

## 공구이동궤적 모델을 이용한 5축 페이스밀링 가공데이터 생성

이정근\*, 박정환\*\*

### Five-axis CL Data Generation by Considering Tool Swept Surface Model in Face Milling of Sculptured Surface

Lee, J. G.\* and Park, J. W.\*\*

#### ABSTRACT

It is well known that the five-axis machining has advantages of tool accessibility and machined surface quality when compared with conventional three-axis machining. Traditional researches on the five-axis tool-path generation have addressed interferences such as cutter gouging, collision, machine kinematics and optimization of a CL(cutter location) or a cutter position. In the paper it is presented that optimal CL data for a face-milling cutter moving on a tool-path are obtained by incorporating TSS(tool swept surface) model. The TSS model from current CL position to the next CL position is constructed based on machine kinematics as well as cutter geometry, with which the deviation from the design surface can be computed. Then the next CC(cutter-contact) point should be adjusted such that the deviation conforms to given machining tolerance value. The proposed algorithm was implemented and applied to a marine propeller machining, which proved effective from a quantitative point of view. In addition, the algorithm using the TSS can also be applied to avoid cutter convex interferences in general three-axis NC machining.

**Key words :** Five-axis machining, Tool swept surface model, Optimal tool position, Machining error

#### 1. 서 론

5축 NC 가공은 일반 3축 가공이 불가능한 형상의 가공 및 고 절삭성의 가공을 가능하게 하고, 가공 시 필요한 셋업 회수를 줄일 수 있는 등, 기존 3축 가공과 비교하여 많은 이점들을 가지고 있는 것으로 알려져 있다<sup>1,2</sup>. 기존의 5축 NC 가공은 주로 전용 가공기를 이용한 터빈블레이드<sup>3,4</sup>, 임펠러<sup>5</sup>, 선박용 프로펠러<sup>6</sup> 등의 부품을 양산하는데 활용되고 있다.

Fig. 1은 5축 NC 가공데이터 생성을 위한 전반적인 절차와 단계별 문제들을 간략하게 나타내고 있다<sup>2</sup>.

먼저 가공경로계획에 따라 곡면모델로부터 공구접촉점 정보, 즉 CC(cutter contact) data를 생성하게 된다. 다음 단계로는 각 CC data로부터 CL(cutter location) data를 계산하게 되는데, 이는 공구정보, 해당 기계의 사양 및 기타 정보들을 고려하여 공구의 자세를 결정하는 단계이다. 이후 CL data는 기계 역기구학(inverse kinematics)에 의해 해당 기계 축값으로 변환되고, 최종적으로는 후처리(post-process) 과정을 거쳐 NC 파일 형태로 변환된다. 일반적으로 CL data 계산 단계와 관련하여서는 간섭(interference) 및 충돌

세를 결정하는 단계이다. 이후 CL data는 기계 역기구학(inverse kinematics)에 의해 해당 기계 축값으로 변환되고, 최종적으로는 후처리(post-process) 과정을 거쳐 NC 파일 형태로 변환된다. 일반적으로 CL data 계산 단계와 관련하여서는 간섭(interference) 및 충돌

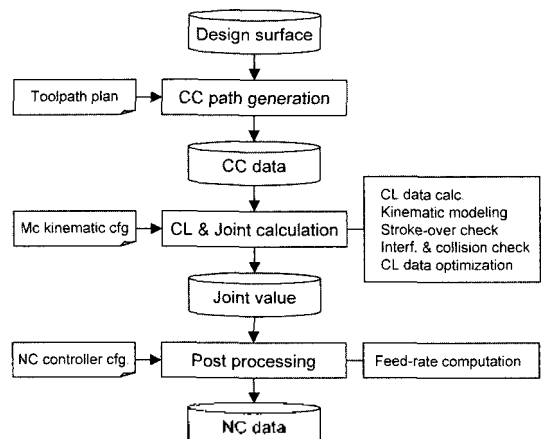


Fig. 1. General five-axis NC data generation procedures.

\*학생회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

\*\*정회원, 영남대학교 기계공학부

- 논문투고일: 2003. 07. 22

- 심사완료일: 2003. 09. 19

(collision) 확인, 5축 NC 기계의 기구학 모델링, 공구 자세 최적화(optimization) 및 평활화(smoothing) 등에 대한 연구가 수행되어 왔다<sup>[1,6,8-17]</sup>.

5축 가공시 공구자세 최적화 문제는 크게 단일 CC point에 대한 공구자세 최적화 문제와, 연속된 CC point들에 대한 공구자세 최적화(CC path에 대한 최적화) 문제로 나누어 생각할 수 있겠다. 많은 기존 연구들이 단일 CC point에 대한 공구자세 최적화 문제를 다루었으며, 일반적으로 커슝(cusp) 높이 혹은 곡률(curvature)을 기준으로 최적화 과정을 수행하였다. 또한 연속된 CC point들을 대상으로 하는 최적화 문제는 공구자세 평활화(smoothing) 내지는 공구충돌 검사에 의한 공구자세 변경 등의 접근방식을 위한 연구 등을 찾아볼 수 있다<sup>[10,25]</sup>.

본 연구는 기존의 개별 CC point에서의 공구자세 최적화 연구<sup>[23]</sup>를 바탕으로, 연속된 CC point 사이에서 공구 이동에 의해 발생하는 과절삭(overcut) 및 미절삭(uncut)을 함께 고려하는 near-net-shape 가공을 위한 가공데이터 생성을 다루고자 하였다.

일반적인 가공 데이터 생성의 경우, 곡면 상에서 CC point를 추출할 때, 그리고 각 CC point에서 CL data를 계산하는 과정에서 제반 간섭(interference)을 제거할 때, 주어진 가공허용오차(machining tolerance)를 고려한다. 하지만 실제 가공에서는 두 CC point 간의 공구 이동시 허용오차를 벗어나는 과절삭 혹은 미절삭이 발생할 가능성이 많다. 이러한 상황에서 발생하는 과절삭을 볼록간섭(convex interference)<sup>[12]</sup>으로 칭하기도 한다.

허용오차를 벗어나는 과도한 미절삭 및 과절삭 발생은 결과적으로 설계곡면과 가공곡면의 차이를 크게 만드는 것이며 이를 제거 또는 최소화 하기 위한 적절한 조치가 필요하다. 본 연구에서는 공구에 의해 형성되는 공구이동궤적면(TSS: tool swept surface) 모델과 모의가공(cutting simulation) 알고리즘을 이용하여, 설계곡면과 가공곡면의 차이가 허용오차 이내에 들도록 CC point 위치와 공구자세를 능동적으로 계산하는 방안을 제안하고자 하였다. 이때 개별 CC point에서의 공구자세는 기존의 최적화 과정<sup>[23]</sup>을 거쳐 계산하도록 하였으며, 공구 운동은 5축 가공까지 고려하였다.

본 논문의 2절에서는 공구회전각도, 공구이동궤적면 등에 대한 정의를 하였으며, 3절에서는 본 연구에서 다루는 가공데이터 생성 문제를 정의하였다. 이후 4절과 5절에서는 구체적인 계산 절차 및 적용사례를 살펴보았다.

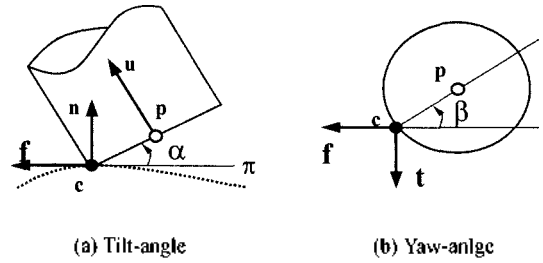


Fig. 2. Tool orientation angles.

## 2. 정의

### 2.1 공구회전각도

Fig. 2는 평엔드밀 및 페이스밀의 공구자세(CL) 계산을 위한 공구 좌표계 및 공구회전각도(tool orientation angle)를 나타내고 있다. 이때 공구 접촉점 c와 c에서의 곡면 단위법선벡터 n을 CC 데이터 (c, n)로 정의하고 (c, n)에서의 CL 데이터 (p, u)는 공구 중심점 및 공구 축방향벡터로 구성된다.

5축 가공시 CC 데이터에 공구가 접촉한 상태에서 단일 공구자세를 결정하는 제약조건으로 두 개의 공구 회전각도를 Fig. 2에서의 (α, β)로 정의하고, 이를 각각 'tilt-angle'(Fig. 2(a))과 'yaw-angle'(Fig. 2(b))로 부른다. 'Tilt-angle' α는 곡면 단위법선벡터 n과 공구 축방향벡터 u가 이루는 각도이며, 'yaw-angle' β는 곡면 단위법선벡터 n을 중심으로 공구위치점 p가 회전한 각도이다. Fig. 2에서 f는 공구접촉점 c에서 공구의 진행벡터(feed vector)를 의미하며, t는 n×f로 계산되어진다.

이 같은 정의에 따라 페이스 밀 또는 평엔드밀 공구의 경우 공구좌표계 (c, n) 및 (f, t, n, c)에 대한 단일 공구자세 (p, u)는 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u &= n \cos \alpha + \sin \alpha (f \cos \beta + t \sin \beta) \\
 p &= \begin{cases} c + R(u + n + u) / |u \times n|, & |u \times n| > 0 \\ c - Rf, & |u \times n| = 0 \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

where, R = cutter radius.

### 2.2 공구이동궤적면

본 연구에서는 가공 중 연속된 공구의 이동시 발생할 수 있는 과미절삭 확인을 위해 공구 이동에 의해 형성되는 TSS를 계산하여 가공오차(machining error)를 예측(계산)하는 방법을 취하고 있다. 여기서 TSS 자체의 생성은 기존의 연구<sup>[12,26]</sup>를 활용하였다.

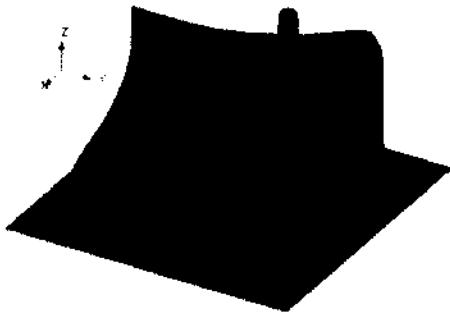


Fig. 3. Overall tool swept surface for a path.

5축 NC 기계의 경우 기계 운동학적 구조(kinematic structure)에 따른 직선 및 회전운동 축 구성이 상이하 며 NC 기계마다의 컨트롤러 보간(interpolation)특성 이 달라질 수 있으므로, 정확한 TSS 생성을 위해서는 이들 정보를 고려하는 일이 필요하다고 사료된다.

Fig. 3은 가공오차 계산을 위해 생성한 TSS의 예를 보이고 있는데, 등매개변수(iso-parametric) CC 곡선 상의 각 CC point 구간에 대한 일련의 TSS들을 연결 하여 나타낸 경우이다. 여기서 CC point  $CC_i$  과  $CC_{i+1}$  에 대한 공구이동궤적면을 TSS<sub>i</sub>라 할 때, 전체 NC 블록에 의한 공구이동궤적면은 모든 TSS<sub>i</sub>의 합집합 (union)으로 정의한다.

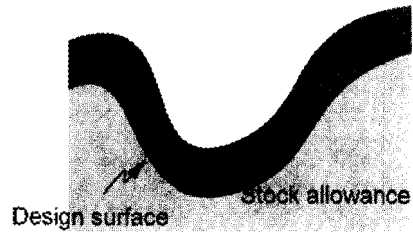
### 2.3 가공 오차

본 연구에서 정의하는 가공오차(machining error)의 개념을 Fig. 4에 나타내고 있다. 가공오차는 가공 면 (machined surface)이 설계곡면(design surface)보다 더 많이 가공되는 과절삭(overcut 또는 gouging)과 그 반대의 경우인 미절삭(uncut)으로 나누어 정의한다. 여기에서 과절삭은 임의의 공구접촉점에서 정지상태의 공구에 의해 발생하는 경우도 포함한다. 일반적으로 가공데이터를 생성함에 있어서 과/미절삭 양이 가공 허용오차(machining tolerance)를 초과하지 않도록 하는 일은 매우 중요하다.

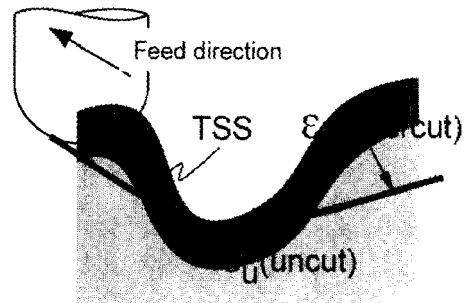
여기에서 공구이동궤적면( $S_T$ ), 설계곡면( $S_D$ ) 및 초 기피삭재( $W_i$ )를 솔리드로 생각한다면, 가공오차( $e_M$ )는 개념적으로 다음과 같이 과절삭( $e_O$ ) 및 미절삭( $e_U$ )으 로 나누어 정의할 수 있겠다. 이때  $W_i$ 는 솔리드모델링 의 'difference' 연산자이며,  $W_M$ 는 가공곡면(machined workpiece)이다.

$$e_U = W_M - S_D \text{ and } e_O = S_D - W_M,$$

where  $W_M = W_i - S_T$ .



(a) Surface and stock-allowance



(b) TSS, overcut and uncut values

Fig. 4. Machining error.

실제 구현에 있어서는 개별 NC 블록에서 공구이동 으로 형성되는 단위 TSS에 대해 과/미절삭을 확인하 는 작업이 필요한데, 이에 대해서는 4절에서 살펴보 기로 한다.

### 3. 문제 개요

2.3절에서 보았듯이 설계곡면과 가공결과와의 차이 인 가공오차는 현실적인 절삭가공에서는 필연적인 것 으로서, 이 오차를 최소화 하는 것이 많은 연구의 목 적이다. 절삭가공의 경우만을 볼 때, 설계곡면과 가공 결과의 차이가 나타나는 원인은 크게 기하적 (geometric)인 것과 물리적(physical)인 것으로 구분하 는데, 전자의 경우는 일반적으로 공구운동으로 형성 되는 기하학적 공구이동궤적(tool swept volume)이 설 계곡면을 침범하거나 절삭여유가 큰 경우에 해당한다. 반면 후자의 경우는 기계정밀도, 공구 휨(deflection) 또 는 진동(chattering) 등이 대표적인 원인으로 본 연구 에서는 고려하지 않는다.

기하적인 가공오차 발생은 단일 CC 점 및 CC 블 목의 두 가지로 구분하여 고려할 수 있다. 단일 CC 점 에 공구가 접촉한 상태에서 발생하는 과절삭 (concave interference)<sup>[1]</sup>의 방지에 대해서는 이미 많 은 연구가 있어 왔으며, 본 연구에서는 기존 연구를

활용하도록 한다. 본 연구의 주 관심은 두 CC 점 사이(블록)를 이동하는 공구 운동에 의해 발생하는 과절삭 및 미절삭을 최소화 하는 과정이다.

거의 모든 3축 가공에서 각 블록의 공구 운동은 직선 이동을 하며, 5축 가공의 경우 일반적으로 2개 회전축 운동이 추가되어 직선 및 회전 이동의 결합으로 나타난다. 따라서 3축 가공에 비해 5축 가공은 다소 복잡한 공구이동계획면(TSS)이 형성됨을 알 수 있다.

여기에 더하여, 자유곡면(sculptured surface)에 정의된 가공경로(CC path) 상에서 진행간격(step-length)은 일반적으로 곡소 곡률(curvature)값을 활용하여 계산하는 경우가 많으며, 경우에 따라서는 공구의 곡률도 함께 고려하는 경우도 있다<sup>11)</sup>. 그러나 실제 블록 이동시 공구이동체적을 고려하는 것은 아니므로, 여전히 가공오차가 발생할 개연성이 높다.

이상의 논의를 정리하여, 본 연구에서는 다음과 같은 접근 방식을 취하기로 한다.

- (1) 개별 CC 점에서는 제반 간섭이 없는 상태에서 최대 소재제거를 목표로 최적 공구자세를 결정한다.
- (2) 두 CC 점으로 구성된 CC 블록에서 공구 운동에 의한 가공오차(과미절삭)는 허용오차 이내가 되도록 한다.

여기에서 최대 소재 제거를 위한 공구자세 결정은 일반적으로 곡률 또는 곡률반경을 주요 측정치로 사용하는데, 본 연구에서는 공구유효반경을 활용하였다<sup>23)</sup>.

### 4. 가공데이터 생성 절차

3절에서 보인 바와 같이 본 연구에서 제시하고자 하는 CC path 상에서의 최적화문제는, 각 CC point에서의 공구자세를 최적화 하면서 두 CC point로 구성되는 CC 블록에 대한 가공오차(ε)를 주어진 가공허용오차(τ) 이내로 만드는 문제이다. 4.1절에서 전반적인 절차를 보이고, 보다 구체적인 설명을 이어가기로 한다.

#### 4.1 전반적인 절차

공구경로(CC path)는 실체곡면  $r(u, v)$ 상의 곡선  $r(t)$ ;  $0 \leq t \leq 1$ 로 주어진다 가정하고, 가공 시작점은  $r(0)$ 이다. 또한 가공허용오차는  $\tau$ 로 주어지며, 진행방향(feed direction)으로의 곡률값을 이용하여 진행간격(step-length)  $\lambda$ 를 구한다<sup>12)</sup>.

우선 각 공구접촉점(CC point)에서 최적 공구자세(CL data)는 이전 연구<sup>23)</sup>에서 제안한 방식을 사용하

였다. 그러면 현재 CC point에서  $\lambda$ 를 이용하여 다음 CC point의 초기 위치를 구하였을 때, 두 CC point에서의 최적 공구자세로부터 공구쾌적곡면 TSS를 계산할 수 있다. TSS 및 모의가공 알고리즘을 활용하여 계산한 가공오차(ε)와 허용오차 τ와의 비교를 통해 λ를 조정하거나 다음 블록으로 넘어가도록 한다.

이상의 과정을 다시 정리하면 다음과 같다.

#### Procedure Generate\_CL;

- 0. Input:  $\tau =$  machining tolerance,  $r(t) =$  CC path;
- 1.  $i = 1, t = 0$ , evaluate 1st CC:  $C_{i,t} = r(0)$ ;
- 2. Determine optimal CL at  $C_{i,t}$ :  $CL_{i,t}$ ;
- 3. Determine step-length:  $\lambda \leftarrow \tau$ ;
- 4. Evaluate CC point:  $C_i = r(t + \lambda)$ ;
- 5. Determine optimal CL at  $C_i$ :  $CL_i$ ;
- 6. Compute tool swept surface:  $TSS_i \leftarrow CL_{i,t}, CL_i$ ;
- 7. Compute machining error:  $\epsilon \leftarrow TSS_i$ ;
- 8. If  $\epsilon > \tau$  then adjust step-length  $\lambda$  and go to 4,
- 9.  $i = i+1, t = t + \lambda$ ;
- 10. If  $t \geq 1$  then stop else go to 3.

#### 4.2 단일 CC 점에서의 최적 공구자세 및 TSS

연속된 공구이동에 의한 가공오차 및 과미절삭 계산을 위해 본 연구에서는 두 CC point로 구성되는 각 CC 구간에 대한 TSS를 모델링하고, 이 과정을 하나의 CC path를 구성하는 모든 CC 구간에 대하여 동일한 방법으로 적용하는 방식을 취하고 있다.

각 CC 구간에 대한 TSS 생성을 위해서는 각 CC point에서의 적절한 (혹은 최적) 공구자세, 즉 공구회전각( $\alpha, \beta$ )을 계산하는 것이 필요하다. 개별 CC point에서의 최적 공구회전각( $\alpha, \beta$ )을 계산하는 방법은 여러 가지가 제시되었으며<sup>17,18,19,21)</sup>, 본 연구에서는 C-space 및 공구 유효반경을 이용한 최적화 방안<sup>23)</sup>을 활용하였다. 공구유효반경은 공구진행방향으로 공구를 투영한 후(Fig. 5) 공구접촉점 c에서의 곡률반경을 계산하였으며, 제반 간섭이 없는 상태에서 최대 유효

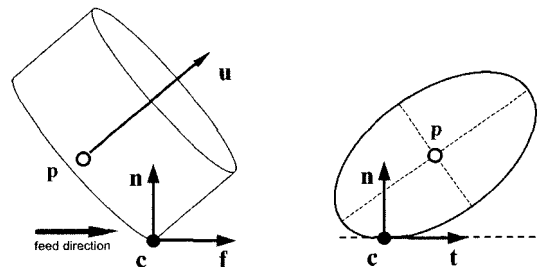


Fig. 5. Projected tool silhouette.

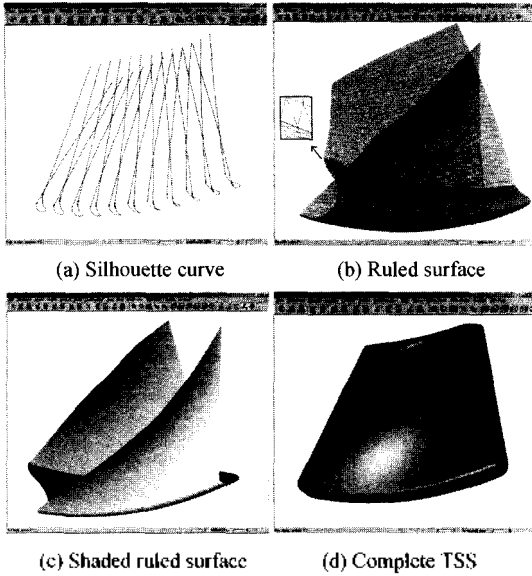


Fig. 6. Five-axis TSS example for a block.

반경을 가지는 공구회전각도 즉 공구자세를 구하도록 하였다.

참고로 C-space는 일반적으로 로봇 경로계획에 사용하는 개념<sup>[20,21]</sup>으로서, 5축 가공의 경우에는 공구회전각을 정의역(domain)으로 하는 2차원 지도 형태라고 할 수 있겠다. 각 CC point에 대한 C-space는 임의의 공구회전각( $\alpha, \beta$ ) 정의역에서 제반 간섭영역 및 간섭이 없는 영역(feasible region)을 표시한다.

이제 CC point  $CC_{i,1}$  및  $CC_i$ 의 공구자세 즉 공구회전각이 결정되면, 이 구간의 공구 이동에 따른 공구이동궤적면(tool swept surface)  $TSS_{i,1}$ 를 계산하고 과절삭 및 미절삭 계산에 활용한다. 본 연구에서는  $TSS_{i,1}$ 를 해당 영역 내에서 설계곡면과 비교함으로써 공구 이동에 의한 가공오차(machining error)를 계산하게 된다. 본 연구에서 사용하는 TSS 계산 방법은 별도 참고문헌<sup>[22,26]</sup>을 참조할 수 있으며, Fig. 6에 한 CC 블록에 대한 5축 가공 TSS 예를 보이고 있는데, Fig. 6-(a)는 공구이동으로 형성된 실루엣(silhouette) 곡선, Fig. 6-(b),(c)는 이 곡선으로 만든 ruled surface 를 보이고 있으며, Fig. 6-(d)는 공구를 포함하는 완전한 TSS 형상을 보이고 있다.

4.3 과절삭 계산

과절삭 계산은 각 CC 블록의 TSS와 설계곡면을 비교하는 단계로서, z-map 모의가공(cutting simulation) 알고리즘을 활용하였다<sup>[23]</sup>. 부연하자면, TSS에 의한

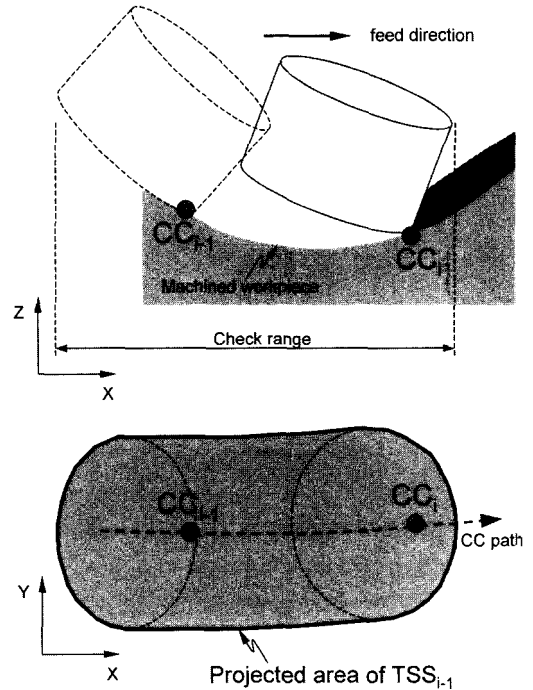


Fig. 7. Overcut check.

모의가공 곡면과 설계곡면의 비교를 통해 과절삭 양을 계산하는 과정이다. 본 연구에서는 피삭재 모델 z-map을 모의 가공한 가공곡면과 설계곡면 z-map을 서로 비교하였으며, 비교 대상 영역은 해당 TSS 투영영역으로 하였다. Fig. 7은 단일 CC 블록의 TSS에 의한 모의가공 및 TSS 투영 영역의 개념도이다.

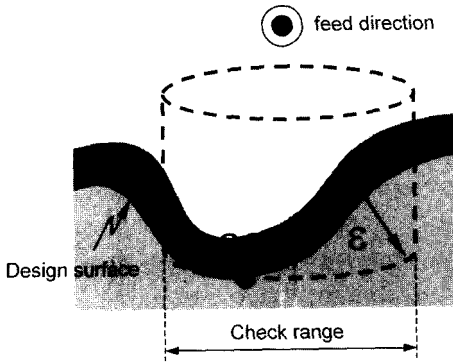
과절삭 양의 계산은 결국 두 z-map 간의 거리 계산이 되는데, 기준 방향에 따라 크게 z 방향 또는 법선 방향으로의 거리를 구할 수 있다. Z 방향으로 비교할 경우 해당 TSS에 대한 과절삭 양은 다음과 같은 식으로 결정한다. 여기서  $Z_r$ 는 가공곡면 높이값이고,  $Z_s$ 는 설계곡면의 높이값이다.

$$\epsilon_o = \text{MIN}(Z_r - Z_s, 0) \text{ within a given area.}$$

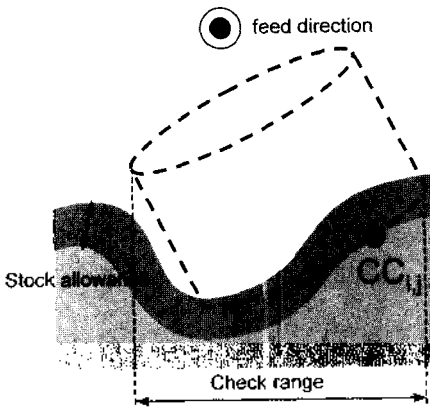
그러나 수직방향으로의 비교는 계산이 간단한 반면 경사면에서 상당한 오차를 포함하는 단점을 가지므로, 법선 방향을 추정할 수 있는 경우는 이를 활용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 설계곡면 z-map 격자점에서 추정된 법선벡터(normal vector)를 따라 가공곡면까지의 거리를 구하는 방식을 적용하였다.

4.4 미절삭 계산

각 CC 블록에서의 과절삭 계산은 해당 TSS 가공



(a) Overcut magnitude :  $\epsilon$



(a) Uncut magnitude

Fig. 8. Ambiguity in undercut check.

면과 설계곡면간의 직접 비교로서 가능한데 반해, 미절삭 양은 동일한 방식의 비교가 어렵다. 이는 각 CC 블록에서 발생하는 과절삭 양은 해당 블록의 TSS만으로 결정되는데 반해, 미절삭의 경우는 해당 CC 블록 및 주위의 타 블록에 의한 복합적 결과이기 때문이다.

Fig. 8-(a)는  $i$ 번 경로의  $j$ 번 CC 점에 TSS에 의한 과절삭 양( $\epsilon$ )을 보이며, Fig. 8-(b)는 미절삭의 예를 보이고 있는데, 과절삭의 경우는 TSS 영역 내에서 잘 정의되지만 미절삭은 명확하지 아니함을 보여준다.

특히 본 연구에서 제안하는 과절삭 및 미절삭 계산 문제는 해당 CC 경로만을 고려하며, 이웃하는 CC 경로는 고려하지 아니한다. 따라서 본 연구에서는 미절삭의 경우 두 CC point( $CC_{i-1}$ 과  $CC_i$ )를 연결하는 설계곡면상의 3차원 기준곡선(reference curve)을 정의하고, 이 곡선위의 추출 점에서 TSS 가공곡면까지의 거리를 미절삭 양으로 하였다(Fig. 9).

과절삭 계산과 마찬가지로 TSS에 의한 가공곡면은

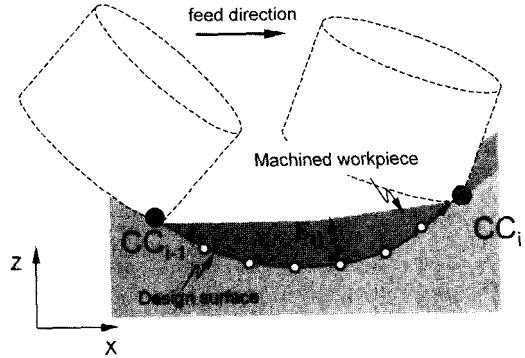


Fig. 9. Uncut check.

$z$ -map으로 표현하며, 기준곡선 상에서 일정 간격으로 3차원 점을 취한 후 각 점에서 곡면법선 방향으로 TSS에 이르는 거리( $L_n$ )를 계산함으로써 미절삭 양을 계산한다. 미절삭 양( $\epsilon_n$ )은 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_n = \text{MAX}(L_n, 0), \text{ within the reference curve.}$$

#### 4.5 가공오차 계산 및 CC 점 위치 수정

본 연구에서 두 CC point  $CC_{i-1}$ 과  $CC_i$  간의 가공오차(machining error)  $\epsilon_M$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_M = \text{MAX}(\epsilon_n, |\epsilon_n|) > 0.$$

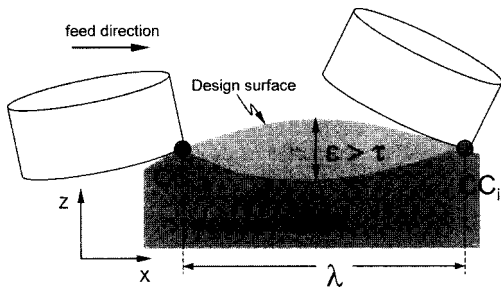
가공허용오차(machining tolerance)  $\tau$ 가 주어졌을 때, 초기 CC point에 대한 해당 구간의 가공오차와의 관계는 다음과 같은 2가지 경우로 구분한다.

- (i)  $\epsilon_M \leq \tau$ .
- (ii)  $\epsilon_M > \tau$ .

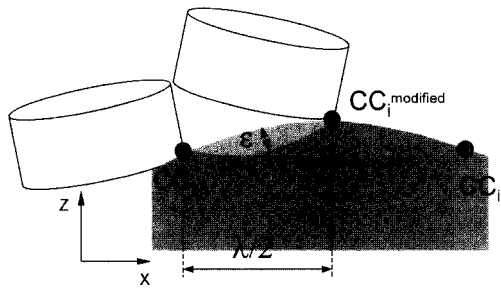
우선 (i)의 경우는 가공오차가 허용오차 이내에 드는 경우로서  $CC_i$ 의 위치를 수정할 필요가 없다. 반면 (ii)의 경우는  $CC_i$  위치를 조정하여 가공오차가 허용오차 이내에 들게 만들 필요가 있다.

(ii)는 과절삭 또는 미절삭 양이 허용오차를 초과하는 경우로서, 설계곡면상의 CC 곡선을 따라  $CC_i$ 의 위치를  $CC_{i-1}$  방향으로 이동시켜 간격을 줄인다. 이후 수정된 위치에서 새로운 공구자세 및 TSS를 구하고, 이에 따른 과/미절삭 계산을 통하여 (i)의 조건을 만족하는지 확인한다.

본 연구에서는 이러한 위치 수정에 있어서 일반적인 반분법(bi-section method)을 사용하였다. 즉  $CC_{i-1}$ 에서 계산한 진행간격(step-length)  $\lambda$ 에서 가공오차가 허용오차를 초과하면, 진행간격을  $\lambda/2$ 로 줄이도록 한다. Fig. 10은 (ii)의 예를 나타내고 있다.



(a) Initial CC position :  $\epsilon > \tau$



(b) Move CC position by  $\lambda/2$

Fig. 10. Initial & modified CC position.

### 5. 구현 및 적용 예제

본 장에서는 선박용 프로펠러 곡면 가공에 있어서 상기 최적화 과정을 적용한 예를 살펴해보도록 하겠다. 참고로 본 연구결과는 국내 H사에서 대형 선박용 프로펠러를 가공하는 전용 시스템으로 구현되어 사용 중에 있다. 가공 대상 프로펠러는 일반적으로 지름이 6~10 m, 날개 수는 4~6개이며 피삭재(workpiece)는 황동 계열의 주물이다.

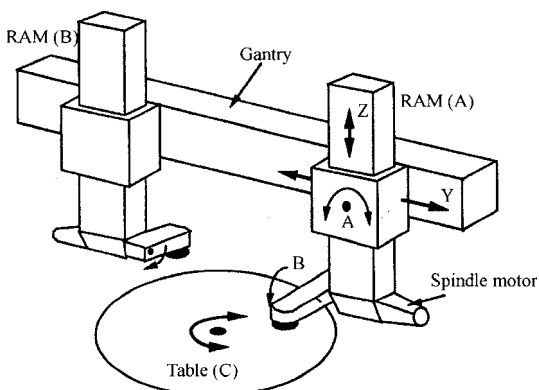


Fig. 11. NC machine for marine propeller machining.

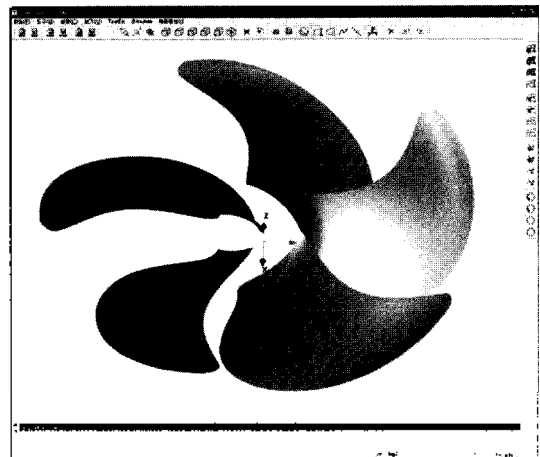


Fig. 12. Blade CAD model.

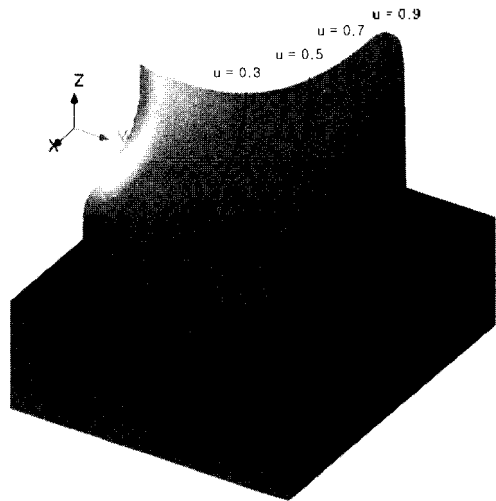


Fig. 13. Blade z-map model and CC paths.

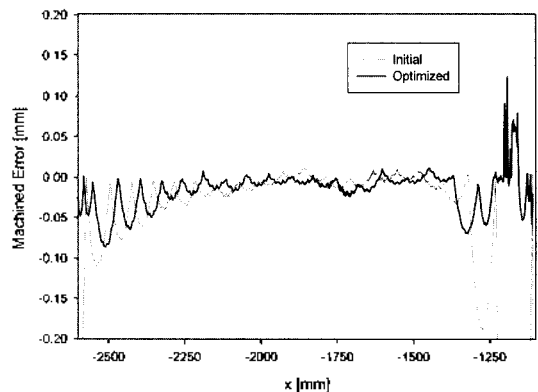


Fig. 14. Machining error before & after optimization: path 1.

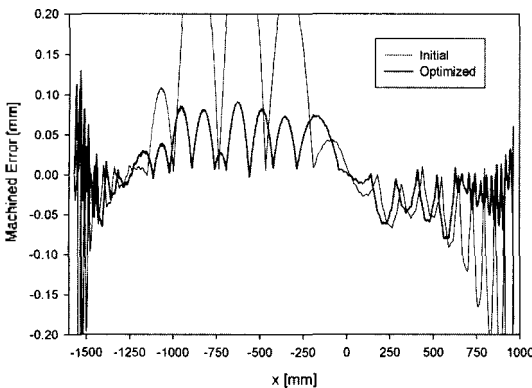


Fig. 15. Machining error before & after optimization: path 3.

Fig. 11은 적용 NC 기계의 모습을 보이고 있으며 Fig. 12 및 Fig. 13은 예제로 적용한 프로펠러 곡면모델의 형태와 CC path 예를 나타내고 있다. CC path는 등매개변수형(iso-parametric)이며 각각  $u=0.9$ ,  $u=0.7$ ,  $u=0.5$  및  $u=0.3$ 의 위치에서 생성하였다. 초기 CC point 생성 및 최적화 수행과 관련하여 가공 허용오차(machining tolerance) = 0.1이며,  $\Phi 250$  페이스 밀링 공구를 사용하였다.

Fig. 14 및 15는 첫 번째( $u=0.9$ ) 및 세 번째( $u=0.5$ ) CC 경로에 대하여 본 연구를 적용한 결과를 보이고 있는데, 최적화 수행 전 후의 계산된 가공오차를 비교하여 나타내었다.

본 그래프는 각각 CC path상의 위치(x좌표) 및 가공오차를 나타내었으며, "initial"로 표시된 자료는 최적화를 수행하지 아니한 가공데이터로 모의가공한 후 설계곡면과 가공곡면간의 오차를 보여준다. 그래프에서 알 수 있듯이 각 CC 점에서는 가공오차가 거의 발생하지 않지만, 실제 공구이동에 의한 과절삭/미절삭 양은 허용오차(0.1)를 초과하는 경우가 많이 발생함을 확인할 수 있다.

이에 반해 본 연구를 적용한 가공데이터에 의해 모의가공된 곡면과 설계곡면간의 가공오차("Optimized")는 모두 허용오차 내에 들어왔음을 알 수 있다. 특히 Fig. 15는 미절삭 양도 허용오차 이내에 들어왔음을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 페이스밀 또는 평엔드밀을 사용한 5축 가공데이터 생성 시, CC 경로 상에서의 공구자세 최적화 및 TSS를 활용한 가공오차 제어 방안을 제안하였다.

이를 위해 CC 블록에서 발생하는 공구이동계속면(TSS) 형상을 통한 가공오차, 즉 과절삭 및 미절삭 양을 정의하고 계산하였으며, CC 점의 위치를 조정함으로써 가공오차가 허용오차 이내에 들도록 하는 방안을 제안하였다. 이 과정에서 각 CC 점에서의 공구자세 최적화는 기 수행 연구를 활용하였다. 그리고 제안한 방안을 실제 선박용 프로펠러 페이스 밀링 가공에 대해 적용하여 최적화 수행 전후의 가공오차 비교를 통하여 그 결과를 살펴보았다.

본 연구 결과는 일반적인 3축 가공의 볼록간섭(convex interference) 문제 해결에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 영남대학교 BK 21 사업 및 현대중공업 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

1. 조현덕, 진용태, 양민양, "5축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 8, pp. 2001-2022, 1993.
2. Mason, F., "5 × 5 for High-productivity Airfoil Milling," *American Machinist*, Nov, pp. 37-39, 1991.
3. 이철수, 박광렬, "Heel angle 조정에 의한 터빈 블레이드의 5축 NC 가공 데이터 생성," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol. 4, No. 2, pp. 110-120, 1999.
4. Tonshoff, H. K. and Hernaandez-Camacho, J., "Die Manufacturing by 5-and 3-Axis Milling," *J. of Mechanical Working Technology*, Vol. 20, pp. 105-119, 1989.
5. 강제관, "공구간섭과 절삭성을 고려한 자유곡면의 4,5축 NC 가공을 위한 공구 경로 산출," 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 2, pp. 146-153, 1998.
6. Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5 Axis Control Collision-free Tool Path and Postprocessing for NC Data," *Anal. of the CIRP*, Vol. 41/1/1992, pp. 535-542, 1992.
7. Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., "Cutter-location Data Optimization in 5-Axis Surface Machining," *Computer Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993.
8. Takeuchi, Y. and Idemura, T., "5-axis Control Machining and Grinding Based on Solid Model," *Anal. of CIRP*, Vol. 40/1/1991, pp. 455-458, 1991.
9. Li, S. X. and Jerard, R. B., "5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-end Cutter," *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 165-178, 1994.



10. Morishige, K., Kase, K. and Takeuchi, Y., "Collision-free Tool Path Generation Using 2-Dimensional C-Space for 5-Axis Control Machining," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 393-400, 1997.
11. 전차수, 박세형, 전용태, "자유곡면의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 10권, 제1호, pp. 52-61, 1993.
12. Choi, B. K. and Jerard, R. B., *Sculptured Surface Machining*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
13. Hwang, J. S., *Five-axis NC Machining of Compound Sculptured Surface*, Ph. D. Thesis, Purdue Univ., 1997.
14. 박정환, "금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구," 박사학위논문, 한국과학기술원, 1995.
15. 이정근, "Z-map을 이용한 평엔드밀의 5축 가공데이터 생성 시 효율적인 공구간섭 처리에 관한 연구," 석사학위논문, 영남대학교, 1998.
16. 차경덕, 김동수, 전차수, 조규갑, 이민철, "5축 연바기를 위한 전용 CAM 시스템," 대한기계학회 생산 및 실계공학부 학술행연회 강연집, pp. 27-31, 1998.
17. Lee, Y. S. and Chang, T. C., "2-Phase Approach to Global Tool Interference Avoidance in 5-axis Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 27, No. 10, pp. 715-729, 1995.
18. 김효종, "C-Space를 이용한 평엔드밀의 5축 가공데이터 생성 시 공구자세 최적화에 관한 연구," 석사학위논문, 영남대학교, 2000.
19. 전차수, 차경덕, "복합곡면의 5축 NC 가공을 위한 공구자세 최적화," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제5권, 제4호, pp. 393-402, 2000.
20. Perez, T., "A Simple Motion-planning Algorithm for General Robot Manipulators," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 3, pp. 224-238, 1987.
21. Kohler, M. and Spreng, M., "Fast Computation of the C-space of Convex 2D Algebraic Objects," *Int'l Journal of Robotics Research*, Vol. 14, No. 6, 1995.
22. Jung W. Park, Yun C. Chung, Hoi M. Jeong, "Five-axis Tool-path Verification via DVM," *Proceeding of the 32nd ISR*, pp. 79-83, April, 2001.
23. 박정환, 이정근, "C-space 및 유효반경-맵을 이용한 5축 페이스 밀링의 공구자세 최적화에 관한 연구," 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 34-41, 2002.
24. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, *CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공*, 善重堂, 1996.
25. Cha-Soo Jun, Kyungduck Cha and Yuan-Shin Lee, "Optimizing Tool Orientations for 5-axis Machining by Configuration-space Search Method," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, No. 6, pp. 549-566, 2003.
26. 신양호, 박정환, 정연찬, "DVM 및 Z-map 복합모델을 이용한 금형의 모의가공," 한국정밀공학회지, 제 20권, 제5호, pp. 47-56, 2003.



**이 정 근**

1997년 영남대학교 기계공학과 학사  
 1999년 영남대학교 대학원 기계공학과 석사  
 2003년 영남대학교 대학원 기계공학과 박사  
 2003년~현재 일진테크원  
 관심분야: 금형가공, 금형실계



**박 정 환**

1987년 서울대학교 물리학과 학사  
 1991년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 1995년 한국과학기술원 산업공학과 박사  
 1995년~1997년 Chrysler Technology Center 연구원  
 1997년~현재 영남대학교 기계공학부 부교수  
 관심분야: Virtual Manufacturing, RE, OMM