

C-space 및 유효반경-맵을 이용한 5축 페이스 밀링의 공구자세 최적화에 관한 연구

박정환*, 이정근**

CL-data Optimization of 5-axis Face-milling Via C-space and Effective-radius Map

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

ABSTRACT

Five-axis NC machining, in general, is utilized in fabricating impellers, turbine blades, marine propellers that can be machined more effectively rather than three-axis machining. There have been many researches concerning tool interference avoidance, optimization of tool orientation. The C-space or Configuration-space was originated from the robotics area, which depicts interference-free joint-values in motion planning. In the paper we propose an optimizing scheme by which the maximum effective-radius of a face-milling cutter can be achieved for each CC(cutter-contact) point. Also the concept of a C-space for a CC point, the effective-radius map for 5-axis face-milling, and some illustrative examples of marine propeller machining, are presented.

Key words : 5-axis machining, C-space(Configuration space), Effective radius, Optimal tool position

1. 서 론

일반적으로 5축 NC 가공은 가공시간 및 사상시간 단축, 가공 정밀도 향상 등의 이점이 있는 것으로 알려져 있으며^[1,2], 항공기 부품, 임펠러, 터빈 블레이드 등의 가공에 활발하게 적용하고 있다. 또한 5축 가공데이터 생성과 관련된 기구학 모델링, 경로계획, 간섭 회피, 최적화 등과 관련된 다양한 기존 연구를 찾아볼 수 있다^[3-15].

공구자세 최적화와 관련된 기존 연구를 살펴보면, 커스페이스를 이용한 최적화^[7,8], 공구실루엣의 곡률과 가공 대상 곡면의 곡률을 고려한 최적화 연구^[11-15] 등을 찾아볼 수 있다. 공구실루엣의 곡률을 이용한 연구의 경우는 대부분 공구회전각도를 충분히 활용하지 못하고 있으며^[8], 커스페이스를 고려한 최적화의 경우는 근사적으로 커스페이스를 계산하고 있다.

본 연구는 5축 NC 가공에서 페이스 밀링 또는 평엔드밀 공구를 이용한 자유곡면 가공 시, 다양한 간섭

(interference) - 과절삭, 충돌 및 기계 stroke-over를 고려한 C-space(Configuration-space)를 살펴보고, 개별 공구접촉점에서 공구 유효반경을 최대로 하는 최적 공구자세를 구하는 문제를 다루고 있다. 여기서의 유효반경은 임의의 공구회전각도에 대해 진행방향으로 투영된 페이스 밀링 공구의 실루엣 곡선(타원)의 곡률 반경을 의미하며, 본 연구에서는 $z=f(x, y)$ 형태의 유효반경-맵과 등고선-맵을 활용한 최적화 문제를 다루고자 하였다. C-space와 관련된 기존의 연구로는, 3축 가공데이터 생성시 유사한 개념을 활용한 연구^[16], 5축 볼엔드밀 가공 시 공구 충돌을 고려한 연구^[6] 등을 찾을 수 있다. 2절에서는 5축 NC 가공에서의 공구회전각도, C-space 및 공구의 유효반경을 정의한다. 3절에서 문제 정의 및 최적화 절차를 기술하고, 4절에서는 선박용 프로펠러 가공에 본 연구를 적용한 결과를 살펴보고자 한다.

2. 정 의

2.1 공구회전각도 및 공구자세

본 연구에서는 곡면 $r(u, v)$ 상의 공구접촉점(CC point) c , c 에서의 곡면 단위 법선벡터 n 을 CC 데이터

*정회원, 영남대학교 기계공학부

**학생회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

- 논문투고일: 2001. 8. 28

- 심사완료일: 2001. 9. 25

(c, n)으로 정의한다. 5축 가공에서 단일 공구접촉점에 대한 단일 공구자세를 결정하기 위해서는 2개의 공구 회전각도(tool orientation angles)를 추가로 지정하는 것이 일반적이며, 본 연구에서는 이들을 tilt-angle 및 yaw-angle로 나타내고 (α, β)로 표시하기로 한다(Fig. 1). 또한 주어진 (α, β)에 의해 계산되는 공구자세 즉 CL(cutter-location) 데이터는 공구 기준점 및 공구 축 벡터로서 (p, u)로 표시한다.

여기에서 tilt-angle(α)은 n 과 u 가 이루는 각도를 의미하고, yaw-angle(β)은 n 을 중심으로 p 가 회전하는 각도를 나타낼 수 있다. Fig. 1에서 f 는 공구접촉점 c 에서 공구의 진행벡터(feed vector)를 의미하며, $t = n \times f$ 로 계산되는 벡터이다.

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

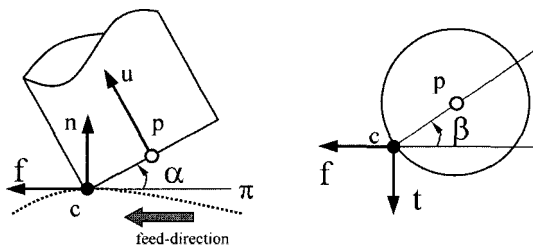


Fig. 1. Tool orientation angles.

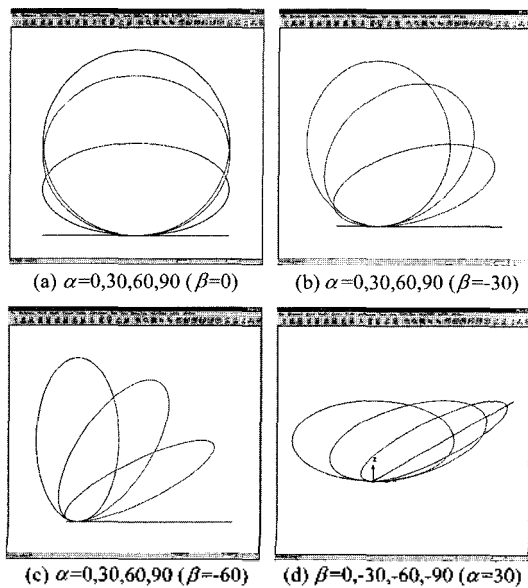


Fig. 2. Cutting edges for various tool orientation angles.

$$u = n \cos \alpha + \sin \alpha (f \cos \beta + t \sin \beta)$$

$$p = \begin{cases} c + R(u \times n \times u) / |u \times n|, & |u \times n| > 0 \\ c - Rf, & |u \times n| = 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기에서, R = 공구 반지름.

Fig. 2는 다양한 (α, β)에 대해 공구진행방향에서 살펴본 공구 바닥면 윤곽곡선(공구 실루엣)을 보이고 있으며, 기울어진 타원 형태임을 알 수 있다^[2,7].

2.2 C-space

일반적으로 C-space(Configuration space)는 로봇의 작업경로계획에 사용한 개념으로서^[17,18], 로봇 joint-space상에서 충돌 등의 제한 간섭(interference)이 없는 영역을 free-space로 나타내고 있다.

본 연구에서 고려하는 ‘간섭’은 다음과 같으며, 실 적용사례에서의 구체적 내용은 별도 참고문헌^[2,7]에 나타나 있다.

- 과절삭(gouging): 공구 절삭날과 설계곡면간의 간섭,
- 충돌(collision): 절삭날을 제외한 공구 부위, 기계 구조물, 피삭재 간의 간섭,
- 기계 스트로코오버(limit-over): 기계 축값 범위를 벗어나는 공구자세.

본 연구에서는 C-space를 ‘단일 CC 점에서, 임의의 공구회전각도(α, β)에 대해 ‘간섭’ 여부를 표시한 2차원 영역’로 정의하도록 한다. 여기서, 일반적인 5축

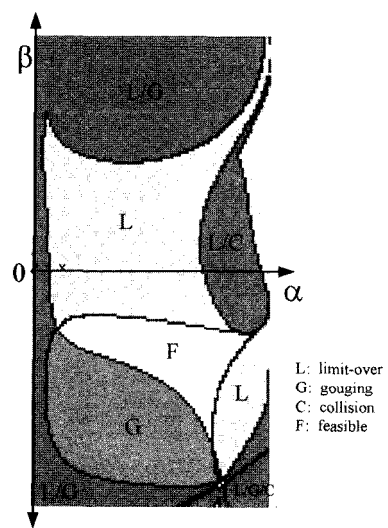


Fig. 3. Example of a typical C-space.

sturz 가공^[19]에서 유효한 (α, β) 정의역은 $\alpha \in [0, \pi/2]$, $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 라고 볼 수 있는데, 실제 가공에서는 정의역을 조정하는 경우가 발생한다. 본 연구에서 예를 들고 있는 선박용 프로펠러 가공의 경우 (α, β) 정의역은 $\alpha \in [1.5^\circ, 20^\circ]$, $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 로 두고 있다.

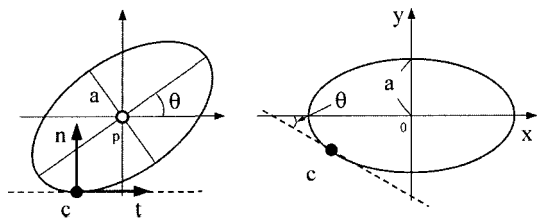
결국 단일 CC 점에 대해 C-space를 구축한다면, 그 결과로서 해당 CC 점에서 간섭이 없는 공구회전각도 영역(즉, feasible space)를 알 수 있게 된다. Fig. 3은 선박용 프로펠러 가공용 5축 공작기계를 이용한 페이스 밀링 가공^[7] 시 한 CC 점에서 생성한 C-space 예를 보이고 있다($\alpha \in [0, \pi/2]$, $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$) 참고로, 본 연구에서 정의하는 C-space는 일반적으로 모든 공구접촉점에서 상이하며, 주어진 모든 공구접촉점에서 C-space를 계산하는 일은 매우 큰 계산 부담을 가진다. 따라서 보다 효과적으로 가능해 영역(feasible space)을 찾아내는 과정이 필요하며, 이에 대해서는 3절에서 다루기로 한다.

2.3 페이스 밀링 공구의 유효반경

주어진 공구회전각도에 의해 자세를 취한 상태에서 페이스 밀 또는 평엔드밀 공구를 공구진행방향(-f in Fig. 1)에 수직인 평면에 투영하였을 때 공구 바닥면 윤곽곡선(공구실루엣 곡선)은 기울어진 타원이 된다.

본 연구에서는 임의의 공구회전각도 (α, β) 에 대한 공구 접촉점 c에서의 유효반경(effective-radius)을 고려하며, 이는 타원상의 한 점에서 곡률 반경(radius of curvature)을 계산하는 문제로 생각할 수 있다.

Fig. 4(a)는 공구접촉점 c에서 임의의 $(\alpha, \beta: \alpha > 0, \beta < 0)$ 에 의한 공구자세에 대해 투영된 타원을 보이고 있으며, Fig. 4(b)는 계산 편의를 위해 θ 만큼 회전한 표준 타원(standard form)을 나타낸다. 본 연구에서는 타원의 장반경을 1로 두었으며 (즉, 공구 반지름 = 1), 임의의 (α, β) 에 대해 타원의 단반경 a 및 θ 는 식 (2)로부터 계산할 수 있다.



(a) Projected ellipse (b) Rotated ellipse $(x^2 + y^2)/a^2 = 1$
 Fig. 4. Cutting ellipse of face-milling cutter for any (α, β) .

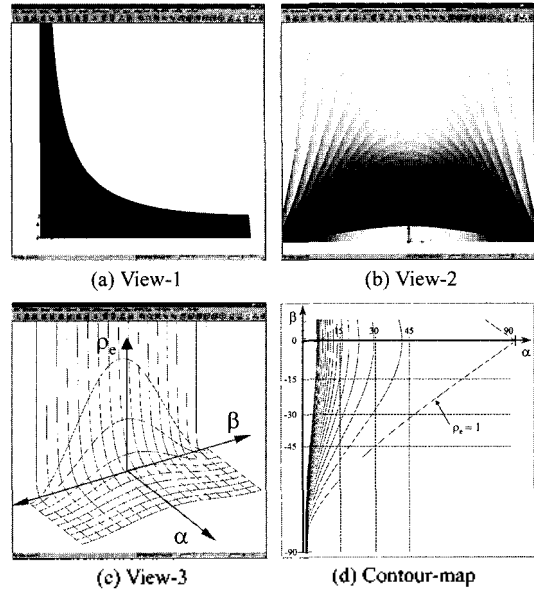


Fig. 5. Effective-radius map (Re-map) of a face-milling tool.

$$a = \sin\alpha \cos\beta$$

$$\theta = \tan^{-1}(-\tan\alpha \sin\beta) \tag{2}$$

결국 Fig. 4(a)의 공구접촉점 c에서의 곡률 반경은 표준 타원(Fig. 4(b)) 위의 점 c'에서의 곡률반경이 된다(c'은 c를 원점을 중심으로 θ 만큼 회전시킨 점이다).

Fig. 5(a)-(c)는 $\alpha \in [0, \pi/2]$, $\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 영역에서 계산된 유효반경(ρ_c)의 3차원 맵을 보이고 있는데, $\alpha \rightarrow 0$ 일 때 $\rho_c \rightarrow \infty$ 임을 알 수 있다. 또한 본 3차원 유효반경-맵(Re-map)에 대한 등고선 지도를 Fig. 5(d)에 나타내었는데, 최저 $\rho_c = 1$ 이며 간격은 0.5인 경우이다. 참고로 본 Re-map은 모든 공구접촉점에서 동일하게 적용되며, 표준 타원식의 곡률반경 계산은 부록을 참조하면 된다.

3. 문제 정의 및 최적화 절차

3.1 문제 정의

일반적으로 곡면 설계가 완성되면 공정을 계획하고 각 공정별로 하나 이상의 단위 가공 작업(UMO: Unit Machining Operation^[19])을 정의한다. UMO는 다수의 CC path에 대한 공구자세로 구성되며, 각 CC path는 연속된 CC point로 이루어진다. 따라서 5축 가공에서의 최소 단위 가공 작업은 개별 CC point에 대한 공구자세로 볼 수 있다. 이를 기준으로 다음과 같이 최적화 문제를 나누어 보자(여기서는 대상 곡면에 대한 모

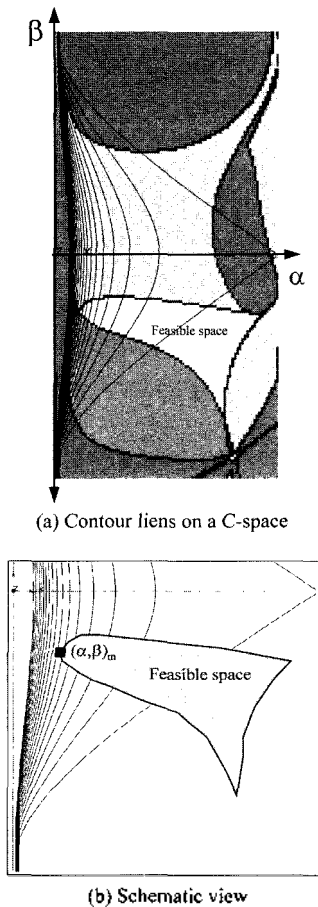


Fig. 6. Contour-map of ρ_e and a typical feasible-space.

든 CC path가 주어졌다고 가정하고, path 사이의 공구 이동은 최적화 대상에서 제외하도록 하자).

- 국소 최적화(local optimization) : 개별 CC point에서의 독립적인 공구자세 최적화,
- 광역 최적화(global optimization) : 개별 CC path 상에서의 연속된 공구자세 최적화

본 연구에서는 개별(단일) 공구접촉점에서 페이스밀 또는 평엔드밀 공구의 유효반경을 최대로 하는 최적 공구자세를 구하는 국소 최적화 문제를 다루고 있다. 공구자세(p, u)는 주어진 공구회전각(α, β)에 의해 유일하게 결정되므로 다음과 같이 최적화 문제를 정의하기로 하고, 이해를 돕기 위하여 Fig. 6(a)에 3차원 유효반경-맵(Re-map)의 등고선 지도와 feasible space Ψ 를 같이 보이고 있다.

- Objective function : maximize ρ_e
- Decision variables : tilt-angle (α),

yaw-angle (β)

• Constraint : $(\alpha, \beta) \in \Psi$, where $\Psi =$ feasible space of the C-space for a given CC-point.

우선 주어진 (α, β) 정의역 $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2], \beta \in [\beta_1, \beta_2]$ 에 대해 개별 공구접촉점에서 나타날 수 있는 Ψ 의 경우를 살펴보면 다음과 같다.

- (a) $\Psi \equiv \emptyset \rightarrow$ completely infeasible,
- (b) $\Psi \equiv$ C-space \rightarrow all feasible,
- (c) $\Psi \subset$ C-space \rightarrow feasible solution exists.

첫 번째 경우(a)는 해가 존재하지 않는 경우로서, '간섭'으로 인하여 이 공구접촉점에서는 가공이 불가능하다. 두 번째 경우(b)는 모든 공구자세가 가능한 경우로서, 대개 $\alpha = \alpha_1, \beta = \min\{|\beta|\}$ 로 결정된다(예: $\alpha = 1.5^\circ, \beta = 0^\circ$). 일반적으로는 최적해의 탐색이 필요한 (c)의 경우가 대부분인데, 여기서 Fig. 6(a) 및 다른 연구결과^[7,8]를 살펴보았을 때, ρ_e 의 최대값은 Ψ 의 경계상에 존재하는 것으로 가정할 수 있다. 단 Ψ 의 경계점은 feasible이다. 따라서 앞서 정의한 최적화 문제는 Ψ 의 경계상에서 ρ_e 가 최대인 공구회전각(α, β)_m을 찾아내는 문제가 되며(Fig. 6(b)), 이를 다시 정리하면 다음과 같다.

- Find $(\alpha, \beta)_m$ on the boundary of Ψ at which effective radius ρ_e is maximized.

3.2 최적화 절차

개별 공구접촉점에서 유효반경이 최대인 공구회전각(α, β)_m은 feasible space Ψ 의 경계에 존재하므로 일단 Ψ 의 경계에 존재하는 초기해 (α, β) 를 얻은 후 Ψ 의 경계를 따라가는 탐색을 수행하는 방식을 고려할 수 있겠다^[7,8]. 따라서 최적화 절차는 크게 (1) 초기해 (α, β) 의 결정, (2) 최적해 $(\alpha, \beta)_m$ 의 탐색으로 구분할 수 있다.

참고로, 임의의 공구회전각(α, β)에서 '간섭' 존재 여부를 계산하는 일은 상당한 계산부담을 가지며^[7], 모든 공구접촉점에서 C-space(즉 Ψ)를 계산하는 일은 매우 비효율적이다. 따라서 실제 최적화 과정에서는 각 공구접촉점에서의 Ψ 를 모두 계산하지 않는 것이 필요하며, 본 연구에서도 C-space를 모두 계산하지 않는 방식을 취하고 있다.

3.2.1 초기해 결정

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 2차 유리(rational) B-spline 곡선을 정의하고 이 곡선 상에서 1차원 탐색을

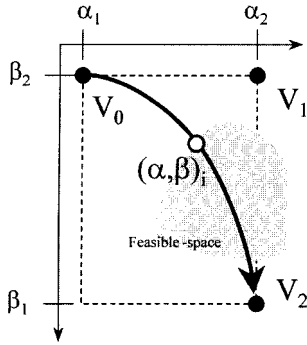


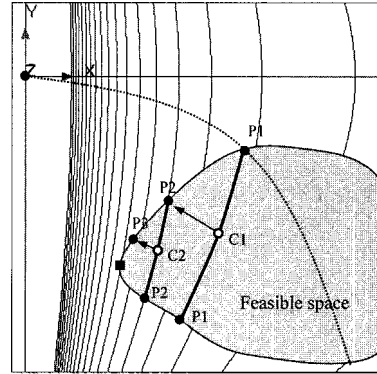
Fig. 7. Search of an initial feasible solution.

수행하여 Ψ 의 경계에 존재하는 초기해 (α, β) 를 일도록 하였다^[7]. 여기서 조정점 좌표값은 $V_0 = (\alpha_1, \beta_2)$, $V_1 = (\alpha_2, \beta_2)$, $V_2 = (\alpha_2, \beta_1)$ 이며, (α, β) 정의역은 $\alpha \in [\alpha_1, \alpha_2]$, $\beta \in [\beta_1, \beta_2]$ 이다. 이러한 접근방식은 2차원 탐색 문제를 1차원으로 단순화시킬 수 있는 장점을 가진다. 만약 $(\alpha, \beta) = (\alpha_1, \beta_2)$ 일 경우는 초기해가 바로 최적해가 되므로 추가적인 탐색은 필요없다. 또한 초기해를 발견하지 못하였을 때는 일반적인 'enumerative technique'을 사용하여 정의역 내에서 해의 존재 여부를 확인하도록 한다.

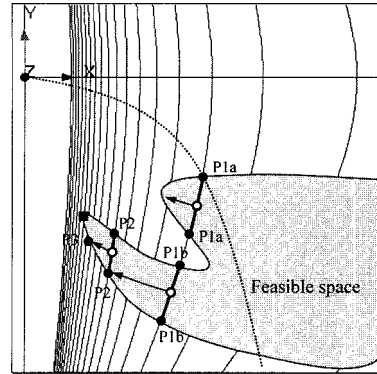
3.2.2 최적해 탐색

결정된 초기해는 일반적으로 최적해가 아니므로, 추가적인 탐색을 통하여 최적해를 결정하여야 한다. 다른 연구^[8]를 살펴보면 그리드 탐색과 유사한 방식으로 Ψ 의 경계를 탐색하는 방식을 찾아볼 수 있는데, 본 연구에서는 유효반경-맵(Re-map)의 등고선을 활용하는 방식을 제안하고 있다. 여기서 Re-map은 z-map 따위의 비매개변수형 곡면 $z = f(x, y)$ 형식으로 나타내도록 하자. 최적해 탐색과 관련하여 Fig. 8(a)는 국소 최대값이 1개만 존재하는 경우이며, Fig. 8(b)는 2개 이상의 국소 최대값이 존재하는 경우이다.

우선 첫 번째 경우에 대해, 초기해를 발견하면(P_1 in Fig. 8(a)), 해당 점에서의 유효반경 등고선을 따라 또 다른 경계점을 찾는다(P'_1 in Fig. 8(a)). 다음으로, 두 점을 잇는 등고선의 가운데 점(C_1 in Fig. 8(a))에서 유효반경 변화가 가장 큰 방향으로 이동하면서 경계점을 찾는다(P_2 in Fig. 8(a)). 실제로 변화가 가장 큰 방향은 $\nabla f_{xy} = (\partial f / \partial x, \partial f / \partial y)$ 일 것이며, 근사적으로는 $\nabla f_{xy} = (\Delta f / \Delta x, \Delta f / \Delta y)$ 로 계산된다. 경계점 P_2 에서는 다시 앞서의 과정을 반복하고, 최종적으로는 C_i 와 경계점 P_{i+1} 간의 유효반경 차이가 ϵ 이하이면 탐색을 중지하도



(a) Monotonic case



(b) Non-monotonic case

Fig. 8. Searching strategy.

록 한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

Procedure Find_Optimum_Solution;

0. Input: Re-map ($\rho_c = f(x, y)$), initial solution (P_1), stop tolerance (ϵ);
1. $i = 1$;
2. Find P'_i along the contour line at P_i ;
3. Select mid point C_i between $P_i \sim P'_i$, and $\rho_c = f(x_{ci}, y_{ci})$;
4. March along the direction of ∇f_{xy} , and find P_{i+1} on the boundary of Ψ ;
5. $\rho_{i+1} = f(x_{i+1}, y_{i+1})$;
6. If $|\rho_{i+1} - \rho_c| > \epsilon$ then $\{i = i + 1; \text{goto } 2\}$;
7. Return $P_{i+1} = (\alpha, \beta)_m$;

다음은 feasible space Ψ 가 2개 이상의 국소 최대값(local maximum)을 가지는 경우를 살펴보기로 하자(Fig. 8(b)). 실제 선박용 프로펠러 5축 가공에서 이와 같은 경우를 발견할 수 있는데, 이에 대해서는 앞서의 방식을 유사하게 적용할 수 있다. 즉 초기해 (P_1 , in

Fig. 8(b)에서의 유효반경 등고선을 따라 ψ 의 경계점을 찾아낸 후 (P_{1a}, P_{1b}, P_{1b} in Fig. 8(b)) 각 구간에 대해 앞서의 과정을 반복 적용할 수 있다.

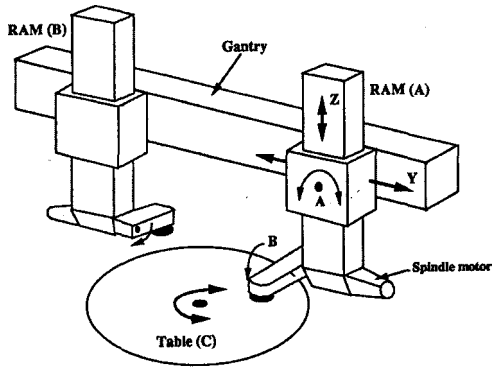
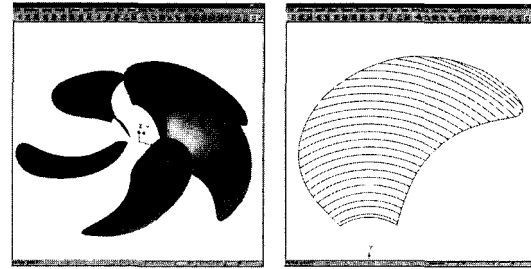


Fig. 9. NC machine for marine propeller machining.

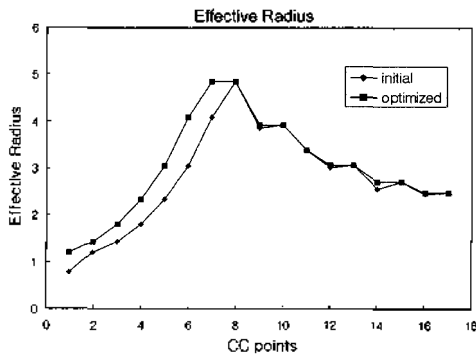
4. 적용 예제

본 연구에서는 선박용 프로펠러 곡면을 가공함에 있어서 상기 최적화 과정을 적용한 예를 살펴보도록 하겠다. Fig. 9에 적용 NC 기계를, Fig. 10은 프로펠러

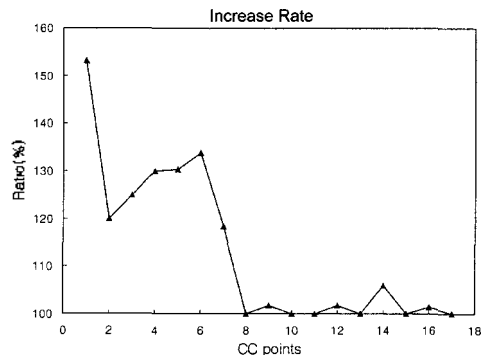


(a) Surface model (5 blades) (b) CC paths of a blade

Fig. 10. Surface model & CC paths.

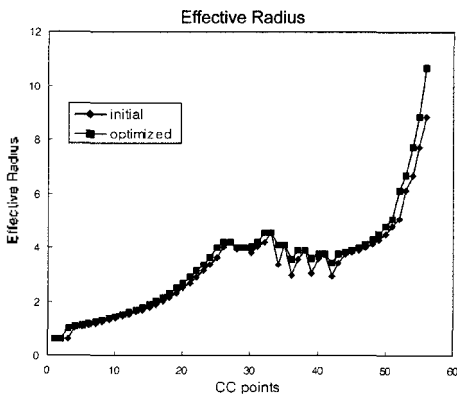


(a) Effective radii of the initial & optimized solutions

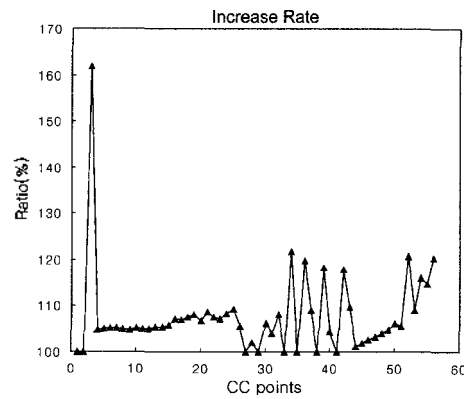


(b) Ratio(%) of the optimized to initial solutions

Fig. 11. Effective radii (initial vs. optimized) - 1st path.



(a) Effective radii of the initial & optimized solutions



(b) Ratio(%) of the optimized to initial solutions

Fig. 12. Effective radii (initial vs. optimized) - 2nd path.

곡면 모델 및 공구경로(CC paths)들을 보이고 있다. 공구는 직경 250 mm의 페이스 밀링 공구이다.

Fig. 10(b)에 보인 CC path 중 첫 번째 경로에 대해 본 최적화 과정을 적용하여 초기해와 비교한 결과를 Fig. 11에 보이고 있다. Fig. 11(a)는 초기해와 최적해의 유효반경을 나타내고 있으며, Fig. 11(b)는 비율을 보이고 있다. 평균적으로 개별 공구접촉점에서 약 13% 가량의 유효반경 증가를 나타내고 있다. Fig. 12는 두 번째 경로에 대한 결과를 보이고 있으며, 약 8% 가량 유효반경이 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 개별 공구접촉점에서 페이스 밀링 또는 평엔드 밀링 공구의 유효반경(effective radius)을 최대한으로 하는 5축 공구자세 최적화 문제를 다루었다. 이를 위하여 5축 가공의 공구회전각도(tilt 및 yaw angle)를 정의하고, 2차원 정의역(domain)에서 제반 '간섭'을 고려한 C-space를 구축하였다. 본 연구에서 고려한 '간섭'은 과절삭, 충돌 및 stroke-over로서, 간섭이 없는 feasible space Ψ 의 경계에서 최대 유효반경을 가지는 공구자세를 탐색하였다. 실제 적용 예로는 선박용 프로펠러의 페이스 밀링 가공을 살펴보았으며, 대략 10% 내외의 유효반경 증가를 나타내었다.

본 연구에서 제안한 방식은 5축 가공의 이점을 최대한으로 살리면서 - 2개의 공구회전각도를 모두 조정 - 각 공구접촉점에 독립적으로 적용할 수 있는 방법으로 사료되며, 최적해를 탐색함에 있어서도 유효반경 등고선 등의 추가적인 정보를 최대한 활용하고자 노력하였다.

본 연구는 3절에서 언급한 국소 최적화 문제를 다루었다. 이와 같은 국소 최적화 문제가 중요한 것임에는 틀림이 없으나, 효과적인 5축 가공을 위해서는 연속된 공구접촉점 사이에서 공구자세 변화량을 최소화 하는 등의 광역 최적화 또한 매우 중요한 문제이다. 경우에 따라서는 국소적인 최적해가 광역적 최적해가 아닐 수도 있을 것이며, 광역 최적화에 의한 최적해는 반드시 feasible space Ψ 의 경계상에 존재하지 않을 수도 있다고 보여진다. 이러한 광역적 최적화에 관해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산학협력연구(98-2-09-0101-2) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 조현덕, 전용태, 양민양, "5축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제17권, 제8호, 1993.
2. 박정환, "금형의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1995.
3. Yu, D., Duan, Z. and Zhang, W., "Flat-end cutter path generation for a sculptured surface for 3-axis NC machining", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57 No. 1-2, 1996.
4. 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.
5. Takeuchi, Y. and Watanabe, T., "Generation of 5 Axis Control Collision-free Tool Path and Postprocessing for NC Data", *Annals of the CIRP*, Vol. 41/1/1992, pp. 535-542, 1992.
6. 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.
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. 전차수, 차경덕, "복합곡면의 5축 NC 가공을 위한 공구자세 최적화", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제5권, 제4호, pp. 393-402, 2000.
9. Morishige, K., Nasu, T. and Takeuchi, Y., "Five-axis control sculptured surface machining using conicoid end mill", *Machining Impossible Shapes(ed. G. J. Olling et al.)*, Kluwer Academic Pub., pp. 366-375, 1999.
10. 이철수, 박광렬, "Heel angle 조정에 의한 터빈 블레이드의 5축 NC 가공데이터 생성", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제4권, 제2호, pp. 110-120, 1999.
11. Jensen, C. G. and Andersen, D. C., "Accurate tool placement and orientation for finish surface machining", *Journal of Design and Manufacture*, Vol. 3, pp. 251-261, 1993.
12. 조인행, 이건우, "포텐셜 에너지를 이용한 5축 NC 밀링의 공구방향 결정", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 1995.
13. Lee, Y. S. and Ji, H., "Surface interrogation and machining strip evaluation for 5-axis CNC die and mold machining", *Int'l Journal of Prod. Res.*, Vol. 35, No. 1, pp. 225-252, 1997.
14. Lee, Y. S., "Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 7,

pp. 559-570, 1998.

15. White, K. A., Hill, J. K. and Jensen, C. G., "Curvature matched machining methods versus commercial CAD methods", *Machining Impossible Shapes* (ed. Olling, G.J. et al.), Kluwer Academic Publishers, pp. 361-365, 1999.
16. Choi, B. K., Kim, D. H. and Jerard, R. B., "C-space Approach to Tool-path Generation for Die and Mould Machining". *Computer Aided Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 657-669, 1997.
17. 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.
18. 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.
19. Choi, B.K. and Jerard, R.B., *Sculptured surface machining - theory and applications*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
20. Choi, B. K., *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1991.

부록: 표준 타원식의 곡률 및 곡률 반경 계산

$y = f(x)$ 로 나타나는 2차원 도형의 곡률(curvature)은 식 (A-1)으로 표현된다^[20].

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \tag{A-1}$$

여기서, $y' = dy/dx = -a^2xy$ 및
 $y'' = d^2y/dx^2 = -a^2y - a^4x^2y^3$

다음으로 장반경이 1이고 단반경이 a 인 타원의 표준

식을 식 (A-2)로 표현한다면, 타원의 곡률은 결국 식 (A-3), 곡률반경은 식 (A-4)로 표현할 수 있다.

$$x^2 + y^2/a^2 = 1 \tag{A-2}$$

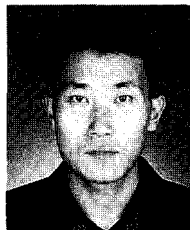
$$\begin{aligned} \kappa(x,y) &= \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \\ &= \frac{a^2(y^2+a^2x^2)}{y^3(1+a^4x^2/y^2)^{3/2}} \end{aligned} \tag{A-3}$$

$$\rho_c = \frac{1}{\kappa(x,y)} \tag{A-4}$$



박 정 환

1987년 서울대학교 물리학과 학사
 1991년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1995년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1995년~1997년 Chrysler technology Center 연구원
 1997년~현재 영남대학교 기계공학과 조교수
 관심분야: NC machining, Geometric modeling



이 정 근

1997년 영남대학교 기계공학과 학사
 1999년 영남대학교 대학원 기계공학과 석사
 1999년~현재 영남대학교 대학원 기계공학과 박사과정
 관심분야: CAD/CAM, 금형설계