

본 연구는 1995년도 교육부 학술 연구 조성비에 의하여 연구되었음

## 공구간섭과 절삭성을 고려한 자유 곡면의 4,5축 NC 가공을 위한 공구 경로 산출

강재관\*

### Interference-Free Tool Path with High Machinability for 4- and 5-Axes NC Machining of Free-Formed Surfaces

Jae-Gwan Kang\*

#### ABSTRACT

NC machines with 4 or 5 axes are capable of various tool approach motions, which makes interference-free and high machinability machining possible. This paper deals with how to integrate these two advantages (interference-free and high machinability machining) in multi-axes NC machining with a ball-end mill. Feasible tool approach region at a point on a surface is first computed, then among which an approach direction is determined so as to minimize the cutting force required. Tool and spindle volumes are considered in computing the feasible tool approach region, and the computing time is improved by transforming surface patches into minimal enclosing spheres. A cutting force prediction model is used for estimating the cutting force. The algorithm is developed so as to be applied to 4- or 5-axes NC machining in common.

**Key Words :** Multi-axes machining(다축가공), Free-formed surfaces(자유곡면), Tool path generation(공구경로산출), Tool interference(공구간섭), Visibility cone(공구접근가능영역), Machinability(절삭성), Cutting force prediction model(절삭력 예측모델)

#### 1. 서론

최근들어 다축 NC 가공에 관한 관심이 증대하고 있다<sup>(10)</sup>. 특히 4축 이상의 다축 NC 가공은 기존의 3축 머신으로 가공이 불가능했던 터빈 블레이드와 같은 복잡한 형상의 가공과 펄릿 엔드밀이나 엔드밀을 사용한 고절삭성의 가

공을 가능케 한다. 또한 3축 NC 가공에 비해 가공에 필요한 셋업 회수를 줄일 수 있는 것도 큰 장점이다. 따라서 복잡한 형상에 대한 다축 NC 가공 기술은 형상의 복잡성과 다양성을 요구하는 현대 산업 패턴에 비추어 볼 때 그 필요성이 더욱 증대되리라 예상된다.

다축 NC 가공의 장점은 기본적으로 증가된 제어축 수

\* 경남대학교 산업공학과

에 따른다. 증가된 제어축은 공구에 운동 자유도를 더하여 복잡한 형상을 공구 간섭 없이 가공 가능케 하며 또한 다양한 공구 자세들로부터 절삭성이 고려된 최적의 공구 자세를 취할 수 있도록 한다. 따라서 다축 NC 가공 시에는 간섭 회피와 최적 절삭이라는 두가지 장점을 최대한 살리는 것이 중요하다. 그러나 지금까지 다축 NC 가공에 관한 많은 연구들은 이 두가지 특성을 효과적으로 반영하지 못하여 왔다. 이는 우선 주어진 가공점에 대하여 간섭 없이 공구가 접근할 수 있는 자세에 관한 충분한 정보가 없었기 때문인데 가능한 공구 자세에 관한 정보가 주어지면 이로부터 일정한 기준에 따라 최적의 공구 자세를 선택하는 것이 가능하다.

지금까지 다축 가공에서 간섭을 해결하는 접근 방법은 4축 가공의 경우<sup>(12)</sup>와 5축 가공의 경우<sup>(5,8,14)</sup>가 각각 다를 뿐만 아니라 대부분 이미 접근 자세가 주어졌다는 가정하에 공구에 일정 개수의 체크점을 두고 간섭의 발생 유무를 체크하는 방법이었다. 그러나 이러한 방법은 주어진 접근 자세에 관한 간섭 여부만을 판정할 수 있을 뿐 간섭을 어떻게 피하느냐가 여전히 문제로 남으며 절삭성을 고려한 최적 공구 자세는 거의 고려할 수가 없다.

따라서 본 연구는 복잡한 형상의 다축 NC 가공을 위하여 임의의 가공점에서 간섭 없이 접근할 수 있는 공구 자세의 전 영역을 계산하는 새로운 방식을 먼저 제시하고 이를 이용하여 절삭성을 고려한 공구 경로 산출 방법에 관한다. 특히 본 연구는 4 축과 5축 NC 가공에 동일하게 적용할 수 있는 통일된 알고리즘을 개발한다. 본 연구에서 가정하는 공구는 볼 엔드밀이다.

## 2. 간섭 없는 공구 접근 자세

앞서 언급한 바와 같이 다축 NC 가공시 각 CC 점에서 공구자세의 최적성을 고려하기 위해서는 먼저 Fig.1과 같이 곡면 상의 임의의 CC점에 공구가 간섭 없이 접근할 수 있는 자세 영역(Point Visibility Cone, 이하 PVC로 표현한다)을 계산하는 것이 필요하다. 단 4축 NC 가공의 경우는 전 영역에 관한 정보가 필요 없기 때문에 PVC가 회전축이 그리는 원 상에 호(arc)로 표현된다.

지금까지 PVC에 대한 대표적인 연구로는 Suh<sup>(11)</sup>의 연구 결과가 있다. 이 연구에서는 곡면을 평면으로 분할하여 분할된 패치를 구상에 투영 시키는 방법으로 PVC를 계산하였다. 그러나 이 연구는 자유 곡면의 NC 가공시 필요한 공정 계획 작성에 연구의 초점이 주어졌기 때문에

공구 볼륨을 고려하지 않는 단점이 있다. 즉 공구를 직선으로 가정함으로써 볼륨을 갖는 실제 경우보다 과장된 접근 자세 영역을 계산하며 따라서 실제 가공에서 이를 이용할 경우 공작물과 공구간의 치명적인 간섭이 발생할 위험성이 존재한다.

최근에 이를 개선하여 공구의 볼륨을 고려한 방법이 Kang<sup>(2)</sup>에 의해 제시되었다. 그러나 이 연구에서는 공구 볼륨만을 고려하였기 때문에 공구의 스핀들 부위에 의한 간섭을 체크할 수 없는 문제점이 있다. 다축 NC 가공에서는 형상의 복잡성으로 말미암아 공구가 깊숙하게 접근해야 하는 경우가 빈번히 발생하므로 스핀들 부위와 가공형상간의 충돌 문제도 반드시 고려해야 할 중요한 문제이다. 따라서 본 연구에서는 이 연구를 확장하여 공구 볼륨 뿐 아니라 스핀들 부위까지도 고려하여 가능한 공구 접근 자세를 찾아내는 방법론을 개발한다

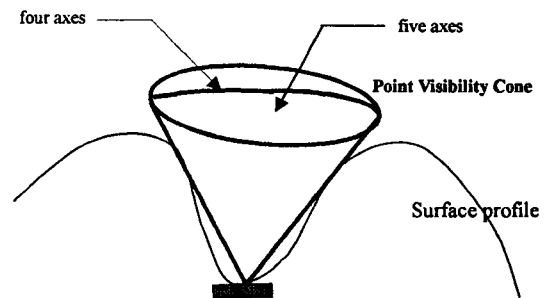


Fig. 1 Point Visibility Cone

먼저 Kang<sup>(2)</sup>이 제시한 알고리즘의 주요 절차를 설명하면 다음과 같다. 곡면을 곡률을 고려하여 여러 개의 삼각형 패치로 분할하여 근사 다면체 형상으로 표현하고 볼 엔드밀의 공구 접근 자세를 구하기 위하여 구를 Fig. 2(a)과 같이 일정한 삼각형 셀의 집합으로 표현한다. 그리고 이 삼각형 셀의 중심 방향을 공구 접근 방향으로 가정하여 곡면과의 간섭 유무를 확인한 후 그 결과를 0과 1로 표현한다. 즉 접근 가능이면 해당 셀을 0으로, 불가능이면 1로 저장한다.

구상의 기하학적 정보를 0과 1의 대수적 정보로 변환하는 이러한 접근 방법을 BSM(Binary Spherical Map)이라 이름하였는데 이 방법론은 공구 접근 가능 자세에 관한 구 상의 복잡한 기하학적 정보를 대수적 정보로 변환하여 표현할 수 있는 장점이 있다. 이 때 간섭의 판별은 주어진 공구 자세에 대하여 임의의 곡면 패치가 공구 볼

름 내에 포함되는지를 계산함으로써 이루어진다. 다만 이 방법에서는 스펀들에 대한 고려가 빠진 문제점 외에도 간섭 체크를 위하여 공구 볼륨과 삼각형 팻치 관계를 직접 계산하기 때문에 연산시간이 많이 소모되는 단점이 있다. 실제 공구 볼륨과 삼각형 팻치간의 간섭 관계는 1) 팻치가 공구를 완전히 포함하는 경우, 2) 팻치의 한변이 공구와 간섭하는 경우, 3) 팻치의 한 꼭지점이 공구 볼륨내에 포함되는 세가지 경우로 분류하여 각각 검사를 행하여야 한다<sup>(2,4)</sup>. 따라서 이러한 연산 시간의 증가는 본 연구와 같이 모든 CC점에 대하여 PVC 계산을 필요로 하는 경우 그 심각성이 더욱 증가된다.

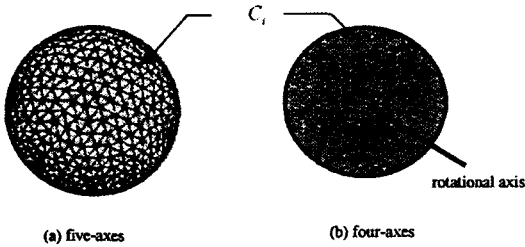


Fig. 2 Decomposed sphere

따라서 본 연구에서는 계산 시간의 감소와 스펀들까지 고려해야 하는 문제의 확장성을 감안하여 공구 볼륨과 삼각형 팻치간의 간섭 유무를 직접 계산하는 대신 Fig.3와 같이 삼각형 팻치의 외접원을 대원으로 하는 구를 구한 뒤 이 구와 공구 및 스펀들과의 간섭을 계산하는 방법을 사용한다. 이하에서는 이 방법론의 구체적인 절차를 5축 가공인 경우에 대하여 설명하고 4축 가공에 이를 응용한 방법을 기술한다.

2.1 BSM을 이용한 접근 방법

먼저 주어진 곡면  $S(u,v)$  의 근사 다면체를  $\Delta_i, i \in [1:n]$  로 나타내고 탐색을 위하여 분할된 구의 각 셀의 중심 벡터들을  $C_j, j \in [1:m]$  로 표시한다. 주어진 CC점을 포함하는 삼각형 팻치를  $\Delta_i$  로 표시하면  $\Delta_i$  만을 고려할 때 CC 점에 접근할 수 있는 볼랜드밀의 자세 영역은  $\Delta_i$  의 법선 벡터  $N_i$  를 중심으로 반구(hemisphere)를 형성한다.

이 반구 상에서 구하는 PVC는 다른 곡면 부위에 의해 접근할 수 없는 영역들을 차례로 제거함으로써 얻어질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 사체 영역을 찾고 또한 반구

를 갱신해 나가기 위해 앞서 언급한 바와 같이 분할된 구를 구성하는 각 셀의 중심 벡터를 접근 가능성 여부를 체크하는 탐색 방향으로 하여 접근 불가능 판정이 나면 해당 셀 영역 만큼을 이 반구로부터 제거해 나가는 방법을 사용한다. 이때 법선 벡터  $N_i$  를 중심으로 하는 반구상에 존재하는 탐색 방향( $C_j$ ) 들은 다음의 식을 만족한다.

$$C_j \cdot N_i > 0, j \in [1:m] \tag{1}$$

그리고 곡면의 근사 다면체 중에서 간섭을 일으킬 가능성이 있는 팻치들은  $\Delta_i$  를 포함하는 평면보다 위쪽에 존재하는 것들이다. 따라서 다음의 식 (2)을 만족하는  $\Delta_i$  들에 대해서만 간섭 유무를 체크한다.

$$N_i \cdot \Delta_{ik} > 0, \forall k \in [1:3] \tag{2}$$

$\Delta_{ik}, k \in [1:3]$  는 삼각형 팻치의 세 꼭지점들을 나타낸다.

2.2 간섭의 판별

식(2)를 만족하는  $\Delta_i$  는 간섭 검사를 위해  $\Delta_i$  를 둘러싸는 최소의 구로 변환한다.  $\Delta_i$  를 둘러싸는 최소의 구는  $\Delta_i$  의 외접원을 대원으로 하는 구인데 이 구의 중심을 G 로 표현한다.

이제 주어진 공구 자세와 이 구와의 간섭유무를 체크하기 위하여 공구볼 중심으로부터 구 중심의 높이값( $h$ )과 공구 중심 축 방향( $C_j$ )와의 거리( $d$ )를 계산하면(Fig. 3),

$$h = G \cdot C_j$$

$$d = G \sin \phi, \phi = \cos^{-1} \left( \frac{G \cdot C_j}{2|G||C_j|} \right) \tag{3}$$

식(3)에서 구한  $h$ 와  $d$ 를 이용하여 다음과 같이 구와 공구(실린더 포함)와의 간섭을 판별한다.

$$d < R_T + R_G \tag{4}$$

$$R_T + R_G < d < R_S + R_G, h > L_T - R_G \tag{5}$$

여기서  $R_T, R_S, R_G$  는 각각 공구 반경, 스펀들 반경, 구의 반경을 나타내고  $L_T$  는 공구의 길이를 표시한다. 식(4)는 구와 공구 중심 축 간의 거리가 공구 반경보다 작은 경우를, 그리고 식(5)는 구와 스펀들 부위와 간섭이 발생하는 경우이다.

지금까지의 과정을 식 (2)를 만족하는 모든  $\Delta_i$  에 대해

여 계산하면 가정된 접근 방향  $C_j$ 의 간섭 유무를 판별할 수 있다. 또한 이 과정을 식(1)를 만족하는 모든  $C_j$ 에 대하여 계산함으로써 주어진 CC 점에 대한 간섭 없는 공구 자세 영역을 계산할 수 있게 된다.

이 때 유의 할 것은 앞서 언급한 바와 같이 이 접근 방법은 실제 영역에 비해 조금 축소된 영역의 해를 계산해 낸다. 해의 정확성을 좀 더 향상 시키기 위해서는 식 (4)와 (5)를 만족하는 경우에 한해서 실제  $\Delta_j$ 를 사용하여 정밀도를 향상 시킬 수 있다. 이 과정은 Kang<sup>(2)</sup>의 연구 결과를 스펀들을 고려한 것으로 확장 시킴으로 구할 수 있으나 정확성이 증가하는 것에 반하여 계산 시간이 지나치게 많이 소요되는 단점이 있다. 본 연구에서는 이 과정을 생략한다.

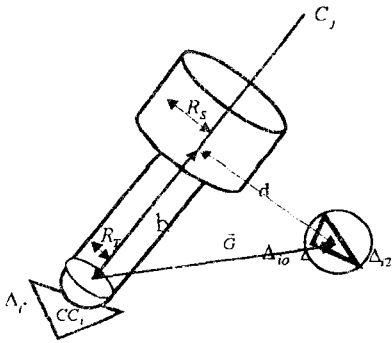


Fig. 3 Interference checking between the tool and  $\Delta_j$

### 2.3 4축 가공의 경우

앞서 언급한 바와 같이 4축 가공의 경우에는 PVC가 Fig. 1(b)와 같이 대원 상에 호로 표현된다. 따라서 PVC의 계산은 Fig. 2(b)와 같이 대원 상에 일정 간격으로 체크점을 두고 5 축 가공의 경우와 동일하게 간섭 유무를 체크함으로써 얻어진다.

## 3. 절삭성을 고려한 공구 경로 산출

다축 NC 가공이 주는 공구 자세의 다양성은 복잡한 형상의 가공 뿐만 아니라 최적의 가공 경로를 가능케 한다. 특히 다축 NC 가공시 엔드밀을 이용하면 자유 곡면 가공시 가공 후 커셉의 높이를 감소시키는 효과를 가져온다. 3축 엔드밀을 이용하면 엔드밀의 바닥을 얼마나 들어서 가공하느냐에 따라 공구의 유효 절삭 반경이 달라지며 이에 따라 커셉의 높이가 달라진다. 5 축 가공에서 이를 이용

하여 최적 공구 경로를 계산하는 연구가 그동안 많이 이루어졌다<sup>(5,6,9,15)</sup>.

그러나 형상의 복잡성이나 그 외 이유에 의하여 볼엔드밀을 사용하여 다축 가공을 하는 경우에는<sup>(1,4,11,12,14)</sup> 엔드밀의 경우와 달리 공구 형상의 특성상 공구를 어떻게 기울여도 커셉의 높이 변화에는 큰 영향을 미치지 못한다. 볼엔드밀의 경우에 있어서는 오히려 절삭 위치가 공구 불부위의 어디냐에 따라 공구의 절삭 유효 반경이 달라진다. 이 때 유의할 것은 볼 엔드밀은 그 형상의 특성 상 볼 중심 부위는 공구 유효 반경이 작을 뿐만 아니라 절삭성이 매우 나쁘고 절삭날의 파손이 잦다는 점이다. 그러므로 볼 중심 부위가 가공에 많이 참여할 경우 매우 수동적인 절삭 조건을 피할 수가 없게 된다.

따라서 본 연구에서는 다축 가공이 갖는 공구 자세의 다양성을 이용하여 볼 엔드밀의 볼 중심 부위에 의한 가공을 피하고 유효 절삭 반경을 크게 하는 공구 경로 생성 방법을 제시한다. 본 연구에서는 이를 위한 한 방법으로 공구와 공작물 간의 접촉 위치에 따른 절삭력의 차이를 이용한다.

### 3.1 절삭 부위에 따른 절삭력

지금까지 엔드밀에 관한 절삭력 예측에 관해서는 많은 연구가 이루어졌으나 볼엔드밀에 관한 연구는 최근 들어 활발한 편이다<sup>(7,16)</sup>. 본 연구에서는 이들 절삭력 모델중 Feng<sup>(7)</sup>의 연구 결과를 이용한다.

이 연구에서는 볼엔드밀의 절삭날을 Fig.4와 같이 여러 개의 미소 절삭날로 나누고 각각의 미소 절삭날에서의 절삭 기구를 2차원으로 근사하여 미소 절삭 날에서의 미소 절삭력을 구한 후에 이들을 절삭날에 따라 적분함으로써 가공에 참여하는 부위가 필요로 하는 절삭력을 예측하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

$n$ 개의 절삭 날이 있는 공구에서  $i$ 번째 공구 날의 공구 선단으로부터의 높이 값  $z$ 에서의 미소 절삭 날의 위치각 (angular position)을 다음 식으로 계산한다.

$$\theta_i(\theta, z) = \theta - \frac{z}{R} \tan \beta - (i-1) \frac{2\pi}{n} \quad (6)$$

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 폭

과 미 변형 칩의 지수 승으로 표현된다.

$$dF_{T_i} = K_T(z)dz[f \sin \theta_i(\theta, z)]^{m_T} \quad (7)$$

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

여기서 파라미터  $m_T, m_R$ 은 공작물 재질에 따른 상수이고,  $K_T(z), K_R(z)$ 은 위치 값  $z$ 에서의 미소 절삭 날의 국부 절삭력을 결정하는 비례 상수로서 일반적으로 다음과 같은 3차식으로 근사된다

$$K_T(z) = a_0 + a_1 \left(\frac{z}{R}\right) + a_2 \left(\frac{z}{R}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z}{R}\right)^3 \quad (8)$$

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

$$K_T(z) = a_0 + a_1 + a_2 + a_3$$

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

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

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

이 상수식은 곡면과 공구가 만나는 접선방향 절삭력과 반경방향 절삭력에 매우 근사한 비례식으로 알려져 있다 [3]. 따라서 본 연구에서는 이 비례상수식을 임의의 접촉점에서의 절삭력으로 대응한다.

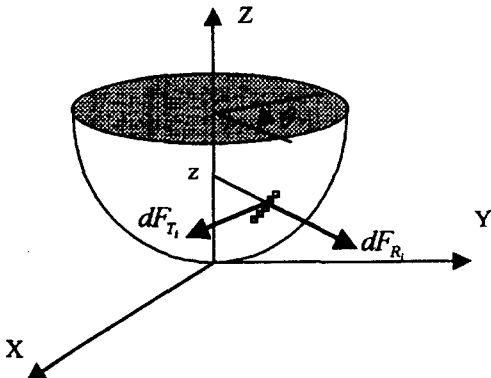


Fig. 4 Cutting mechanism of a ball end mill

### 3.2 공구 접근 자세의 결정

임의의 공구 자세  $C_j$ 와 곡면과의 접촉점에서 법선 벡터  $N_i$ 가 주어졌을 때 접촉점의 공구 상에서의 높이 값  $z$ 는 다음의 식으로 계산된다(Fig.5).

$$z = R(1 - C_j \cdot N_i) \quad (9)$$

높이 값  $z$ 가 계산되면 식(8)에 의해 해당 점에서의  $K_T(z), K_R(z)$ 을 계산하고 이들 절삭력의 합을 다음과 같이 구한다.

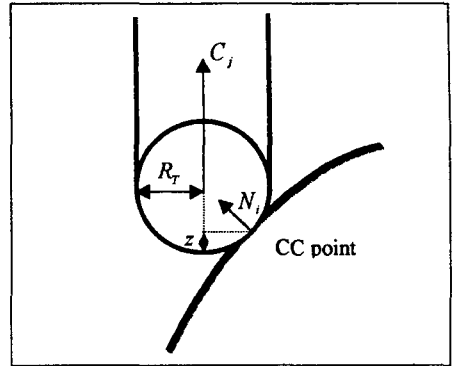


Fig. 5 Contact point between tool and surface part

$$F(z) = \sqrt{K_T(z)^2 + K_R(z)^2} \quad (10)$$

따라서 절삭력을 최소로 하기 위해서는 PVC 상에 존재하는 가능한 공구 자세들 중에서 식(10)의 값이 최소가 되는 방향으로 설정한다.

### 3. 3 공구 경로 생성

일반적으로 주어진 공구 자세에서 볼 엔드밀을 이용한 다축 NC가공의 절차는 Fig. 6과 같다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서는 이들 과정 중 CC 데이터의 생성 및 볼 부위 간섭 제거를 포함한 CL 데이터의 계산, 그리고 선형화적(Linearization)등의 과정은 기존의 연구결과<sup>(1,9)</sup>를 따른다.

본 연구가 기존의 방법과 다른점은 공구 몸체 간섭 검사 및 공구 접근 자세를 결정하는 단계에서 본 연구에서

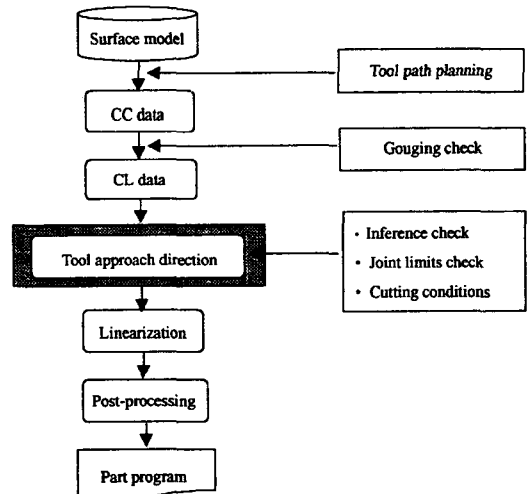


Fig. 6 General procedures of multi-axis NC machining

개발한 방법을 사용하는데 있다. 그러나 공구 몸체 간섭의 제거를 위하여 2장에서 제시한 PVC를 이용하는 방법을 사용할 경우 개선된 알고리즘에 의해 계산 시간이 많이 단축됨에도 불구하고 모든 CC점에 대하여 PVC가 필요하므로 공구 경로 생성에 많은 시간이 소요되는 문제점이 있다.

이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 분할된 각 삼각형 패치에 대해서는 대표되는 하나의 PVC만을 계산하여 동일한 패치상에 존재하는 CC 포인트에는 이 공통의 PVC를 이용하는 방법을 사용한다. 이 방법을 사용하면 각 CC점마다 PVC를 계산하는 부담이 줄어들 뿐만 아니라 Suh<sup>(11)</sup>의 연구에서처럼 공정 계획 단계에서 PVC들을 미리 구하였을 경우 추가적인 계산 없이 이를 이용할 수 있는 장점이 있다.

다만 이 때 문제가 될 수 있는 것은 실제 CC점과 PVC가 계산된 위치에 약간의 차이가 있음에 따라 선정된 공구 자세가 가능해가 되지 않을 경우가 발생할 수 있다는 점이다. 이를 제거하기 위하여는 선택한 공구 자세에 대하여 실제 CC점에서 가능해 여부를 다시 행하는 과정이 필요하다. (이 과정은 앞서 주어진 공구 자세에 대하여 가능해 여부를 체크하는 식(3), (4), (5)의 과정과 동일하다). 만약 이 결과가 불가능해로 판정되면 식(10)으로 계산된 절삭력 값들 중 다음으로 작은 값으로 공구 자세를 재선택하고 앞의 과정을 되풀이한다. 이를 요약하면 다음과 같다.

*Procedure Tool path generation*

```

{
  Construct PVCs for all subdivided surface patches;
  For (every CC point) {
    Find a surface patch including the CC point and the corresponding PVC;
    Compute cutting forces for all feasible direction in the PVC, and sort them in
    increasing order,  $C_{<i>, i \in [1 : L]$ ;
    For (every)  $C_{<i>, i \in [1 : L]$  {
      Test the feasibility of  $C_{<i>$  by Eqn. (4) and (5);
      If it is feasible, then exit;
    }
    Output the optimal tool approach direction;
  }
}
    
```

4. 알고리즘의 구현 및 검증

본 연구에서 개발된 알고리즘은 IBM PC pentium 상

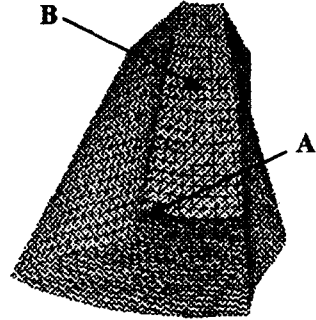


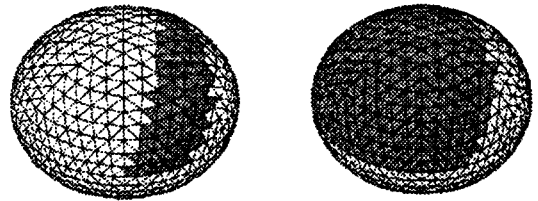
Fig. 7 Part of an impellar

에서 구현되었다. Fig. 7은 대상 가공물인 임펠러의 일부분을 보여 주고 있다. 공작물의 소재는 SAE 1018 cold-rolled steel이며 coolant는 사용하지 않은 것으로 가정한다. 이 가공 조건하에서 식(8)의 계수 값은 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

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

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

곡면 상의 A 와 B점에 대하여 본 연구에서 제시한 방법의 의해 계산된 공구 몸체 및 스펀들을 고려한 공구 접근



(a) PVC at A (b) PVC at B

Fig. 8 PVCs

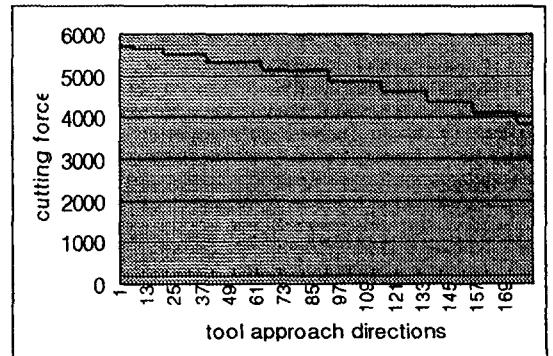


Fig. 9 Cutting force variation

가능 영역이 Fig.8(a),(b)에 나타나 있다(검게 표시된 영역). Fig. 9은 Fig. 8(a)의 가능한 공구 자세 영역에 대하여 각 공구자세에서 계산된 절삭력 값을 비교하여 보여주고 있는데 곡면과 볼 부위와의 접촉점이 공구 중심에서 멀어질수록 절삭력이 감소함을 볼 수 있다. Fig. 10(a)은 가공 경로를 보여주고 있으며 Fig.10(b)는 본 연구에서 개발된 알고리즘에 의한 공구 자세 궤적을 보여주고 있다. 이 때 유의할 것은 본 연구는 절삭력을 최소화 하는 접근 방향을 최적의 기준으로 삼았기 때문에 각 CC 점에서 선택한 공구 자세들 간의 관계를 무시한 문제점이 있다. 연속적인 공구 경로를 산출하기 위해서는 각 접근 방향들 간의 자세 변화가 부드럽도록 하는 것이 바람직하며<sup>(1)</sup> 이는 추후 보강될 예정이다. Fig. 11은 가공 과정을 시뮬레이션하고 있는 모습이다.

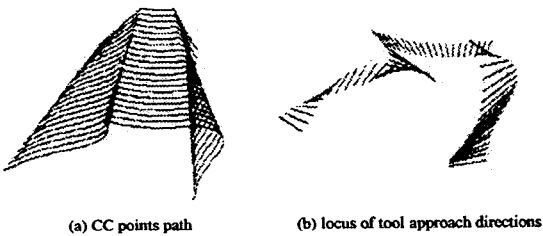


Fig. 10 The locus of tool path and tool approach directions

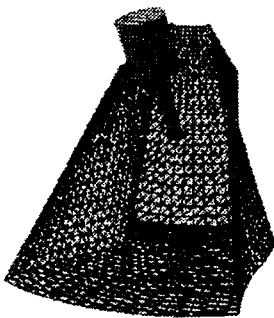


Fig. 11 Solid simulation of 5-axes machining

### 5. 결 론

본 연구에서는 복잡한 형상을 갖는 자유 곡면의 4,5 축 NC 가공을 위한 공구 경로 산출을 다루었다. 특히 다축 NC 가공에서 가능한 다양한 공구 접근 자세를 이용하여

볼 엔드밀 가공시 공구와 곡면 간의 간섭의 제거는 물론 절삭성이 좋은 공구 자세로 가공할 수 있는 공구 경로 산출 방법을 개발하였다. 본 연구에서 접근한 방법은 곡면상의 임의의 점에 공구(스핀들 포함)가 간섭 없이 접근할 수 있는 자세 영역을 먼저 계산한 뒤, 이 영역에 대하여 절삭력을 최소로 하는 공구 접근 자세를 선택하여 가공 경로를 산출하였다. 간섭 없는 가능한 공구 자세를 구하는데 있어 기존의 방법과 달리 공구 및 스펀들의 볼륨까지 고려하였으며 계산 시간을 줄일 수 있는 개선된 알고리즘을 개발하였다. 그리고 절삭력 예측 모델을 이용함으로써 볼 엔드밀을 이용할 경우 최대 난점인 볼 중심 부위에 의한 가공을 피하도록 하였다.

본 연구에서 제시한 방법론은 기존의 방법에 비하여 공구 접근 자세에 관한 더 많은 정보를 이용함으로써 다축 NC 가공이 갖는 장점을 더욱 효과적으로 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 4 축과 5축 NC 가공에 통일되게 적용될 수 있는 것도 기존의 방법들과 크게 다른 면이다.

그러나 본 연구에서는 공구 자세의 최적화 기준으로 절삭력만을 변수로 사용함으로써 공구 자세가 측벽가공의 형태로 구성되는 문제점이 있다. 일반적으로 측벽 가공은 난삭 가공이며 공구의 동적 불안정을 야기한다. 따라서 공구 접촉점에 따른 공구 계의 동적 거동도 고려한 발전된 연구가 추후 요구된다. 그리고 다축 NC 가공은 볼엔드밀외에도 엔드밀이나 필릿 엔드밀을 사용하는 경우가 많으므로 볼 엔드밀이 아닌 타 공구를 사용한 경우에 대한 연구가 향후 수행될 예정이다.

### 참 고 문 헌

1. 강대호, "5축 볼엔드밀 가공에서의 간섭이 배제된 공구 경로 산출", 석사학위논문, 포항공대, 1995.
2. 강재관, "자유 곡면의 다축 NC 가공시 간섭 없는 공구 접근 자세 영역" 한국정밀공학회지, 제14권, 제7호, pp108-115, 1997.
3. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z map을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력 예측", 한국정밀공학회지, 제14권, 제3호, pp57-65, 1997.
4. 이정재, Versatile CAM System for Additional-axis Machining, 박사학위논문, 포항공대, 1997.
5. B. Choi, J. Park, and C. Jun, "Cutter-location data optimization in 5-axis surface

- machining," CAD, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993.
6. H. Cho, Y. Jun, and M. Yang, "Five-axis CNC milling for effective machining of sculptured surfaces," Int. J. of Prod. Res., Vol. 31, No. 11, pp. 2559-2573, 1993.
  7. H. Feng, and C. Menq, "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.
  8. Y. Lee and T. Chang, "2-phase approach to global tool interference avoidance in 5-axis machining," CAD, Vol. 27, No. 10, pp. 715-729, 1995.
  9. S. Li and R. Jerard, "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-endmill cutter," CAD, Vol. 26, No. 3, pp. 165-178, 1994.
  10. D. Schultz, "Why Five-axis?", Modern Machine Shop, pp. 50-59, Jul., 1993.
  11. S. Suh, and J. Kang, "Process planning for multi-axis NC machining of free surfaces," Int. J. of Prod. Res., Vol. 33, No. 10, pp. 2723-2738, 1995.
  12. S. Suh and K. Lee, "A prototype CAM system for four-axis NC machining," SME J. Manufacturing Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 322-331, 1991.
  13. S. Suh and K. Lee, "Avoiding tool interference in four-axis NC machining of rotationally-free-surfaces," IEEE Trans. Robotics and Automation, Vol. 8, No. 6, pp. 718-729, 1992.
  14. Y. Takeuchi and T. Watanabe, "Generation of 5-axis control collision free tool path and post processing for NC data," CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 539-542, 1992.
  15. G. Vicker and K. Quan, "Ball-mills versus end-mills for curved surface machining," J. of Engineering Industry, Vol. 111, pp. 22-26, 1989.
  16. M. Yang and H. Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. 1, pp. 45-54, 1991.