

프로펠러 가공 전용 CAD/CAM 시스템 개발

전용태*, 윤재웅**, 박세형*

Development of a CAD/CAM System for Marine Propeller

Yongtae Jun*, Jaewoong Youn**, and Sehyung Park*

ABSTRACT

The manufacture of a marine propeller typically requires long lead time to generate 5-axis tool path. Hence, it may take several weeks to manufacture a satisfactory propeller with a general purpose CAD/CAM system. In this research, a dedicated 5-axis CAD/CAM system for machining marine propellers has been developed. The system employs various methods to enhance the productivity: interference-free tool path generation employing check vectors and optimum cutter size determinants. In addition, an iterative NURBS modeling technique is used to improve the accuracy of the modeled surfaces, and effective cutting conditions are determined and recommended empirically to increase the productivity.

The proposed CAD/CAM system has been implemented with C++ and OpenGL graphic library on the Windows system. The system validation and sample results are also given and discussed.

Key Words : 5-axis Machining (5 축 가공), NURBS Modeling (NURBS 모델링), Tool-path Generation (공구경로 생성), Interference Check (간섭검사)

1. 서론

선박용 프로펠러는 고속으로 회전하여 유체를 분출 시키면서 선박을 구동 시키는데, 효율이 높은 프로펠러를 설계 및 제작하기 위해서는 많은 경험과 실험데이터의 뒷받침이 필요하다. 일반적으로 프로펠러의 형상은 매우 복잡하며 또한 고속으로 운전되므로, 5 축 가공기계를 이용하여 일체로 가공하는 것이 바람직 하다.

서로 직교하는 3 개의 평행이동 축으로 구성된 3 축 공작기계에 비하여, 5 축 기계는 일반적으로 2 개의 회전축을 더 갖고 있으며 각 축의 구성은 그 용도에 따라 다양하다. 부가된 2 개의 축으로 증가

된 2 개의 자유도는 공구의 축 방향을 변화 시키는데 이용된다. 3 축 기계에서는 곡면상의 접촉 점이 주어지면 공구의 위치가 유일하게 결정되는 반면, 5 축 기계에서는 공구의 여러 가지 자세 (위치 및 축 방향) 를 취할 수 있다. 따라서, 효율적인 5 축 가공을 위해서는 공작기계의 개발과 더불어서 최적의 가공을 할 수 있는 소프트웨어의 개발이 동시에 이루어져야 한다. 이미 상용화된 5 축 가공 소프트웨어가 다수 나와 있으나 아주 고가이다. 프로펠러 형상과 같이 피삭재의 지지부가 극히 제한되고, 가공부위가 가늘고 길며 형상이 복잡한 제품의 가공에 있어서는 범용 시스템보다는 전용 시스템이 훨씬 효과적이라 할 수 있다. 이러한

* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

** 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

전용시스템을 이용하면 먼저 프로펠러 형상 모델링 작업량을 크게 줄일 수 있고, 제품의 초기 소재로부터 최종 형상까지의 작업계획, 공구선정, 공구경로 생성, 절삭 조건의 산출 그리고 시험 절삭으로 이루어지는 일련의 작업들을 일관되게 수행할 수 있다.

본 연구에서 사용된 5 축 기계는 회전과 틸팅(tilting)이 가능한 2 축 인덱스 테이블을 수직형 3 축 밀링 기계와 결합시켜 제작하였으며, CAD/CAM 시스템은 Windows 환경에서 C++ 와 OpenGL 그래픽 라이브러리를 이용하여 개발하였다. 개발된 CAD/CAM 시스템을 이용하여 프로펠러를 제작하기 위해서는 먼저 아래와 같은 초기 프로펠러의 형상 정보를 입력 한다.

- 날개(blade)와 허브(hub)의 최대 반지름
- 프로펠러 날개의 형상정보 (점 데이터)
- 날개 개수
- 날개와 허브가 만나는 라운딩 (rounding) 반경
- 키 홀 (key hole) 의 크기와 위치

위의 정보가 입력되면, 프로펠러 날개에 대한 형상이 자동으로 결정된다. 프로펠러의 점 데이터는 선박의 속도 및 효율 등을 고려한 전용 해석 프로그램에서 결정된 프로펠러 날개 형상으로부터 주어지는데, 이와 같은 점 데이터들은 NURBS 곡면으로 보간 하여 날개면을 모델링 한다. 프로펠러의 형상이 결정된 후, 황삭/중삭/정삭을 위한 가공 계획을 개발된 시스템에서 대화식으로 부여하면, 최종적으로 공구 간섭이 배제된 5 축 가공경로를 얻을 수 있게 된다.

프로펠러를 모델링하고 가공하는 세부 절차가 다음 절에 이어진다.

2. 프로펠러 형상 모델링

일반적으로 프로펠러 날개면은 주로 타원형의 기본 형상을 유동해석 및 날개 각 (skew angle & rake angle) 과 축 방향 길이 등의 경계 조건으로부터 최적의 형상을 갖도록 설계된다. Skew angle 은 날개의 형상이 스파이럴 (spiral) 한 정도를 나타내는데 이 각이 클수록 프로펠러의 소음과 물의 저항이 작아진다.

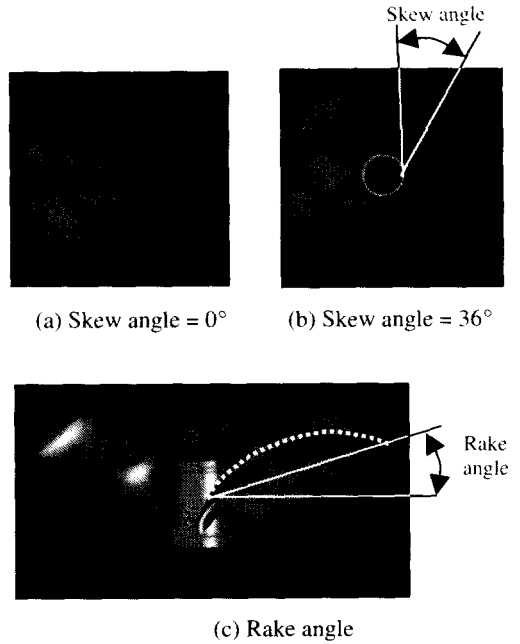


Fig. 1 The shape of propeller

Figure 1 의 (a) 와 (b) 는 skew angle 이 각각 0° 와 36° 인 프로펠러의 형상을 보여준다. Rake angle 은 Fig. 1 의 (c) 와 같이 프로펠러 날개의 중심선을 따라 하나의 곡선을 정의할 때 그 곡선의 단면이 프로펠러 중심축에 대하여 누운 정도를 나타내는 것으로 프로펠러 성능에 큰 영향을 미친다.

본 연구에서는 점 군이 불 균일한 곡면 모델링에 널리 쓰이는 NURBS (Non-Uniform Rational B-spline Surface) 곡면 모델링 기법을 이용하여 프로펠러를 모델링 한다. 특히, 유동해석 실험을 통하여 결정된 프로펠러 날개면의 입력 점 데이터와 보간된 NURBS 곡면과의 보간 오차를 최소화하기 위하여 Sakar^[4] 등이 제안한 매개변수 최적화 방법을 도입하였다. 즉, Q_{ij} 를 입력 점 데이터, $S(u_{ij}, v_{ij})$ 를 보간된 곡면의 대응점, 그리고 e_{ij} 를 Q_{ij} 와 $S(u_{ij}, v_{ij})$ 의 최단거리라 할 때, Fig. 2 와 같이 e_{ij} 가 지정된 오차 범위에 들어올 때 까지 제어점 (control points) u_{ij} 와 v_{ij} 를 변화 시키면서 곡면 보간을 반복하도록 하였다^[5, 6]. 또한, 날개 면의 앞, 뒷면을 개별적으로 모델링하여, 차후에 황삭 및 정삭을 곡면의 특성에 맞도록 분할되어 수행될 수 있도록 하였다.

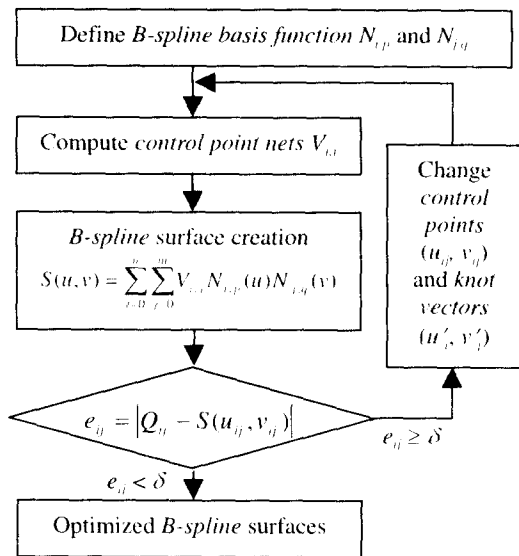


Fig. 2 Optimised B-spline surface fitting algorithm



Fig. 3 Graphic display of a modeled propeller

Figure 3의 프로펠러 면을 모델링 하기 위하여 451 개의 점 군이 사용되었는데, 개발된 프로그램에서 주어진 입력 점 데이터를 두 면에 대한 정보로 나누어 모델링 한 뒤, 주어진 날개 개수 만큼 복제 시켜서 화면상에 그려지도록 하였다.

일반적으로 프로펠러 허브의 모델링은 주어진 허브 데이터를 프로펠러 중심 축에 대해 회전시켜 구하는 스융 곡면 모델링(sweep surface modeling) 방식을 취함으로써 모델링할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 허브 곡면의 모델링을 가공의 관점에서 고려하여 불필요한 곡면의 모델링을 최소로 하였다. 즉, Figure 3 과 같이, 프로펠러의 허브는 날개면의 시작점을 공유하고 있으므로 앞에서 정의

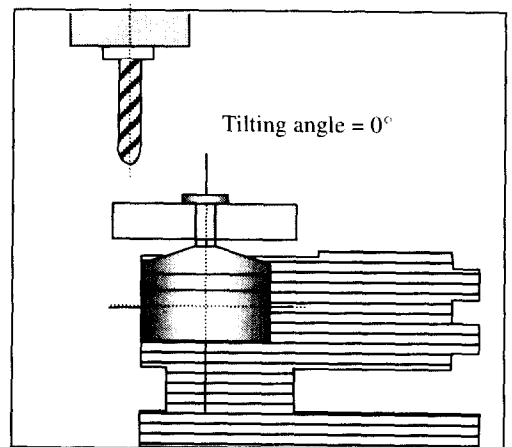
한 날개의 앞면과, 뒷면을 $\cdot 2\pi$ (날개의 개수) 만큼 회전시켜 원통의 일부로 모델링 하였다.

날개 면의 양단 집선벡터는 모두 원호 보간법을 이용하여 계산했으며, 허브 면의 경우는 곡면의 특성상 반지름 방향으로는 원호 보간을, 축 방향으로는 자유단 조건을 부여하여 모델링 하였다.

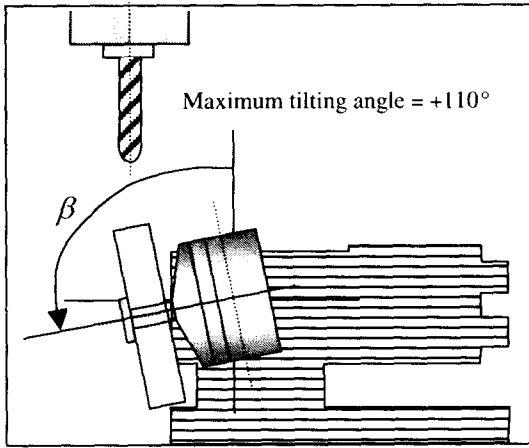
3. 프로펠러 가공

3.1 공작기계 사양

상용화되어 있는 5 축 공작기계는 가격이 고가이며 범용으로 만들어져 있어서 프로펠러 가공 전용으로 사용하기에는 효율적이지 못하다. 본 연구에서는 Fig. 4 와 같이, 범용 수직형 3 축 기계 위에 2 축의 회전/경사 테이블(index / tilting table)을 결합시켜 프로펠러 가공 전용 5 축 기계로 사용하였다. 공작기계 컨트롤러(controller)는 Fanuc 15M을 채용하여 5 축 동시 제어를 하였고, 알루미늄 합금의 가공성을 고려하여 고속주축(10,000 rpm)을 장착하였다. 인덱스 테이블은 그림과 같이 인덱스 테이블의 축 방향이 수직인 위치의 tilting 각을 0° 라 할 때, 최대 $\pm 110^\circ$ 까지 기울어진다. Tilting 각도는 프로펠러 날개 뒷면을 가공할 때 가공성을 좌우하는 요소로서, 각도가 클수록 효율적인 가공경로를 생성시킬 수 있다. 반면에, tilting 각도가 클수록 인덱스 테이블의 클램프 체결력이 약화되므로, 필수 불가결한 경우를 제외하고는 가능한 최대 tilting 각도에서의 가공을 회피하도록 하였다.



(a) Tilting angle = 0°



(a) Tilting angle = 110°

Fig. 4 Index table configuration

Table 1 은 본 연구에서 사용된 5 축 공작기계의 주요 제원을 보여준다.

Table 1 The spec for the 5-axis M/C

	항목	크기	
3-axis M/C	Table Size	920 × 520 mm	
	Travel	X	720 mm
		Y	520 mm
		Z	520 mm
	Spindle Motor	5.5/7.5 kW	
	Tool Shank	BT 40	
	Spindle Diameter	φ 65	
	Max. Weight	500 kg	
Loadable on Table			
Controller	FANUC 15M		
Index Table	Range of Tilting angle	-110° ~ +110°	
	Clamping Force	100 kgf (hydraulic)	
	Fixture Size	φ 250 × 90 mm	
	Stroke	X	720 mm
		Y	385 mm
Z		520 mm	

3.2 역 기구해(Inverse kinematic solution) 계산

공구의 CL (Cutter Location) 데이터와 공구 축 방향 (orientation) 벡터가 주어지면 그로부터 공작

기계 축(joint)의 이동량을 구해야 한다. 공구의 CL 점을 (x, y, z) , 공구의 축 방향 벡터를 $[u_x, u_y, u_z]^T$, 공작기계 각 축의 이동량을 X, Y, Z , 인덱스 테이블의 rotating 각도와 tilting 각도를 각각 α, β 라 할 때, 주어진 (X, Y, Z, α, β) 로부터 (x, y, z, u_x, u_y, u_z) 값을 구하는 식을 기구해 (direct kinematic solution)라 한다. 반면에, (x, y, z, u_x, u_y, u_z) 로부터 (X, Y, Z, α, β) 를 구하는 식을 역 기구해라 한다^[16].

효과적인 공구자세가 결정 되어지면, Fig. 5 와 같이 공구 자세에 따른 인덱스 테이블의 회전각 α 와 경사각 β 를 다음 식으로부터 구하여 동시 5 축 제어가 가능하도록 하여야 한다.

경사각: $\beta = \tan^{-1}(u_z / u_y) // y$ 축으로 β 만큼 회전
 회전각: $\alpha = \tan^{-1}(u_x / u_y) // x$ 축으로 α 만큼 회전

여기서 u_x, u_y , 그리고 u_z 은 공구 충돌을 회피하기 위한 체크 벡터와 날개면의 법선 벡터 (normal vector)로부터 결정된다.

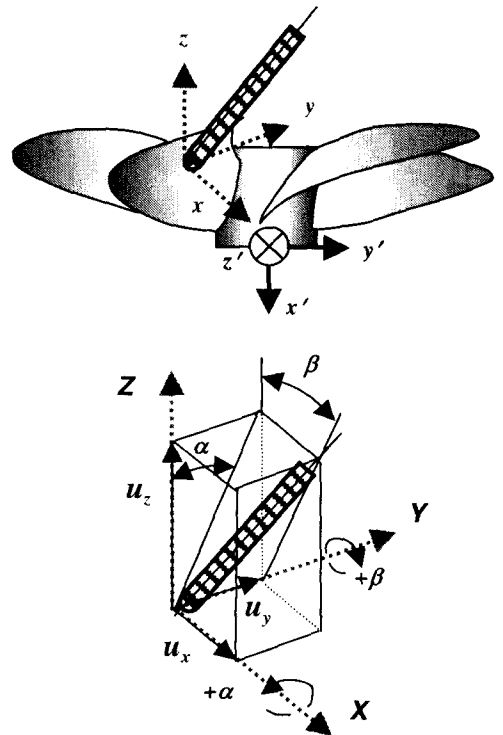


Fig. 5 Vector manipulations for rotating and tilting angles

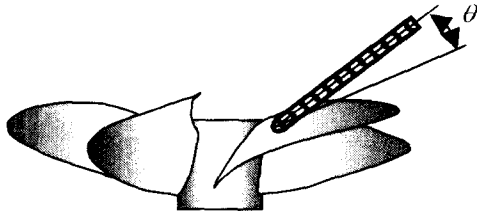


Fig. 6 Changing tool orientation vector ($\theta \rightarrow$ minimized)

공구 충돌을 회피하기 위한 체크 벡터로부터 축 방향 벡터가 $[0 \ 0 \ 1]^T$ 이 되기 위한 회전각 α 와 경사각 β 가 계산되면 새로운 CL 점 (x', y', z') 은 아래와 같은 좌표변환에 의해 구해진다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \beta & -\cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

공구 자세는 공작물과의 충돌을 회피하면서 가공 성능도 양호한 자세를 취하는 것이 바람직하다. 가공성을 높이기 위해서는 공구 정점 부위의 절삭을 가능한 피해야 하는데, Fig.6 과 같이 간섭이 일어나지 않은 범위 내에서 공구 축을 프로펠러 날개면과 최대한 나란하도록 하였다 (θ 최소화).

3.3 공구경로 생성

가공은 크게 황삭, 중삭, 정삭으로 나뉘어 진행되었으며 이중 황삭은 가공성을 고려하여 3축으로, 중삭과 정삭은 5축 가공으로 수행되었다.

3.3.1 황삭 공구경로

황삭 가공 공정은 3축의 포켓(pocket) 가공 형태로 진행되는데, 가공 경로는 날개 곡면과 임의의 Z-평면과의 교차곡선으로부터 공구궤적의 시작점과 끝점을 구한 뒤, 두 점을 연결하는 원호상의 중간 값들을 보간(interpolation) 하여 임의의 Z-평면 상에서의 경로를 계산하였다. Fig. 7 (a) 와 같이, 앞면 황삭 가공을 위해서는 절삭실험과 경험으로부터 얻어진 고정 절입깊이 (fixed depth of cut) 를 부여하였다. 그러나 초기 소재를 뒤집어서 가공하는 뒷면 황삭 가공은 남아 있는 공작물의 강성이 약하므로 포켓깊이가 클수록 절입깊이가 작아지도록 하는 가변 절입깊이를 부여하여, 프로펠러 날

개의 변형(deflection) 및 체터 (chatter) 등으로 인하여 가공 정밀도가 저하 되는 것을 방지하였다 (Fig. 7 (b)).

3.3.2 중삭 공구경로

프로펠러 날개의 상호 간섭에 의해 3축 황삭 가공으로는 가공할 수 없는 영역이 허브 주위에 많이 남게 되는데, 이 영역은 가공부위가 깊어서 가공성이 떨어진다. 따라서, 중삭 가공의 궁극적 목적은 3축 황삭 가공을 통하여 가공되지 않은 영역을 5축 가공으로 제거함으로써, 정삭시 가공 부담을 줄여서 가공 정밀도를 향상시키기 위한 것이다. 중삭 가공영역은 황삭 가공에서 가공되지 않은 부위의 최대높이와 축 중심으로 부터의 최대 거리를 계산하고, 그 값에 해당하는 ruled 곡면을 생성하여 찾을 수 있는데 자세한 절차는 아래와 같다 (Fig. 8).

1. 두 날개 경계면의 오프셋 곡선 생성
2. 두 오프셋 곡선이 overlap 되는 크기 d 계산
3. 날개곡선으로부터 d 만큼의 영역까지 점 생성
4. 생성된 점들을 이용하여 ruled 곡면 생성
5. Z 값을 변화시키면서 step 3 부터 반복

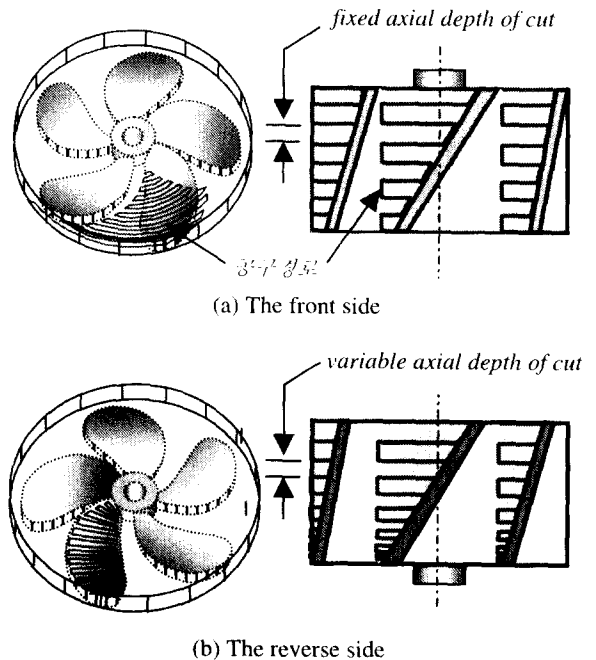


Fig. 7 Tool-path for rough cut

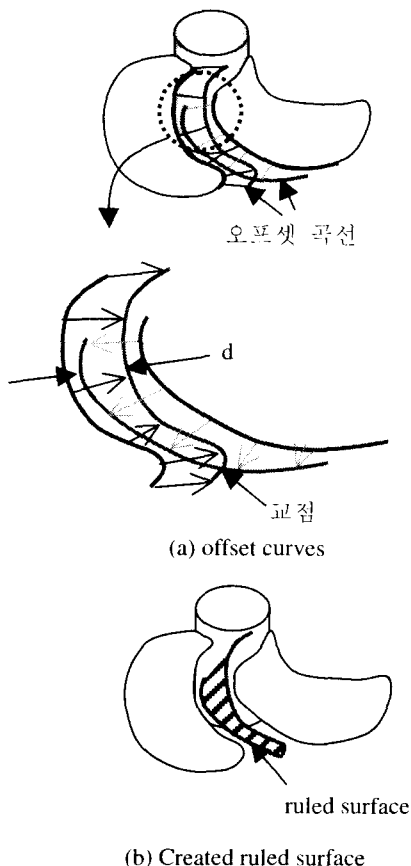


Fig. 8 The area to be machined

이와 같이 찾아진 곡면을 Fig. 9 와 같이 ruled 곡면 형태로 모델링하여 프로펠러의 허브 방향으로 일정한 깊이 만큼씩 가공하게 되면, 황삭 가공으로 제거되지 못했던 부분을 모두 제거할 수 있게 된다. 즉, 중삭 가공은 허브 축을 중심으로 최외곽 지점으로부터 허브와의 간섭이 일어나기 전까지 중심 축 방향으로 계속해서 가공이 진행된다.

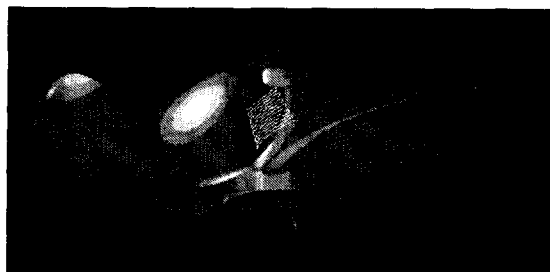


Fig. 9 Tool-path for semi-finish cut

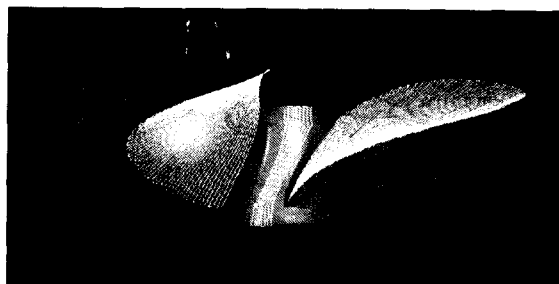


Fig. 10 Tool-path for finish cut

3.3.3 정삭 공구경로

정삭 가공은 Fig. 10 과 같이 프로펠러 날개와 허브의 테이더로부터 곡면의 일정한 등-매개변수 곡선 (iso-parametric curve) 을 따라 생성 하였다. 주어진 가공공차에 맞게 곡면을 가공하기 위해서, 현재 공구의 위치로부터 주어진 공차 내에서의 다음 공구 위치를 구하는 것이 매우 중요하다.

이러한 가공은 주로 선형보간 (linear interpolation) 방법을 이용하면 계산할 수 있는데, 허용오차 이내로 가공할 수 있는 최대한의 보간 간격을 구함으로써 가공시간을 단축하고 곡면의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 일반적으로 프로펠러 형상은 매우 복잡하여 기계가공 후에 사상 (polishing) 작업이 어려우므로, 정삭 가공에서 최대한의 정밀도를 얻는 것이 바람직하다.

3.4 공구/공작물의 간섭방지

공구 간섭 (interference) 은 다음과 같이 크게 두 가지로 분류된다.

1. 가공되는 날개 내에서의 과절삭 (gouging)
2. 이웃하는 날개 또는 고정구(fixture) 와 공구 충돌 (collision)

본 연구에서는 간섭 발생 가능성을 최소화한 공구의 초기 위치와 자세를 설정하기 위하여 Fig. 11 (a) 와 같은 체크 벡터(check vector) 를 도입하였다. 체크 벡터는 프로펠러의 경계 곡선과 다수의 $z = const$ 인 평면이 만나는 두개의 교점을 연결하는 벡터로 정의되는데, 이와같은 체크 벡터를 미리 계산하여 공구가 임의의 날개 면을 이동할 때 공구의 축 벡터를 두 체크 벡터 내에 놓이도록 하였다 (Fig. 11 (b)). 단계별 자세한 절차는 다음과 같다.

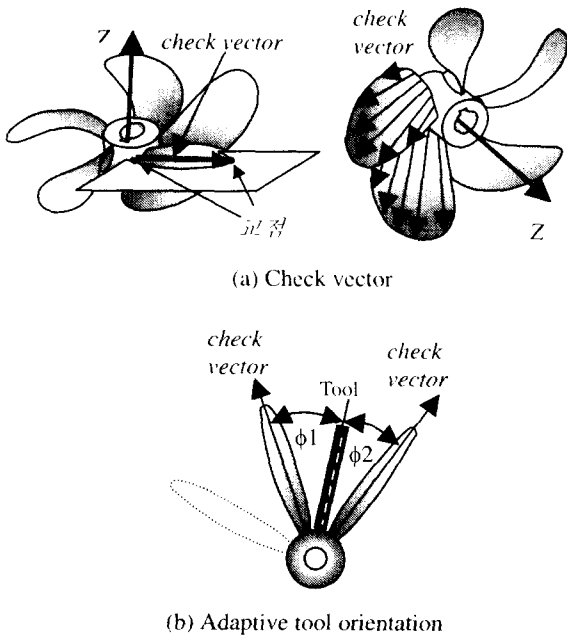


Fig. 11 Determining initial tool orientation

1. $Z = const$ 인 평면들과 날개곡면 외곽선과의 교점들을 구한다.
2. 교차점의 시작점과 끝점을 연결하는 체크 벡터를 계산한다.
3. 이웃하는 날개에 대해서도 1 과 2 의 과정을 수행한다.
4. 두 날개에서 계산된 체크 벡터를 Z 값과 함께 쌍 (pair) 으로 관리한다.
5. $Z = Z + \delta$ 인 평면을 가지고 Z 값이 경계 값에 도달할 때까지 1 ~ 4 의 과정을 반복한다. (단, Z: 현재 Z-좌표값, Z: 다음 Z-좌표값, δ : 미소 증가분)

위의 과정을 통하여 Z 값에 따른 체크 벡터 값을 얻은 후, 모든 공구축적에 대해 공구의 축 벡터를 항상 해당 체크 벡터 범위 내에 위치시켜서 공구 간섭을 제거하였다.

그러나, 공구를 체크 벡터 사이에 놓더라도 잠수함용과 같이 skew angle 과 rake angle 값이 큰 복잡한 프로펠러를 가공 시에는 추가 간섭이 발생할 수 있게 된다. 따라서, skew angle 이 20° 이상이거나 rake angle 이 15° 이상인 프로펠러 날개에 한하여, 공구 간섭 여부를 추가적으로 체크하기

위해 공구, 공구 홀더, 주축, 고정구 그리고 공작 볼에 많은 체크 점 (check point) 을 설정하고 그 점들 사이의 충돌 여부를 조사하였다. 최종적으로 간섭 발생이 예상되는 부위는 α 와 β 값을 미세하게 변화시켜서 간섭을 회피할 수 있는 공구 자세를 찾을 때까지 반복 탐색하도록 하였다.

특히, 프로펠러의 날개와 허브가 만나는 지점은 간섭 다발 부위이므로, 날개와 허브가 만나는 곡면의 매개변수에 제한을 두어, 제한된 범위 안에서만 가공이 일어나도록 하였다.

3.5 최적 공구크기 선정

황삭 가공은 초기 원판 (disk) 상태의 소재로부터 포켓가공 형태로 진행되므로 공구의 선정 역시 이러한 관점에서 고려되어야 한다. 즉, 깊은 가공 부위 때문에 공구의 길이가 길어야 되므로 공구의 처짐이 발생되기 쉬우며, 프로펠러 날개면이 얇기 때문에 많은 진동을 수반하게 된다. 따라서, 프로펠러 날개사이에서 간섭을 일으키지 않는 범위에서 공구경이 최대가 되도록 하였으며, 공구의 강성을 고려하여 초경(solid carbide)을 사용하였다. 공구 경의 크기를 최대로 함으로써 공구 경로간의 커슥 (cusp) 이 최소가 되도록 하여 사상시간을 단축시킬 수 있는 부수적인 효과도 얻을 수 있도록 하였다. 또한, 정삭 및 중삭 가공에서는 인서트 팁 (insert-tip) 형태의 공구를 사용하여 공구를 재연삭 (regrinding) 하는 시간과 비용을 단축하였다.

3.6 가공조건 산출

본 논문에서는 가공 소음, 공작기계 주축의 부하, 가공시간과 공구 수명을 변수로 하는 실험을 수행하여 주어진 가공형태와 피삭재의 재질에 따른 효과적인 가공조건을 부여하도록 하였다. 또한, 가공하고자 하는 프로펠러의 형태와 크기에 따라 공구 길이가 다양하게 요구되므로, 공구의 길이를 변화 시키면서 실험을 진행하였다. 이러한 방법으로 설정된 절삭조건은 개발된 시스템의 데이터베이스로 내장되어 적절하게 절삭조건을 추천할 수 있도록 하였다.

4. 실험 및 고찰

개발된 시스템은 C++ 와 OpenGL 그래픽 라이브러리를 이용하여 구현되었다. 개발된 시스템의

GUI 는 사용하기 편리하도록 만들어졌으며 CAD 영역에 대한 전문지식이 충분하지 않은 초보자도 사용할 수 있도록 하였다.



Fig. 12 Propeller modeling



(a) Finish cutting



(b) A machined part

Fig. 13 Propeller machining using the developed system

Figure 12 는 개발된 프로그램을 이용하여 skew 각도가 30° 이고 6 개의 날개로 구성된 프로펠러를 모델링한 결과를 보여주며, Fig. 13 (a) 는 제작

된 프로펠러 가공 전용 5 축 기계를 이용하여 프로펠러를 정삭 가공하는 모습을 보여준다. 정삭 가공이 완료된 프로펠러는 Fig. 13 (b) 와 같다.

개발된 시스템을 이용하여 프로펠러를 모델링하고 가공경로를 생성시키는데 약 30 분 정도 소요 되었으며, 황삭, 중삭, 그리고 정삭 가공을 수행 하는데 소요된 시간은 대략 48 시간이었다. 이는 기존의 copy milling 방식으로 소요되었던 시간 (약 100 시간) 보다 크게 단축 되었음을 알 수 있다.

또한, 기존 방법에 의한 사상 여유 값은 0.3 mm 인데 반하여, 본 시스템은 0.05 mm 까지 맞출 수 있어서 사상 시간을 크게 줄일 수 있었다. Table 2 는 각각 기존의 3 축 copy milling 와 본 연구에서 개발한 시스템에 의한 프로펠러 제작 소요 시간과 가공 정밀도를 보여주고 있다.

Table 2 Comparison of machining performance between 3-axis copy milling and the developed system

		3 축 copy 밀링	개발된 시스템
Number of blades	4 blades	120 hrs	Machining: 25 hrs
			Polishing: 24 hrs
			Total time: 49 hrs
	5 blades	144 hrs	Machining: 34 hrs
			Polishing: 30 hrs
			Total time: 64 hrs
6 blades	170 hrs	Machining: 48 hrs	
		Polishing: 36 hrs	
		Total time: 84 hrs	
Accuracy		0.3 mm	0.05 mm

5. 결론

본 연구를 통하여 프로펠러 가공 전용 CAD/CAM 시스템을 개발하였다. 본 5 축 기계는 회전과 틸팅이 가능한 2 축 인덱스 테이블을 수직형 3 축 밀링기계와 결합시켜 사용되었다. 가공 정밀도는 0.05 mm 까지 가능하였으며 고속 주축을 채용하여 가공 효율을 향상시켰다.

개발된 시스템은 프로펠러 날개의 점 데이터로부터 NURBS 곡면을 모델링하고 사용된 5 축기

계 사양에 알맞은 가공경로를 생성시킨다. 특히, 공구와 공작물간의 간섭을 배제시키기 위하여 벡터 check 방법을 도입하여, 과절삭과 충돌을 예방한 공구 궤적을 생성시켰다. 또한, 절삭 실험으로 얻어진 가공조건을 추천할 수 있는 기능을 시스템에 보강하여, 절삭기구가 난해한 프로펠러의 가공조건을 효과적으로 추천할 수 있도록 하였다. 사상 시간이 대부분을 차지하고 있는 프로펠러의 가공특성을 고려하여, 기계가공에서 충분한 정밀도를 낼 수 있도록 하였다. 따라서, 기존의 copy 밀링에 비하여 전체 가공시간을 50% 단축시켰다.

10. Jaewoong Youn, "A study on the monitoring system for intelligent turning operation," PhD Thesis, Department of Precision Engineering and Mechatronics, KAIST, Korea, 1995.

참고문헌

1. 전차수, 박세형, 전용태, "자유곡면의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 10 권, 제 1 호, pp. 52-61, 1993.
2. G.W.Vickers, "Computer-aided manufacture of marine propeller," Computer Aided Design, Vol. 9, No. 4, pp. 267-274, 1977.
3. H.K.Toenshoff and J.H.Camacho, "Die manufacturing by 5-axis and 3-axis milling," Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 20, pp. 105-119, 1983.
4. B. Sakar, and C. H. Menq, "Smooth-surface approximation and reverse engineering," Computer-Aided Design, Vol. 23, No. 9, pp. 623-628, 1991.
5. B.K.Choi. Surface modeling for CAD/CAM, Elsevier, 1991.
6. Yongtae Jun, "A feature-based reverse engineering system using artificial neural networks," PhD Thesis, School of Engineering, University of Warwick, Coventry, UK, 1999.
7. 조현덕, 전용태, 양민양, "5축 CNC 밀링으로의 자유곡면 가공에 관한 연구." 대한기계학회논문집, 제 17 권, 제 8 호, pp. 2001-2022, 1993.
8. B.K.Choi, J.W.Park and C.S.Jun, "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining," Computer Aided Design, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993.
9. R.B.Jerard, J.H.Angleton and R.L.Drysdale, "Sculptured surface tool path generation with global interference checking," Proc. Design Productivity Int'l Conf. Hawaii, USA, pp. 737-742, 1991.