한 셋업 회수 결정에 관한 Woo<sup>(5,6,7,8)</sup>의 일련의 연구들이 있다. 또한 일반적인 곡면에 적용할 수 있는 3 축 가공 가능 영역 계산 방법에 관한 Kim<sup>(9)</sup>의 연구와 자유 곡면의 다축 가공(3축, 4축, 5축) 시 필요한 공정 계획 기능의 자동화에 관한 Suh<sup>(10)</sup>의 연구가 있다. Kang<sup>(11)</sup>은 복잡한 형상과 주어진 5 축 머신

간의 가공 가능성 판정과 가공 시간을 최소화 하는 셋업 자세 결정 문제를 다루었고, Yoo<sup>(2)</sup>는 소재 형상으로부터 최종 파트 형상을 얻기까지 황삭, 중삭, 정삭시 공구 종류와 절삭 조건을 공구 데이터베이스로부터 자동으로 선정하는 문제를 다루고 있다. 또한 Park<sup>(12)</sup>는 자유 곡면 가공에 필요한 절삭 조건(스핀들 속도, 이송 속도)을 절삭 가공 핸드북 자료를 이용하여 결정하는 방법을 제시하였다.

그러나 지금까지 자유 곡면의 3 축 NC 가공을 위한 공정 계획의 전반적인 내용을 다룬 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구는 Fig. 1에서 보인 자유 곡면의 3 축 NC 가공을 위한 공정 계획 기능들 중 초기 세 단계 즉, 가공 가능성 판정, 셋업 자세의 결정, 그리고 기계 선정에 관하며 특히 절삭성을 고려한 셋업 자세 결정과 주어진 셋업을 지원하는 가공 가능한 기계를 선정하는 통일된 알고리즘을 개발하는데 연구의 초점을 맞춘다.

## 2. 가공 가능성의 판정

3 축 가공 가능성 판정에 관하여는 서론에서 설명하였듯이 그 동안 몇몇 연구가 이루어져 왔다. Tseng<sup>(3)</sup>과 Kim<sup>(4)</sup>은 가공 가능한 공구 접근 가능 영역을 계산하는 방법을 제시하였지만 곡면 모델을 Bezier 곡면 한 패치만 대상으로 한 문제점이 있다. 일반적인 곡면에 적용 가능한 근사 방법이 Kim<sup>(9)</sup>과 Suh<sup>(10)</sup>에 의해 제시되었는데 먼저 Kim<sup>(9)</sup>이 제시한 방법의 구체적인 절차는 다음과 같다.

곡면 가공에 사용되는 공구인 볼 엔드 밀은 가공 부위 가 공구 끝의 반구 부분이다. 따라서 곡면상의 임의의 점을 가공하기 위하여 접근할 수 있는 공구의 자세는 곡면 점에서의 법선 벡터와 수직을 이룰 때까지 가능하다. 즉 곡면 상의 한 점을 가공하기 위하여 접근 가능한 공구의 자세 집합은 그 곡면 점에서의 법선 벡터를 중심으로 반구(hemisphere)를 형성한다. 따라서 전 곡면에 대하여 공구 접근 가능 영역은 곡면의 각 점에서 구한 반구들의 최종 교집합을 계산함으로써 구해지고, 교집합이 공집합이면 가공 불가능, 공집합이 아니면 가공 가능으로 판정한다.

이 방법론을 구현하는 구체적인 절차는 곡면을 곡틀을 고려하여 삼각형 패치의 집합으로 근사 시킨 후 각 삼각형 패치의 법선 벡터에 대응하는 반구들의 교집합을 구상에서 직접 갱신해 나가는 방식이다. 그러나 이 방법은

계산이 구 상에서 이루어지기 때문에 알고리즘의 구현이 간단치 않고 3 축의 4, 5축 알고리즘으로의 확장이 용이하지 않은 단점이 있다.

이에 반하여 Suh<sup>(10)</sup>는 곡면 상의 임의의 점에 공구가 간섭 없이 접근할 수 있는 방향 벡터의 집합을 PVC(Point Visibility Cone)로 정의하고 곡면 상의 모든 점에 대응하는 PVC들의 합이 공집합인지 아닌지로 3 축 가공 가능성을 판정하였다. 특히 이 연구에서는 이 PVC를 실제 계산하는 방법으로써 Binary Spherical Map(이하 BSM으로 약함)이라는 새로운 개념을 사용하였는데 BSM이란 구를 Fig. 6(b)와 같이 잘게 분할하여 분할된 셀이 원하는 기하학적 영역에 속하면 0, 속하지 않으면 1로 표시함으로써 구 상의 기하학적 정보를 처리하기 쉬운 대수적 정보로 변환시키는 방법이다

PVC 개념은 3 축 외 4 축, 5 축에 관련된 여러 가지 문제를 통일된 방법으로 접근할 수 있게 해 주며 특히 BSM은 그의 대수적 특성으로 말미암아 개발된 알고리즘이 컴퓨터 상에 쉽게 구현될 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 3 축 가공 가능성 문제에 국한할 경우 PVC를 이용한 방법은 곡면의 모든 점에서 PVC를 계산해야 하는 비효율성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 Kim<sup>(9)</sup>의 방법을 BSM으로 구현하는 방법을 사용하며 이는 곡면의 각 점에서 PVC를 계산하는 부담을 줄임으로써 계산 시간을 상당히 단축하는 효과를 가져온다. BSM을 이용하여 3 축 가공 가능성을 판정하는 구체적인 절차는 다음과 같다.

먼저 분할된 구의  $j$ 번째 셀을  $BSM(j)$ 라 하고 초기 값으로 모두 0를 할당한다. 다음 분할된 곡면의  $i$ 패치에 대응하는 반구를 가정하면  $BSM(j)$ 는 다음과 같이 차례로 갱신된다.

$$BSM(j) = \begin{cases} 0, & \text{if } N_i \cdot C_j \geq 0 \text{ and } BSM(j) = 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $N_i$ 는 곡면의  $i$  패치의 법선 벡터를 그리고  $C_j$ 는 분할된 구의  $j$  번째 셀의 중심 벡터를 나타낸다. 그리고  $N_i \cdot C_j$ 는 접근 가능한 반구 부분과 불가능 영역을 판정하는 값이다. 분할된 곡면의 모든 패치에 대하여 BSM이 식 (1)에 따라 차례로 갱신되면 3 축 가공 가능성은  $BSM(j) = 0$ 를 만족하는 인덱스  $j$  값의 존재 여부로 결정된다. 즉 인덱스  $j$ 가 존재하면 가공 가능 그렇지 않으면 가공 불가능으로 판정한다. 지금까지의 절차를 요약하면 다음과 같다.

```

Procedure MachiningFeasibility
{
  Read in the surface model;
  Decompose the surface into a set of tringular patches and
    compute  $N_i, i \in [1:n]$ ;
  Decompose the unit sphere into a set of spherical triangular patches
    and compute  $C_j, j \in [1:m]$ ;
  Label  $BSM(j) \leftarrow 1, \forall j \in [1:m]$ ;
  while( $i \in [1:n]$ )
    while( $j \in [1:m]$ )
      if( $N_i \cdot C_j \geq 0$  and  $BSM(j) = 0$ )  $BSM(j) \leftarrow 0$ ;
  If there exists any index  $j$  satisfying  $BSM(j) = 0$ , then output "Feasible";
  Otherwise, output "Infeasible";
}

```

BSM을 이용하는 것은 Kim<sup>(9)</sup>의 방법에 비하여 해의 정확성이 떨어지는 단점이 있으나 구현이 간단하고 계산 속도가 빠르다는 장점을 가진다. 또한 해의 결과가 유한 개의 단위 벡터들의 집합으로 표현되기 때문에 해의 결과를 임의의 문제에 대한 탐색 공간으로 유용하게 이용할 수 있다. 본 연구에서도 다음절에서 논의하는 셋업 자세 결정에 BSM으로 표현된 장점을 이용한다. 즉  $BSM(j) = 0$ 를 만족하는 공구 자세 벡터  $C_j$ 들을 유한 개의 탐색 공간으로 이용하는 방법을 사용한다.

### 3. 셋업 자세의 결정

지금까지 자유 곡면 가공 시 공작물과 공구간의 셋업은 디자인된 형상 그대로를 이용하거나 작업자의 경험에 의존하여 적절히 셋업을 결정해 왔다. 그러나 자유 곡면 가공에 사용되는 볼엔드밀은 절삭 부위에 따라 절삭성에 큰 차이가 있기 때문에 셋업을 어떻게 하느냐에 따라 최종 가공 형상의 가공 정밀도가 다르게 된다. 특히 볼 중심은 절삭성이 매우 나쁘고 절삭 날의 파손이 잦기 때문에 볼 중심 주위를 이용한 가공은 가능한 한 피하는 것이 좋다.<sup>(13)</sup>

따라서 본 연구에서는 볼 중심 부위에 의한 가공을 줄이기 위하여 볼엔드밀의 절삭 부위에 따른 절삭력의 차이를 고려하여 가공에 필요한 절삭력의 크기가 최소가 되는 방향으로 셋업을 결정하는 방식을 사용한다. 이에 따라 먼저 공구와 공작물 간의 접촉 부위에 따른 절삭력을 계산한다.

#### 3.1 절삭 부위에 따른 절삭력의 예측

공구와 공작물 간의 접촉 부위에 따른 절삭력은 기존의 볼엔드밀 절삭력 예측 모델을 사용함으로 가능하다. 지금까지 엔드밀의 절삭력 예측 모델에 관한 연구는 많이 이루어졌으나 볼엔드밀에 관한 모델은 최근 들어 연구가 활발한 편이다<sup>(14, 15, 16)</sup>. 본 연구에서는 이들 모델들 중 Feng<sup>(16)</sup>의 연구 결과를 이용한다.

Feng은 볼엔드밀의 절삭 날을 Fig. 2와 같이 여러 개의 미소 절삭 날로 나누고 각각의 미소 절삭 날에서의 절삭 기구를 2 차원으로 근사하여 미소 절삭 날에서의 미소 절삭력을 구한 후에 이들을 절삭 날에 따라 적분함으로써 가공에 참여하는 부위가 필요로 하는 절삭력을 예측하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

먼저 n 개의 절삭 날이 있는 공구에서 i번째 공구 날의 공구 선단으로부터의 높이 값 z에서의 미소 절삭 날의 위치각(angular position)을 다음 식으로 계산한다.

$$\theta_i(\theta, z) = \theta - \frac{z}{R} \tan \beta - (i-1) \frac{2\pi}{n} \quad (2)$$

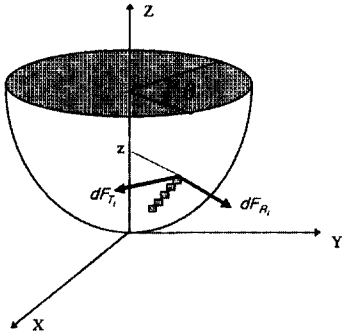


Fig.2 The geometry of ball-end mill

여기서  $\theta$  는 임의로 선택한 1번 절삭 날의  $Z = R$ 에서의 위치각을 나타내고,  $\beta$  는 공구날의 helix 각도를,  $R$ 은 공구 반경을 표시한다. 미소 절삭 날에 작용하는 접선 방향 미소 절삭력과 반경 방향 미소 절삭력은 미변형 칩의 두께에 의한 치수 효과를 고려하여 다음과 같이 절삭 폭과 미변형 칩의 치수 승으로 표현된다.

$$dF_T = K_T(z) dz [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_T} \quad (3)$$

$$dF_R = K_R(z) dz [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_R}$$

여기서 파라메터  $m_T, m_R$ 은 공작물 재질에 따른 상수이고,  $K_T(z), K_R(z)$ 은 위치 값 z에서의 미소 절삭 날의 국부 절삭력을 결정하는 비례 상수로서 일반적으로 다음과 같은 3차식으로 근사 된다.

$$K_T(z) = a_0 + a_1 \left(\frac{z}{R}\right) + a_2 \left(\frac{z}{R}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z}{R}\right)^3 \quad 0 \leq z \leq R$$

$$K_R(z) = c_0 + c_1 \left(\frac{z}{R}\right) + c_2 \left(\frac{z}{R}\right)^2 + c_3 \left(\frac{z}{R}\right)^3$$

$$K_T(z) = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 \quad R < Z \quad (4)$$

$$K_R(z) = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$$

$$a_1 + 2a_2 + 3a_3 = 0$$

$$c_1 + 2c_2 + 3c_3 = 0$$

임의 순간에 공구가 필요로 하는 절삭력은 슬로팅 절삭의 경우 절삭 깊이를 d라고 했을 때 미소 절삭날에 걸리는 반경 방향 절삭력과 접선 방향 절삭력을 x, y 좌표계로 환산하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_x = \int_0^d \sum_{i=1}^n K_T(z) [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_T} [-\cos \theta_i(\theta, z)] + K_R(z) [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_R} [-\sin \theta_i(\theta, z)] dz \quad (5)$$

$$F_y = \int_0^d \sum_{i=1}^n K_T(z) [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_T} [\sin \theta_i(\theta, z)] + K_R(z) [f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_R} [-\cos \theta_i(\theta, z)] dz$$

식(5)는 실제 실험 결과 상당히 정확한 예측 절삭력을 제공하는 것으로 알려져 있으나 이 식은 절삭 깊이와 절삭에 참여하는 절삭 날의 수 등이 주어져야 한다. 그러나 Fig. 1에서 설명한 바와 같이 셋업 자세는 가공 경로, 가공 방법, 절삭 조건 등 접촉 면적이나 절삭 깊이, 그리고 절삭에 참여하는 날의 수가 결정되는 단계를 선행해서 정해지는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 절삭 깊이나 가공 경로를 고려하지 않은 상태에서 곡면과 공구가 만나는 접촉 점에 대한 절삭력의 상대적인 비교를 이용한다. 곡면과 공구가 만나는 접촉점(높이 값 z)에 대한 절삭력은 식(4)의 비례 상수식  $K_T(z), K_R(z)$ 이 실험 결과 각각 접선 방향 절삭력과 반경 방향 절삭력에 매우 근사한 비례식으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이 비례 상수식을 임의의 접촉 점에서의 절삭력으로 대용한다.

### 3.2 BSM을 이용한 셋업의 결정

이제 공구와 곡면간의 접촉점에서의 절삭력을 이용하여 최소의 절삭력을 갖는 공구와 공작물간의 셋업 자세를 결정한다. 먼저 가공 가능 영역이 2 장의 방법에 의하여 BSM으로 계산되었다고 가정하고 가공 가능한 영역에 속하는 방향 벡터들을  $C_j, j \in [1: N_C]$  로 표시하자. 셋업 자세는 앞서 설명한 바와 같이 가공 가능 영역에 속하는 공구의 방향들을 차례로 셋업 자세로 가정한 뒤 이들 중 곡면의 전 부위에 대하여 필요로 하는 절삭력의 합이 최소가 되는 방향을 선택하는 것이다.

임의의 공구 자세  $C_j$  와 곡면의 한 패치에서의 법선 벡터가 주어졌을 때 접촉 점의 공구 상에서의 높이 값  $z$  는 다음의 식으로 계산된다(Fig. 3).

$$z = R(1 - C_i \cdot N_j) \quad (6)$$

$z$  가 계산되면 식 (4)에 의해 해당 점에서의  $K_T(z) + K_R(z)$  을 계산하고 이들 절삭력의 합을 다음과 같이 구한다.

$$F(z) = \sqrt{K_T(z)^2 + K_R(z)^2} \quad (7)$$

따라서 최적 셋업 자세는 분할된 곡면 상의 모든 패치에 대하여 식 (7)을 이용 합력들을 구한 뒤 이 합력들의 총합이 최소가 되는 공구 축 방향을 셋업 자세로 선택한다.

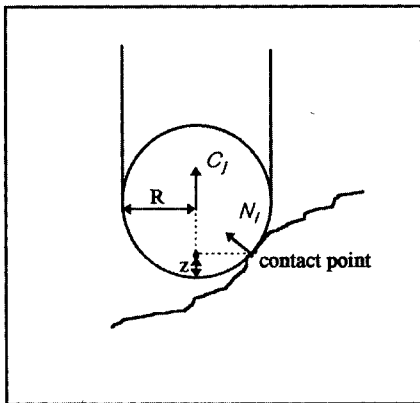


Fig. 3 The contact point between tool and surface part.

지금까지 설명한 절삭력을 최소로 하는 셋업 자세를 구하는 절차를 요약하면 다음과 같다.

```

Procedure SetupOrientation
{
  sum ← 0.0; min_cutting_force ← ∞;
  while(j ∈ [1, N_C]){
    while(i ∈ [1, n]){
      Compute z by Eq.(6);
      Compute F(z) by Eq.(7);
      sum ← sum + F(z);
    }
    if(sum < min_cutting_force){
      min_cutting_force ← sum;
      C* ← C_i;
    }
  }
  Output optimal setup orientation vector(C*);
}
    
```

### 4. 가공 가능한 기계 선정

공작물과 공구 간의 셋업 자세가 결정 되면 셋업 자세로부터 가공에 필요한 가공 공간을 계산하는 것이 필요하다. 필요한 가공 공간의 정확한 계산은 여러 NC 기계들 중 가공 가능한 최적의 기계를 선정할 수 있게 한다. 그러므로 이 장에서는 주어진 셋업에서 가공에 필요한 가공 공간을 계산하는 방법론을 제시한다.

3 축 NC 머신의 경우에는 가공 공간이 육면체로 정의된다. 따라서 주어진 셋업에서 최소 가공 공간을 계산하는 것은 공작물을 포함하는 최소 크기의 육면체(enclosing box)를 계산하는 것과 동일하다. 단, 이 경우 육면체의 한 방향은 반드시 공구 셋업 방향이어야 한다는 조건이 첨가된다. 주어진 곡면을 둘러싸는 육면체를 계산할 때는 복잡한 곡면식을 이용하는 것보다 Bezier나 B-spline곡면들이 가지는 convex hull의 특성<sup>(17)</sup>을 이용하여 곡면을 정의하는 조정점(control point)들을 사용하면 계산이 간편해진다. 이하에서는 조정점을 사용하여 최소 크기의 육면체를 계산하는 방법을 설명한다.

곡면을 정의하는 조정점을  $B_i, i \in [1: N_B]$  라고 하고, 2 장에서 계산된 셋업 자세 벡터( $C^*$ )를 스피indle 축 방향에

일치시켜  $n_z$  로 표시하자. 육면체는  $n_z$  를 포함하는 새로운 직교 좌표계 상에서 계산된다.  $n_z$  를 포함하는 새로운 좌표계의 나머지 두 좌표 축 벡터를 각각  $n_x, n_y$  로 하다면 새로운 좌표계에서 조정점들의 좌표  $B'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$  는 다음과 같이 계산된다.

$$B'_i = [n_x \ n_y \ n_z] \cdot B_i \quad (8)$$

3 차원 공간에서 이 점들 ( $B'_i$ ) 을 포함하는 육면체는 그 중 한 면이 반드시 공구 축 방향  $n_z$  을 향해야 하기 때문에  $B'_i$  의  $z'_i$  성분으로부터 육면체의 높이 ( $h$ ) 를 다음의 식으로 계산하고,

$$h = \max_{i \in [1:C]}(z'_i) - \min_{i \in [1:C]}(z'_i) \quad (9)$$

육면체의 가로 세로 값은 조정점들을 Fig. 4와 같이  $x' - y'$  평면으로 투영한 후 투영 점들을 둘러싸는 최소 면적의 직사각형에서 구한다. 이 때 직사각형을 구성하는 네 개의 모서리 선을 각각  $E_1, E_2, E_3, E_4$  로 표시하면,

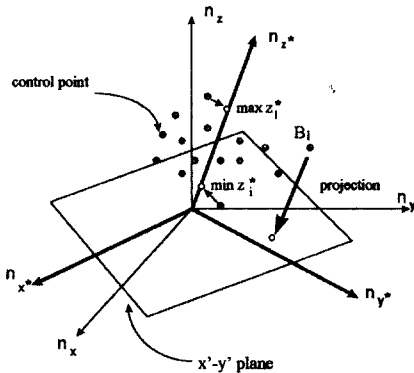


Fig. 4 New coordinate system including  $n_z$ .

2 차원 평면 상에서 주어진 점들을 포함하는 최소 면적의 직사각형은 Fig. 5와 같이 주어진 점을 포함하는 convex hull을 계산한 뒤 convex hull을 구성하는 각 모서리선(hull edge)를 직사각형의 한 변으로 가정하여 차례로 최소 면적이 될 때까지 탐색함으로써 계산할 수 있다. 이 때 주어진 점들의 2 차원 평면 상에서의 convex hull을 구하는 방법으로는 Granham's scan<sup>(18)</sup>의 방법

을 사용한다.

이를 위하여 구하여진 convex hull의 각 모서리선을  $HE_k, k \in [1: N_H]$  로 표시한다. 이제 각 모서리선에 구

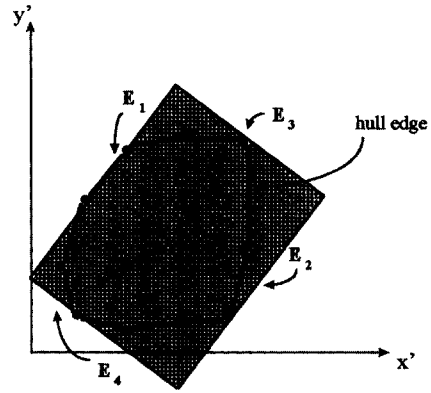


Fig. 5 Computing minimum rectangle from the convex hull

하려는 직사각형의 한 모서리 선 ( $E_1$ ) 을 가정한 뒤, 이 모서리 선에서 가장 거리가 먼 점으로부터 두번째 모서리 선 ( $E_1$ ) 을 계산하고 마찬가지로 방법으로 나머지 두 모서리 선 ( $E_3, E_4$ ) 를 계산한다. 일단 사각형이 계산되면 식 (9)에서 계산된 높이 값과 곱하여 육면체의 체적을 계산한다. 이 과정을 convex hull의 모든 모서리 선에 반복함으로써 최소 크기의 육면체를 구할 수 있으며 이 육면체의 가로, 세로 높이 값이 가공 가능한 머신의 제어 축들의 최소 운동 범위가 된다.

지금까지 설명한 절차를 요약하면 다음과 같다

Procedure MachineSelection

```
{
  Read in control points  $B_i, i \in [1: N_C]$ ;
  Read the optimal setup orientation vector  $C^*$ ;
   $n'_z \leftarrow C^*$ ;
  Construct new coordinate system( $n_x, n_y, n_z$ );
  Construct  $B'_i = (x'_i, y'_i, z'_i), k \in [1: N_C]$  by Eq.(8);
  Construct the height( $h$ ) of enclosing box by Eq.(9);
  Construct a convex hull from the points on  $x' - y'$  plane and
  denote its hull edges as  $HE_k, k \in [1: N_H]$ ;
  while( $k \in [1: N_H]$ ) {
     $E_1 \leftarrow HE_k$ ;
    Compute the parallel edge  $E_2$ ;
```

```

Compute the orthogonal edges  $E_3, E_4$ ;
Compute the volume(VOL) of the enclosing box;
if(VOL < min_volume)
    min_volume ← VOL;
}
Output min_volume;
}
    
```

### 5. 적용 예

본 연구에서 개발된 알고리즘들은 IBM-pentium 상에 구현 되었다. 먼저 가공 대상 자유 곡면은 Fig. 6(a)과 같은 형상을 가정하였다. 가공 가능성 판정을 위하여 구를 Fig. 6(b)와 같이 1200개의 삼각형 패치로 분할하여 BSM을 구성하였고 곡면은 240개의 삼각형의 집합으로 분할하였다.

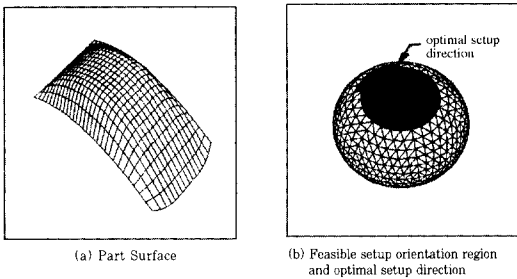


Fig. 6 Part surface and determining machining feasibility

이 가공 형상에 대한 3 축 가공 가능성 판정의 결과와 가공 가능한 셋업 자세 영역이 Fig. 6(b)에 검게 표시되어 있다. 다음으로 셋업 자세를 결정하기 위하여 다음과 같은 가공 조건을 가정했다. 1. 공구는 12.7 mm 2날 볼엔드밀이고 소재는 SAE 1018 cold-rolled steel이며 coolant는 사용하지 않았다. 이 가공 조건하에서 식(4)의  $K_T(z), K_R(z)$ 의 값은 Feng(16)의 결과에 의하면 다음과 같다.

$$K_T(z) = 5682 - 7507\left(\frac{z}{R}\right) + 3416\left(\frac{z}{R}\right)^2 + 225\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

$$K_R(z) = 480 - 7055\left(\frac{z}{R}\right) + 11983\left(\frac{z}{R}\right)^2 + 5617\left(\frac{z}{R}\right)^3$$

이 실험 값을 사용하여 계산한 절삭력을 최소로 하는 공구의 상대적인 자세 방향이 Fig. 6(b)에 표시되어 있

다. 그리고 이에 따라 공작물과 공구간의 셋업을 정한 것이 Fig. 6(c)에 나타나 있다. 마지막으로 Fig. 6(d)는 이 셋업 자세에서 가공이 가능하기 위해 필요한 최소 가공 영역을 표시한 모습이다. 각 경우에 대하여 계산 시간은 모두 무시할 정도의 짧은 시간이 소비되었다.

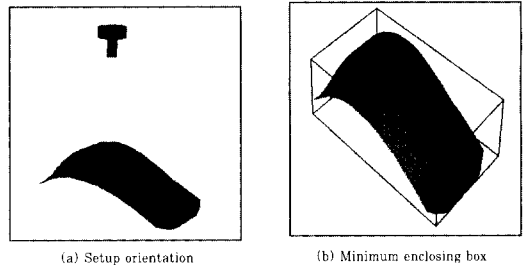


Fig. 7 Setup orientation and minimum enclosing box

그러나 본 연구의 결과 중 셋업 자세의 결정에서 사용한 절삭력은 공구와 공작물간의 접촉 점에 대하여만 정의 되었기 때문에 가공 경로와 절삭 깊이 등 절삭 조건을 갖는 실제 절삭시 발생하는 절삭력과는 다른 문제점이 있다. 또한 가공의 최종 목표가 보다 정밀한 형상을 얻는 것이라 할 때 본 연구에서 사용한 최소 절삭력에 의한 셋업 자세는 가공 후 최적의 가공 정밀도를 보장하는 것도 아니다. 다만 본 연구에서 사용한 최소 절삭력은 고려할 수 있는 하나의 기준이며 적어도 볼 선단 부분이 가공에 많이 참여함으로써 발생하는 여러 가지 심각한 문제를 피하게 하는데 의미가 있다.

가공 가능한 기계의 선정에서도 본 연구의 결과가 곧바로 이용되기에는 가공시 필요한 지그 및 고정구에 대한 고려가 빠져 있는 문제점이 있다. 셋업이 결정되고 셋업에 따른 셋업 방식이 결정되면 이를 고려하여 필요한 최소 가공 영역을 다시 계산하는 것이 보다 현실적이다.

### 6. 결론

본 논문에서는 자유 곡면의 3 축 NC 가공 시 필요한 주요한 공정 계획 기능들 중 3 축 가공 가능성 판정과 절삭력을 고려한 셋업 자세 결정 그리고 가공 가능한 기계 선정 문제를 다루었다. 가공 가능성 판정을 위해서는 구상의 계산 기하학 문제를 대수적으로 접근케 하는 BSM을 이용하였고, 최적 셋업 자세는 볼엔드밀의 절삭력에

측 모델을 사용하여 필요한 절삭력이 최소가 되는 셋업 자세가 선정되도록 하였다. 그리고 주어진 셋업 자세에서 가공에 필요한 각 제어 축의 최소 운동 범위를 계산함으로써 가공 가능한 최적 머신이 결정할 수 있도록 하였다.

자유 곡면의 NC 가공을 위한 공정 계획에는 본 연구에서 다룬 항목들의 지그 및 고정구에 관한 계획, 가공 경로 및 방법 선정, 그리고 절삭 조건 선정 등이 있으며 이들에 관한 추후 발전된 연구가 필요하다. 특히 셋업 자세와 가공 경로 및 방법, 그리고 절삭 조건은 최종 가공 형상의 정밀도에 서로 밀접한 관련이 있으므로 이를 종합적으로 고려한 공정 계획의 자동화가 향후 필요한 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. Chang, T. C., Wysk, R. A., and Wang, H. P., *Compter-Aided Manufacturing*, Prentice-Hall, Inc., 1991.
2. 유우식, "금형가공의 Concurrent Engineering을 위한 CAPP/CAM 통합에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1992.
3. Tseng, Y. and Joshi, S., "Determining feasible tool-approach directions for machining Bezier curves and surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 23, No. 5, pp. 367-379, 1991.
4. Kim, D., "Cones on Bezier Curves and Surfaces", Ph.D. thesis, University of Michigan, Industrial and Operations Engineering, 1990.
5. Woo, T., and Turkovich, B., "Visibility Map and Its Application to Numerical Control," *Annals of CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 451-454, 1990.
6. Woo, T., Tang, K. and Gan, J., "Maximum Intersection of Spherical Polygons and Workpiece Orientation for 4- and 5- Axis Machining," *J. of Mech. Design*, Vol. 114, pp. 477-485, 1992.
7. Chen, L., and Woo, T., "Computational Geometry on the Sphere with Application to Automated Machining," *J. of Mech. Design*, Vol. 114, pp. 288-295, 1992.
8. Chen, L., Chou, S., and Woo, T., "Seperating and intersecting Spherical Polygons : Computing Machinability on Three-, Four-, and Five-Axis Numerically Controlled Machines," *ACM Trans. Graphics*, Vol. 12, No. 4, pp. 305-326, 1993.
9. 김광수, 고병철, "Automated Machinability Checking for Sculptured Surface Manufacture", '92 대한산업공학회/한국경영과학회 춘계공동학술대회 발표 논문집, pp299-308, 1992.
10. Suh, S. H. and Kang, J. K., "Process planning for multi-axis NC machining of free surfaces," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol. 33, No. 10, pp. 2723-2738, 1995.
11. 강재관, 서석환, "머신 컨피규레이션에 따른 자유곡면의 5 축 가공성과 셋업자세", *대한산업공학회지*, 제 21 권, 1 호, pp. 67-84, 1995.
12. Park, S., Jun, Y. T., Lee, C. W. and Yang, M. Y., "Determining the Cutting Conditions for Sculptured Surface Machining", *Int. J. of Adv. Mfg. Tech.*, Vol. 8, No. 2, pp. 61-70, 1993.
13. 최병규, *NC 절삭가공과 CAM 시스템*, 청문각, 1989.
14. Yang, M. Y. and Park, H. D., "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1., pp. 45-54, 1991.
15. Yucasan G. and Altintas Y., "Prediction of Ball End Milling Forces", *ASME Journal of Engineering For Industry*, Vol. 118, pp. 95-103, 1996.
16. Feng, H. Y. and Menq, C. H., "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process-I. Model formulation and model building procedure", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 5, pp. 697-710, 1994.
17. Rogers, D. F. and Adams, J. A., *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill, Inc., 1989.
18. Preparata, F. and Shamos, M., *Computational Geometry-An Introduction*, Springer Verlag, 1985.