

포텐셜 에너지를 이용한 5축 NC 밀링의 공구방향 결정

조인행* , 이건우**

Determination of Tool Orientation in 5-Axis Milling Using Potential Energy Method

Inhaeng Cho* and Kunwoo Lee**

ABSTRACT

In five-axis milling, optimal CL-data (cutter location data) should be generated to have advantages over three-axis milling in terms of accuracy and efficiency. This paper presents an algorithm for generating collision-free CL-data for five-axis milling using potential energy method. By virtually charging the cutter and part surfaces with static electricity, global collision as well as local interference is eliminated. Additionally, machining efficiency is improved by minimizing the curvature difference between the part surface and tool swept surface at a CC-point (cutter contact point) simultaneously.

Key Words : five-axis milling(5축 밀링), CL-data(가공데이터), collision(충돌), interference(간섭), potential energy(포텐셜 에너지), tool path(공구경로)

1. 서론

5축 NC 밀링 가공은 기존의 3축 NC 밀링 가공으로는 가공이 불가능한 제품을 가공하기 위하여 X, Y, Z 3축 외에 두 개의 회전자유도를 추가한 것이다. 5축 가공이 많은 설비투자 비용에도 불구하고 최근 사용이 증가하는 것은 셋업(setup)회수를 크게 줄일 수 있고, 볼록(convex)하거나 곡률이 크지 않은 오목(concave)한 곡면에 대하여 볼랜드밀 대신 평엔드밀이나 필렛엔드밀을 사용하여 가공효율을 크게 향상시킬 수 있으며, 각 공구접촉점

(CC-point)마다 공구방향을 최적으로 유지하여 가공 정밀도를 향상시킬 수 있기 때문이다. 그러나, 이상의 장점들을 활용하려면, 기존의 3축 가공의 가공데이터에 공구방향(tool orientation) 데이터를 추가해 주어야 한다. 이 공구방향은 과절삭을 막기 위하여 모델링된 가공곡면과 충돌, 간섭을 일으켜서는 안 되고, 동시에 가공 효율을 최대로 향상시킬 수 있어야 한다. 여기서 가공효율의 향상이란 주어진 시간 안에 최소의 오차로 최대의 가공을 수행하는 것을 뜻한다. 이를 보장하는 공구방향을 생성하기 위해서는 빠른 시간 안에 충돌을 검색할 수 있는 알고

* 서울대학교 대학원 기계설계학과

** 서울대학교 기계설계학과

리즘과 정확한 언더컷량을 계산할 수 있는 알고리즘의 개발이 요구된다.

5축 가공 데이터를 산출하는 기존의 방법에서는 모든 공구 접촉점에 대하여 법선벡터에 일정한 각(Sturz angle)만큼 기울인 공구방향을 사용하거나, 가공 효율을 주로 고려하여 공구방향을 결정 한 뒤, 충돌이 발생하면 공구방향을 변화시킨다. Szende⁽¹⁾는 필렛엔드밀(filleted end mill)에 대한 커슥 모양식을 유도하여, 가공곡면의 공구접촉점에서의 곡률과 공구이동체적(tool swept volume)의 곡률이 일치하는 방향을 공구방향으로 결정하고, 결정된 공구방향으로부터 커슥 높이를 예측하여 다음 공구경로의 공구접촉점을 구하였다. Mullins⁽²⁾도 곡면의 곡률과 필렛엔드밀의 근사화된 공구이동체적을 이용하여 공구방향을 정한 뒤, 역시 커슥높이를 예측하여 다음 공구경로의 공구접촉점을 구하였다. Li⁽³⁾는 가공곡면을 허용공차 안에 들어가는 삼각형(facet)의 집합으로 근사화하여 이 삼각형의 집합과 평면과의 교선을 그대로 공구경로로 사용하고, 삼각형의 법선에 대하여 공구 이송방향으로 일정 각도(Sturz angle) 기울인 방향을 공구방향으로 사용하였다. 이 때, 공구접촉점 주변의 삼각형들과 간섭 검사를 수행하여 간섭이 생기면 공구접촉점을 중심으로 공구 이송방향으로 간섭이 없어질 때까지 회전시킨다. Takeuchi⁽⁴⁾는 공구에 검사점(check point)들을 선정하여 이 점들이 가공 모델(CSG 형태)의 내부에 있는지 검사하였다. 충돌이 발생하면 충돌이 생긴 반대 방향으로 공구방향을 변경시켜 다시 검사를 수행한다. 충돌 검색에는 솔리드 모델링 기법을 사용하였으므로 가공 모델이 CSG 형태일 때만 검사가 가능하다. Choi⁽⁵⁾는 커슥 높이에 관한 식을 유도하여 이를 목적함수로 최적화를 수행하였다. 여기서는 검사 경로를 따라가며 충돌검사를 수행하여 충돌이 없는 해 존재영역(feasible region)을 찾은 뒤, 여기서 최적화를 수행한다. 이 방법은 해 존재영역의 도달시간이 검사 경로의 선택에 좌우되기 때문에, 적절한 검사 경로의 선택이 중요하다. 조현덕⁽⁶⁾은 자유 곡면의 5축 가공에 평엔드밀(flat end mill) 사용 시 공구경로와 공구방향을 구하였다. 여기서, 공구방향은 공구접촉점을 기준으로 공구 바닥면이 자유곡면에 간섭(interference)을 일으키지 않는 최소 방향각으로 결정하였다. 이 때 간섭 검사는 곡면과 엔드밀 바닥면의 z값을 비교하는 z-map 방법을 사용하였다. 간섭이 있으면 간섭이 일어난 반대 방향으로 간섭이 발생하지 않을 때까지 공구방향을 조절한다.

본 연구에서는 충돌 문제와 가공 효율 문제를 동시에 고려한 효율적인 공구방향 선정 방법을 개발하였다. 즉, 가공 효율을 최대화하기 위한 조건으로 임의의 공구 접촉점에서 공구 이동체적의 형상과 가공 곡면의 국부적인 형상이 최대한 유사하도록 최적화 연산을 수행하였으며, 이 때 충돌과 간섭이 발생하지 않도록 해석적인 구속 조건식을 도입하였다. 이 구속 조건식은 공구계와 가공 곡면의 표면에 인공적인 정전기적 부하가 걸렸다고 가정하면 충돌이나 간섭이 발생할 때 부하 곡면들이 서로 반발하는 성질을 이용하여 유도하였다. 본 연구에서 사용된 정전기 포텐셜에너지 방법은 로봇이동경로 산출⁽⁷⁾이나 자동조립 경로 생성⁽⁸⁾에 사용된 바 있다. 본 연구에서 공구경로 정보(CC-data)는 입력으로 주어진다고 가정하였다.

2. 공구방향 결정변수

5축은 기존의 X, Y, Z 3축에 두개의 회전 자유도를 추가한 것으로, 두개의 회전축을 추가하는 방법에는 이론적으로 48가지가 존재한다. 이 중 두 개의 회전 자유도가 분리되지 않은 것은 8가지가 존재하는데, 4가지는 주축에, 나머지 4가지는 테이블에 두 개의 회전 자유도를 추가하는 것이다.⁽⁹⁾

본 연구에서는 공구방향의 결정변수로서 기울임각(advance angle)과 회전각(tilt angle)을 사용하였는데, 이 두 회전각을 정의하기 위한 곡면상의 국소 좌표계를 Fig.1에 정의하였다. 여기서, f 는 공구의 진행 방향이고, n 은 곡면의 법선 방향, 그리고, b 는 n 과 f 의 외적 벡터이다. Fig.2에 나타난 바와 같이, 이 국부 좌표계에서 공구가 b 에 대하여 회전한 각을 기울임각 α , f 에 대하여 회전한 각을 회전각 β 라고 한다. 일반적으로 α 는 항상 0보다 크거나 같은 값을 갖고, β 는 부호의 제한이 없다.

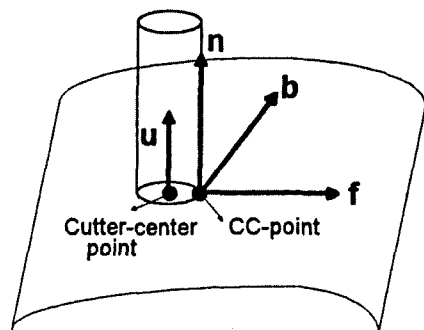


Fig. 1 Local coordinate system (b, f, n)

주어진 공구 접촉점에서 공구방향을 결정하는 것은 이 두 개의 회전각 기울임각 α 와 회전각 β 를 결정하는 것을 뜻한다. 실제 머시닝센터에서 사용되는 가공데이터는 공구 중심점(cutter center point)과 공구축 벡터 u 로 표현되며 이는 두 개의 회전각과 국부 좌표계의 관계로부터 쉽게 유도할 수 있다.

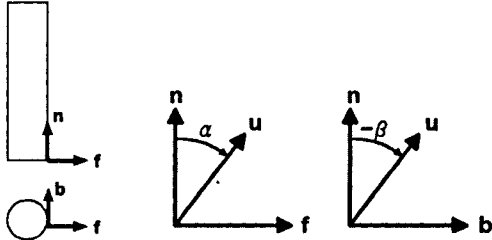


Fig. 2 Definition of α , β

3. 포텐셜 에너지(Potential Energy)

정전하(electrostatic charge)로 대전된 곡면이 기하 공간(Euclidean space)상에 놓이게 되면, 이 곡면은 곡면 주위에 정전기 장(Potential Field)를 형성하게 된다. 곡면에 대전 입자들이 고루 분포되어 있다고 가정하면 임의의 한 점에서의 정전기 장의 세기는 다음과 같다.

$$\Phi(\bar{p}) = \int_s \frac{\rho}{k|\bar{R}|} dS \quad (1)$$

where, ρ = charge density

k = proportional constant

\bar{R} = position vector from dS to \bar{p}

또한, 전하량 q 로 부하된 입자 π 가 이 정전기 장 안에 있을 때, 이 입자 내부에 저장되는 정전기 포텐셜 에너지(potential energy, 이하 포텐셜 에너지라 함.)는 다음과 같다.

$$U(\pi) = \int_s \frac{q\rho}{k|\bar{R}|} dS \quad (2)$$

where, $|\bar{R}|$ = position vector from dS to \bar{Q}

q = electrostatic charge

한편, $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 의 부하 곡면 집합에 의하여 곡면

S^* 에 저장되는 포텐셜 에너지는 중첩 원리(superposition theorem)에 의하여,

$$U(S^*) = \sum_{i=1}^n \int_{S_i} \frac{\rho_i}{k_i} \int_{S^*} \frac{\rho^*}{|\bar{R}|} dS^* dS_i \quad (3)$$

where, ρ_i = charge density of i th surface

k_i = proportional constant of i th surface

ρ^* = charge density of surface S^*

로 정의할 수 있다. 이 때 곡면들 간에 생기는 반발력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{F}(S^*) &= -\nabla U(S^*) \\ &= \sum_{i=1}^n \int_{S_i} \frac{\rho_i}{k_i} \int_{S^*} \frac{\rho^* \bar{R}}{|\bar{R}|^3} dS^* dS_i \end{aligned} \quad (4)$$

마찬가지로, n 개의 부하 곡면과 m 개의 부하 곡면간에 저장되는 포텐셜 에너지는 역시 중첩의 원리에 의하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^m \int_{S_i} \sum_{j=1}^n \int_{S_j} \frac{\rho_i \rho_j}{k} \frac{1}{|\bar{R}|} dS_i dS_j \quad (5)$$

본 연구에서는 이와 같이 대전된 곡면 간에 저장되는 포텐셜에너지와 이에 따른 반발력을 5축 NC 밀링 가공에 적용하여, 충돌, 간섭이 없는 공구방향을 신속하게 찾는 알고리즘을 개발하였다. 즉, 공구계와 가공 곡면에 가상적인 정전기를 부하하여, 이 때 생기는 포텐셜에너지와 이에 따른 반발력을 이용하였다.

부하된 두 물체의 거리가 가까울수록 포텐셜에너지 준위는 높아지고 반발력도 커지므로, 공구계와 가공물이 너무 가깝거나 충돌이 일어나게 되면 이 에너지가 매우 커지게 된다. 즉, 에너지 값이 클 때에는 가공이 불가능하므로 가공이 가능한, 즉 충돌이 없는 방향을 산출하여야 한다. 반면, 충돌, 간섭이 없는 가공이 가능한 상태에서는 식(6)과 같이 에너지 값이 어떤 일정한 값 이하로 유지될 것이다.

$$U = \sum_{i=1}^m \int_{S_i} \sum_{j=1}^n \int_{S_j} \frac{\rho_i \rho_j}{k_i} \frac{1}{|\bar{R}|} dS_i dS_j < K \quad (6)$$

그러나, 이와 같은 방법으로 충돌을 검색하는 방법에는 두 가지 문제점이 있다. 첫째, 식(6)의 K 즉 충돌을 일으키기 시작할 때의 에너지 값이 모든 공구 접촉점에서 다르므로, 이를 상수로 정의할 수 없다. 둘째, 가공시 공구 접촉점에서는 공구가 가공 곡면과 접촉하고 있고, 또한 공구 끝 주위는 가공 곡면과 근접해 있으므로 이곳에서 항상 에너지 값이 커진다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여, Fig.3과 같은 기존의 에너지 준위 함수를 Fig.4와 같이 수정하여 정의하였다.

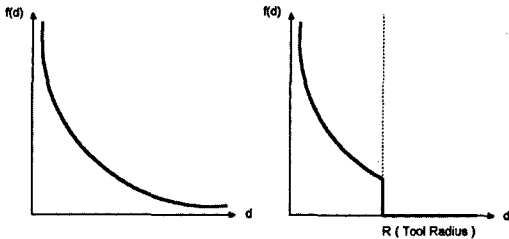


Fig. 3 Energy function Fig. 4 Modified energy function

Fig.3은 곡면상의 한 점과 공구 중심축간의 거리 d 와 에너지 준위와의 관계를 나타낸 곡선으로서, 공구와 곡면간의 거리가 가까워지면 에너지가 거리에 반비례하여 증가한다. 그러나, 이 함수를 사용할 경우 공구와 가공 곡면이 상당히 떨어져 있어도 미소하나마 에너지가 발생하고 공구 접촉점에서는 항상 에너지가 커지는 앞의 두 문제가 발생하게 된다. 그러나, Fig.4와 같은 에너지 함수를 사용하면, 공구와 가공 곡면이 충돌할 때에만 에너지가 발생하여 충돌이 없을 때에는 에너지 값이 0 이 된다. 즉, 충돌이 없는 조건식으로서 식(6)의 부등식을 식(7)과 같은 등식으로 수정할 수 있다.

$$U = \sum_{i=1}^m \int \sum_{j=1}^n \int_{S_j} \frac{\rho_i \rho_j}{k_i} f(d) dS_i dS_j = 0 \quad (7)$$

$$f(d) = \begin{cases} \frac{1}{d} & (0 < d < R_t) \\ 0 & (d \geq R_t) \end{cases}$$

where, R_t = tool radius

식(7)을 만족하지 않는 경우는 에너지 값이 0 보다 크기 때문에 충돌이 발생할 경우이며 이때 발생하는 반력을 이용하면 충돌이 없는 공구방향을 찾을 수 있다. 식(4)와

같이 반발력은 에너지 구배(energy gradient)의 반대 방향이므로 에너지를 감소시키는 방향은 충돌을 회피하는 방향이다. 식(7)에서 d 는 α, β 의 함수이므로, $U = f(\alpha, \beta)$ 라고 할 수 있다. 따라서 충돌이 발생하면 두개의 결정 변수 α, β 에 대하여 U 가 감소하는 방향을 구할 수 있고, 이 방향은 충돌이 줄어드는 방향이라고 할 수 있으므로, 이 방향으로 α, β 를 변경시키면 에너지 값이 0 인 각도 영역에 도달하게 된다. 본 연구에서는 다음 절의 최적화를 수행하기 위하여 ADS라는 상용 최적화 프로그램을 사용하였다. ADS는 제한 조건(Constraint)이 있는 다변수 비선형 최적화 문제를 해결할 때 사용되는 프로그램으로, 본 논문에서 U 가 줄어드는 α, β 의 방향은 ADS를 이용하여 수치해석적 방법으로 구하였다.

4. 가공효율의 최대화

5축 가공의 장점 중 하나는 공구접촉점마다 공구방향을 변경함으로써, 가공정밀도를 최대화하여 과절삭 없이 가공시간과 후처리량을 최소화할 수 있다는 것이다. 즉, 공구방향을 변경하여 가공된 부분의 모양과 모델링된 곡면의 모양이 최대한 유사한 모양을 갖도록 할 수 있다. 이를 위하여, 본 연구에서는 가공 곡면의 모양과 공구 끝의 모양 간의 유사성을 나타내는 정량적인 기준으로 공구 접촉점에서 가공곡면과 공구 이동체적 곡면 간의 곡률 차이를 이용하였다. Fig.5에서와 같이, 곡률 차이가 적다는 것은 두 곡면이 유사하다는 것을 뜻하고, 곡률차이를 이용하여 Fig.6과 같은 공구와 가공곡면 간의 간섭을 예측할 수 있으므로 본 연구에서는 목적함수로서 곡률 차이를 사용하였다. 곡률 차이를 구할 때, 각 곡률의 방향은 공구 이송 방향에 수직인 방향으로 설정하였다. 가공곡면 상의 공구 접촉점에서의 곡률 K 는 본 연구에서 사용한 NURB⁽¹⁰⁾ 곡면을 이용하여 구하였고, 공구접촉점에서의 공구이동체적의 곡률은 Szende⁽¹¹⁾가 펠렛엔드밀에 대하여 다음과 같이 유도한 식을 사용하였다.

$$K = \frac{(1 - (\cos \alpha \cos \beta)^2)^{\frac{3}{2}}}{\text{sign}(\sin \alpha) R \sin^2 \alpha - r(1 - (\cos \alpha \cos \beta)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

이 곡률은 공구이동체적을 이송방향에 수직인 평면으로 투영시켰을 때, 투영된 곡선의 곡률을 뜻한다. 또한 이 식

은 $r = R$ 일 때에는 볼엔드밀, $r = 0$ 일 때에는 평엔드밀에 적용될 수 있다.

가공곡면이 오목(concave)할 때, 두 곡률 κ 와 K 간의 차이가 적을수록 두 곡면은 유사하다고 할 수 있으므로 본 연구에서는 α, β 를 결정 변수로 놓고 $\kappa - K$ 에 대하여 최소화를 수행하였다. 가장 이상적인 상태는 κ 와 K 가 같아지는 경우이며, K 가 κ 보다 커지면 Fig.5에서와 같이 오히려 간섭이 생길 수 있다. 이를 방지하기 위하여, 본 연구에서는 $\kappa - K > 0$ 이라는 식을 최소화 수행 시 제한 조건식의 하나로 사용하였다. 즉, 포텐셜에너지 = 0 라는 식 (7)과 $\kappa - K > 0$ 을 제한 조건식으로 놓고 $\kappa - K$ 를 최소화한다. 최소화 수행 시 결정변수 α 와 β 의 범위는 5축 기계의 작동 범위와 가공물의 고정구 방향(fixture orientation)에 따라 결정된다. 가공곡면이 볼록할 때에도 Fig.6에서 보는 바와 같이 곡률 차이가 적을수록 미절삭량이 감소하므로 동일한 목적함수를 사용한다.

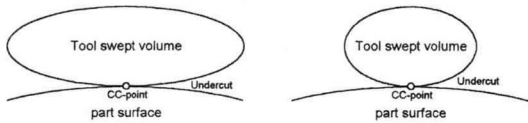


Fig. 5 Small curvature difference makes small undercut for convex part surface.

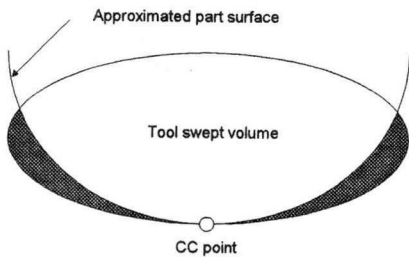


Fig. 6 Overcut occurs when K is larger than κ

5. 적용 예

본 연구에서는 이상의 내용을 실리콘 그래픽스(Silicon Graphics)사의 Indigo2 Workstation 상에서 구현하였다. 자유곡면을 디자인하고 결정된 공구경로와 공구방향을 검증하기 위한 CAD 시스템은 서울대학교 기계설계학과 CAD 연구실에서 개발한 곡면 모델링 시스템을 사용

하였다. 이 시스템에서는 곡면을 형상의 복잡성 여부에 관계없이 하나의 데이터로 표현할 수 있는 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)를 사용한다.

Fig.7은 임펠러의 일부분이다. 즉, 두 블레이드 사이의 바닥면을 엔드밀로 가공할 때의 공구방향을 결정해 보았다. Fig.8은 Fig.7의 바닥면의 한 점에서, α, β 에 관해, $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ, -90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 에 대한 포텐셜 필드를 도시한 것이다. Fig.8에서, 바닥 부분이 에너지 값이 0 인 부분, 즉 충돌이 일어나지 않는 부분이다. 에너지가 0 이 아닌 부분에 공구가 있는 경우는 구배(gradient)계산에 의하여 Fig.8과 같이 바닥면으로 찾아가게 된다. Fig.9는 Fig.7에 대하여 결정된 공구방향이다. Fig.10과 Fig.11은 각각 송풍기 날개 모델과 한국 탈 모델에 대하여 공구방향을 구해 본 것이다. 여기서, 공구경로는 등 매개변수 곡선을 사용하였다. 공구경로가 주어진 상태에서, 각각의 곡면에 대하여 Indigo2 Workstation로 공구방향을 선정하는 데 소요된 시간은 Table 1과 같다. Fig.10과 Fig.11에서는 충돌이 적게 발생하므로 공구접촉점당 공구방향 산출시간이 작은 것을 볼 수 있다.

Table 1 Computing time for test surfaces

Model Surface	Number of CC-points	Computing Time(sec)	Average Computing time(sec)
Impeller Blade(Fig.7)	40	49.6	1.24
Fan(Fig.10)	30	25.5	0.85
Korean Mask(Fig.11)	75	69.0	0.92

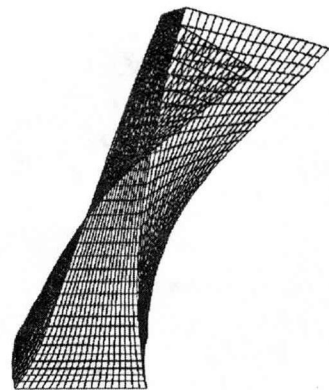


Fig. 7 Impeller's two blades and part of rim bridging the blades

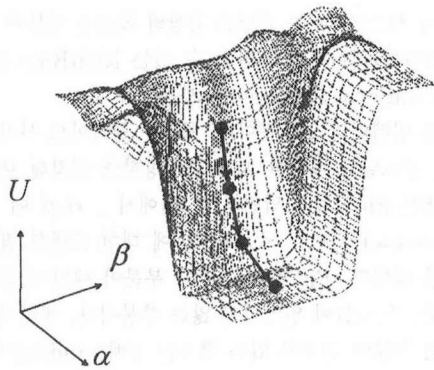


Fig. 8 Potential field in α, β domain

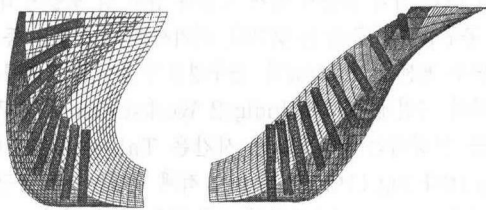


Fig. 9 Determined cutter orientation

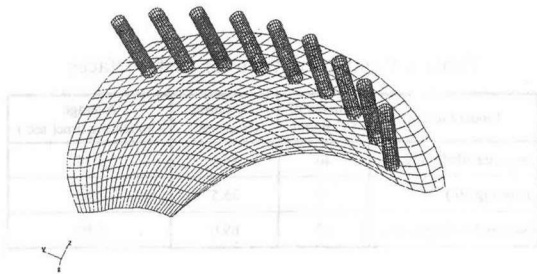


Fig. 10 Determined cutter orientation for 'fan'

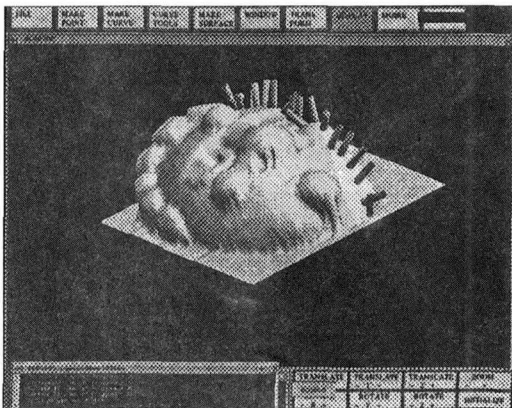


Fig. 11 Determined cutter orientation for 'Korean Mask'

6. 결론 및 연구과제

본 연구에서는 5축 NC 밀링 가공에서 공구와 가공물간의 충돌, 간섭을 피하기 위해 포텐셜 에너지 방법을 이용하였다. 또한 공구 접촉점에서의 공구 이동체적과 가공 곡면의 곡률 차이를 최소화하여 가공 효율을 최대화하였다. 본 연구는 충돌 문제와 가공 효율문제를 동시에 고려하여 복잡한 형상을 가공할 때 효율적인 공구 방향의 선정이 이루어지도록 하였다. 또한, 가상의 정전기를 부하는 방법을 이용하여 충돌을 피하므로, 공구 모양의 종류에 관계없이 적용할 수 있고, 엔드 밀링과 사이드 밀링에 모두 적용 가능하다. 그리고, 충돌 발생시 포텐셜 에너지의 구배계산에 의해 충돌이 없는 방향을 쉽게 찾아낼 수 있다.

그러나, 본 연구는 이미 적절한 공구경로가 있다는 가정 하에 각각의 공구접촉점에 대하여 공구방향을 결정하기 때문에, 커스 높이의 조절이 안되고, 인접 공구접촉점 간에도 가공효율을 고려하다 보면 공구방향이 급격히 변할 수 있다는 단점이 있다. 현재 5축 가공에서 공구경로의 생성방법은 기존의 3축에서 사용되었던 것과 크게 다르지 않다. 따라서, 본 연구의 내용을 이용하여 5축의 장점을 살릴 수 있도록 공구경로와 공구방향을 동시에 생성하는 알고리즘이 개발된다면, 생산성을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

7. 참고문헌

1. Szende, A., "Improvement of accuracy and flexibility of 5-axis CAD/CAM Systems," Ph.D. thesis, Seoul National Univ. , Korea, 1995.
2. Mullins, S. H., Jensen, C. G. and Anderson, D. C., "Scallop Elimination Based on Precise 5-axis Tool Placement, Orientation, and Step-over Calculations," Advances in Design Automation, 1993.
3. Li, S. X. and Jerard, R. B., "5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a flat-end Cutter," CAD, Vol.26, No.3, pp. 165-178, 1994.
4. Takeuchi, Y. and Idemura, T., "5-axis Control Machining and Grinding on Solid

- Model," *Annals of the CIRP*, Vol.40, pp. 455-458, 1991.
5. Choi, B. K., Park, J. W. And Jun, C. S., "Cutter-location Data Optimization in 5-axis Surface Machining," *CAD*, Vol.25, No.6, pp. 377-386, 1993.
 6. Cho, H. D., "A study on the 5-axis Precision Machining for Sculptured Surfaces," Ph. D Thesis, KAIST, Korea, 1993.
 7. Volpe, R. and Khosla, P., "Manipulator control with superquartic artificial potential functions: Theory and Experiments," *IEEE Proc. on Robotics and Automation*, 1988.
 8. Bae, S. H., "Development of the automated assembly sequence generation system to support mechanical assembly planning." Ph.D Thesis, Seoul National Univ., Korea, 1995.
 9. Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5-axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC Data," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No.1, pp. 539-542, 1992.
 10. Piegl, L., "The NURBS Book", Springer-Verlag, 1995.
 11. Cho, I. and Lee, K., "Determination of Tool Orientations in 5-axis milling Using Potential Energy Method," *Proceedings of the first world congress on intelligent manufacturing processes & systems*, February, 1995
 12. 조인행, 이진우, "포텐셜 에너지를 이용한 5축 NC 밀링의 공구방향 결정", 한국정밀공학회 추계학술대회, 1995.