

모형 프로펠러 제작을 위한 과절삭이 없는 공구 경로 생성

김유철*, 김태완*, 서정천†*

서울대학교 조선해양공학과*

Gouging-free Tool-path Generation for Manufacturing Model Propellers

Yoo-Chul Kim*, Tae-Wan Kim* and Jung-Chun Suh†*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*

Abstract

In this paper, we present the gouging and collision-free tool-path generation for manufacturing model propellers using the 5-axis NC machine. Because it takes much time to generate tool-paths when we use general purpose CAD/CAM systems, a specific system would be necessary for marine propellers. Overall manufacturing process is composed of two steps: roughcut and finishcut steps. The roughcut is conducted using only 3-axis for efficient machining and the finishcut is done using 5-axis for avoiding collision. The tool-path that might happen to gouging is searched and the tool position is also decided for avoiding interference between the tool and the propeller blades. The present algorithm is applied extensively to the surface piercing propellers. Some results are demonstrated for its validation.

※Keywords: Propeller manufacturing(프로펠러 제작), Tool-path generation(공구경로 생성), Propeller geometry(프로펠러 형상)

1. 서론

최근 학교나 연구기관에서 모형 실험을 위한 프로펠러와 선체를 제작하기 위하여 5 축 공작기계의 사용이 보편화되고 있다. 또한 이를 위하여 범용의 CAD/CAM 프로그램들이 사용되고 있다. 선체의 경우는 공구 경로 생성시 간섭을 일으킬 경

우가 거의 없고 공작물을 쉽게 지지할 수 있기 때문에 비교적 쉽게 공구 경로를 생성할 수 있지만, 프로펠러의 경우는 날개와 날개 사이의 간섭이 심하고, 공작물 지지가 제한되어 있어서, 범용 시스템을 사용할 경우, 사용자의 기술과 노하우가 많이 필요하여 쉽게 접근할 수 없다. 따라서 프로펠러 전용 시스템의 개발이 필요하고, 일부에서는 실제로 개발하여 사용하고 있으나 아직 보편화되어 있지 않다. 프로펠러 가공 전용 공구 경로 생성에 관한 연구는 많지 않다. Kuo and Dzan(2002)

접수일: 2007년 2월 1일, 승인일: 2007년 3월 9일

†교신저자: jungsuh@snu.ac.kr, 02-880-7341

과 Youn et al.(2003)이 프로펠러를 NC(Numerical Control) 공작기계를 사용하여 가공하기 위한 연구를 수행하였다. 그러나 프로펠러의 복잡한 기하학적 특성상 아직 이를 완벽히 지원 하는 것은 어려우며, 어떤 방법이 가장 효율적이며 정확한 가공을 하기 위한 것인지 단정하기 힘든 상황이다.

본 연구는 5 축 공작기계를 이용하여, 쉽게 모형 프로펠러를 가공하기 위한 공구 경로 생성에 초점을 둔다. 공구 경로 생성시, 공구와 공작물 간의 충돌과 곡면의 특성상 발생할 수 있는 과절삭(gouging)을 제거한 공구 경로를 생성한다.

2 장에서는 프로펠러 날개와 뿌리 필렛의 형상 정의 방법에 대하여 설명하고, 3 장에서는 공구 경로 생성에 사용되는 보간 된 곡면을 만들기 위한 곡면 모델링에 대하여 보인다. 4 장에서는 프로펠러의 대략적 형상을 가공하는 황삭(roughing) 과정을 위한 공구 경로 생성 방법과 실제 날개면을 가공하는 정삭(finishing) 과정을 위한 공구 경로 생성 방법을 보인다. 마지막으로 본 연구를 통해 제작한 모형 프로펠러의 예를 보인다.

2. 프로펠러 기하학

프로펠러는 형상이 복잡하여 가공 공구 경로 생성을 위해서는 기하학에 대한 이해가 필요하다. 프로펠러의 형상은 최종적으로 직교 좌표계에서 표현된다. x 축은 후류 방향을 나타내며, 프로펠러의 회전축과 일치한다. y 축은 수직 상방을 나타내며, z 축은 선박의 좌현 방향을 의미한다.

2.1 형상 변수

프로펠러는 좌표계와 무관한 형상 변수를 갖는다(Fig. 1). 이 변수들은 프로펠러 형상의 정보를 가지고 있으며, 이를 이용하여 나선 좌표계, 원통 좌표계, 직교 좌표계에서 표현되는 날개 형상을 정의하게 된다. 형상 변수는 프로펠러 전체 형상을 정의하는 직경(D), 날개수(Z), 코오드(c), 최대 두께(t_{max}), 캠버(f_{max}), 스쿼(θ_s), 전체 축방향 변위(i_T), 피치(P)와 날개 단면을 정의하기 위한 스테이션(s), 두께 분포(t/t_{max}), 평균선 분포

(f/f_{max})가 있다(김유철 등 2006).

2.2 형상 정의

프로펠러의 형상은 일반적으로 날개 단면을 일정 반경을 갖는 실린더 곡면에 쌓아 올려서 정의한다. 따라서 프로펠러의 형상을 정의하기 위해서는 실린더 곡면상의 날개가 위치할 나선 상에서 날개 단면을 정의하고, 이를 프로펠러 형상이 최종적으로 표현되는 직교 좌표계로 변환하는 과정이 필요하다. 날개 단면을 정의하기 위한 좌표계는 피치선(pitch helix)을 따라 정의한다. 피치선의 방향을 ξ_1 으로 정의하고 ξ_1 과 수직인 방향을 ξ_2 로 정의한다. 그리고 코오드 중간위치(mid-chord position)를 ξ_1 의 원점으로 한다. 이와 같이 좌표계를 정하고, 스테이션, 평균선 분포, 두께 분포, 코오드 길이, 캠버, 최대 두께를 이용하여 날개 단면을 정의한다. 스테이션에 코오드 길이를 곱한 값을 ξ_1 축에 나타내고 그 지점에서 평균선에 두께의 반을 더한 값을 날개의 흡입면으로 하고, 평균선에서 두께의 반을 뺀 값을 날개의 압력면으로 한다(Fig. 2).

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{(s-50)}{100} \cdot c(r), \\ \xi_2 &= E_C \pm E_T, \\ E_C &= \frac{f}{f_{max}}(s) \times f_{max}(r), \\ E_T &= \frac{t}{t_{max}}(s) \times t_{max}(r) \times 0.5 \end{aligned} \tag{1}$$

정의된 날개 단면은 나선 좌표계에서 스쿼와 축 방향 변위를 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= (i_T - \xi_2 \cos \phi + \xi_1 \sin \phi, r \theta_s + \xi_1 \cos \phi + \xi_2 \sin \phi), \\ i_T &= i_G + i_s = i_G + r \theta_s \tan \phi \end{aligned}$$

여기서 i_T 는 전체 축방향 변위로서 레이크에 스쿼로 인해 발생하는 스쿼 유기 축방향 변위가 더해진 값이며, ϕ 는 피치각을 의미한다.

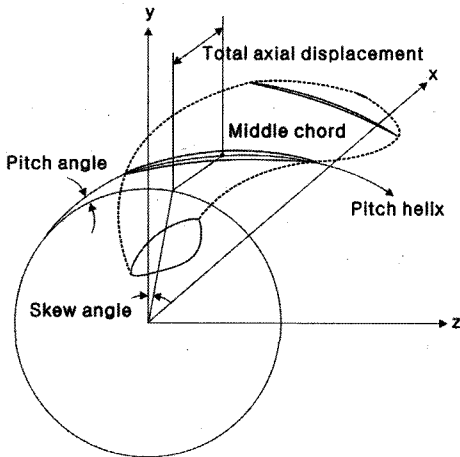


Fig. 1 Overall quantities of a propeller

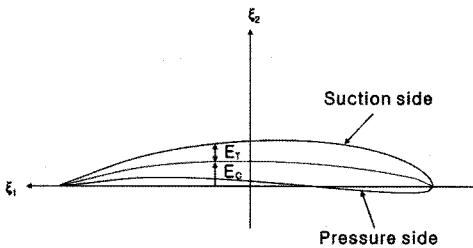


Fig. 2 Foil section definition

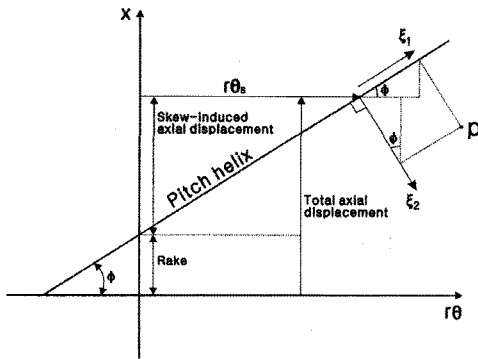


Fig. 3 Point on the blade in helical coordinate

나선 좌표계에서 표현된 날개 표면상의 점 p (Fig. 3)는 원통 좌표계에서 표현한 후, 직교 좌표계로 변환한다. 원통 좌표계로 표현하는 식은 다음과 같다.

$$r = r,$$

$$\theta = \frac{r\theta_s + \xi_1 \cos \phi + \xi_2 \sin \phi}{r}, \quad (2)$$

$$x = i_T + \xi_1 \sin \phi - \xi_2 \cos \phi$$

이 식을 직교 좌표계로 변환하는 식은 다음과 같다.

$$x = i_T + \xi_1 \sin \phi - \xi_2 \cos \phi,$$

$$y = r \cos \theta,$$

$$z = r \sin \theta \quad (3)$$

위와 같은 과정으로 프로펠러 날개 표면상의 점을 직교 좌표계에서 표현할 수 있다.

2.3 프로펠러 필릿 정의

프로펠러는 뿌리(root) 부분의 응력 집중을 감소시키기 위해서 뿌리 필릿(root fillet)을 설계한다. 뿌리 필릿을 모델링하는 방법에는 뿌리 단면의 각 스테이션을 포함한 평면과 프로펠러 날개, 허브와의 교차 곡선을 구하여 모델링하는 방법과 프로펠러 날개의 오프셋(offset) 곡면과 허브의 오프셋 곡면간의 교차를 구하여 블렌딩 곡면을 만드는 방법 등이 있다. 하지만 위의 방법들은 수식이 복잡하거나, 교차 곡선을 구해야 하는 등 번거로운 면이 있다. 따라서 본 연구에서는 프로펠러 두께 분포를 이용하여 비교적 쉽게 뿌리 필릿을 구현하는 방법을 제안한다.

뿌리 단면의 피치 나선에 수직인 평면에 허브 단면과 두께 분포를 표현하고, 허브와 두께 분포에서 점선 연속성을 만족하는 새로운 두께 분포를 찾으면 뿌리 필릿을 포함하는 두께 분포를 계산할 수 있다. 새로운 두께 분포를 계산하기 위한 제한 조건은 다음과 같다.

(조건 1) 뿌리에서 거리 T 인 두께 분포상의 점 p_1 과 반경이 $3T$ 인 호는 공통의 접선을 갖는다.

(조건 2) 허브 위의 점 p_2 와 반경 $T/3$ 인 호는 공통의 접선을 갖는다.

(조건 3) 반경이 각각 $3T$, $T/3$ 인 호는 점 p_3 에서 공통의 접선을 갖는다.

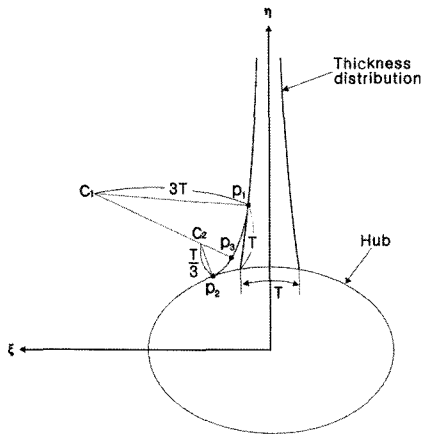


Fig. 4 Concept of root fillet

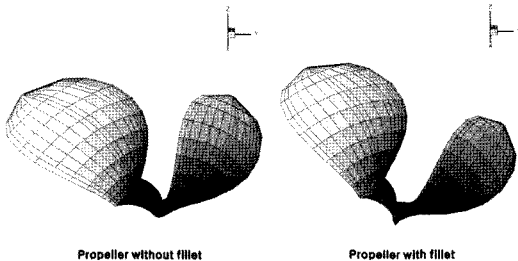


Fig. 5 Propeller geometry with fillet and without fillet

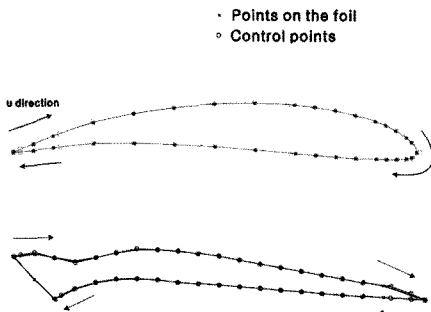


Fig. 6 Direction of chordwise parameter(NACA and surface piercing propeller section)

Fig. 4와 같이 피치 나선에 수직인 평면에 반경 방향의 두께분포를 표시하고 위의 조건을 만족하는 p_1, p_2, p_3 를 구하면 반경 방향의 최대 두께

를 새롭게 계산할 수 있고, 앞서 설명한 프로펠러 형상 정의 방법을 사용하면 뿌리 필렛을 갖는 프로펠러의 형상을 정의할 수 있다.

Fig. 5는 이 방법을 사용하여 뿌리 필렛을 정의한 프로펠러의 형상과 뿌리 필렛을 정의하지 않은 프로펠러의 형상을 보이고 있다.

본 연구에서는 두께 분포만을 새롭게 정의하여 뿌리 필렛을 표현하지만, 코오드 길이 분포를 두께 분포를 정의하는 방법과 같이 정의하면 앞날과 뒷날에서의 뿌리 필렛도 재현할 수 있다.

3. 표면 모델링

수치제어 가공을 할 수 있을 정도의 충분한 표면좌표들을 생성하기 위해서는 3 차원 곡면 모델링이 필요하고, 본 연구에서는 3 차 Non-Uniform Rational B-Spline 방법(윤병로 등 1985)을 사용한다. NURBS 곡면은 하나의 곡면이 2 개의 매개 변수 (u, v)를 이용하여 표현되는 곡면이다.

3.1 날개 모델링

프로펠러의 날개는 날개 단면이 각 반경 별로 놓여진 형태의 곡면이기 때문에 날개 단면을 나타내는 방향을 매개변수 u의 방향으로 정하고, 반경 방향을 매개변수 v의 방향으로 정하는 것이 바람직하다.

일반적인 날개 단면의 형상은 뒷날에서 접선 연속성이 만족되지 않는다. 따라서 u 방향 곡선의 시작점과 끝점은 날개 단면의 윗면의 뒷날과 아랫면의 뒷날과 일치시킨다. 하지만 수면관통형 프로펠러(정성욱과 이승희 2006)의 경우는 앞날에서도 접선 연속성이 만족되지 않기 때문에 이런 경우는 윗면과 아랫면을 각각 모델링한다(Fig. 6). 모델링 방법은 3 차 B-Spline 을 사용한다(Farin and Hansford 2000). Fig. 7은 보간된 프로펠러 날개의 예이다.

3.2 허브 모델링

허브 면은 기존 날개의 압력면과 이웃하는 날개

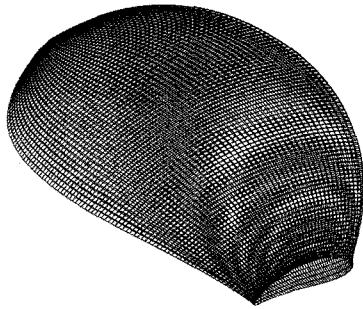


Fig. 7 Interpolated propeller blade

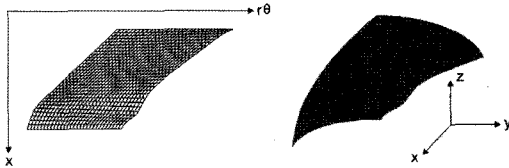


Fig. 8 Definition of hub surface

의 흡입면을 포함하는 실린더 곡면의 일부로 생각할 수 있다. 따라서 실린더 곡면을 전개하여 평면으로 만들고, 그 위에 압력면과 흡입면을 포함하는 허브 면을 정의하여 이를 다시 직교 좌표계로 변환하면 수면관통형 프로펠러와 같이 뒷날이 일치하지 않는 프로펠러의 경우에도 허브 곡면을 정의할 수 있다.

Fig. 8의 좌측은 전개된 평면상에서 수면관통형 프로펠러의 허브 곡면을 표현한 것이고, 우측은 이를 직교 좌표계로 변환한 모습이다.

4. 공구 경로 생성

5 축 공작기계를 이용한 프로펠러 가공은 크게 황삭 과정과 정삭 과정으로 나뉜다. 윤재웅과 박종환(1998)은 준정삭(semi finishing) 과정을 제안했는데, 경험적으로 6 익 프로펠러까지는 필수적인

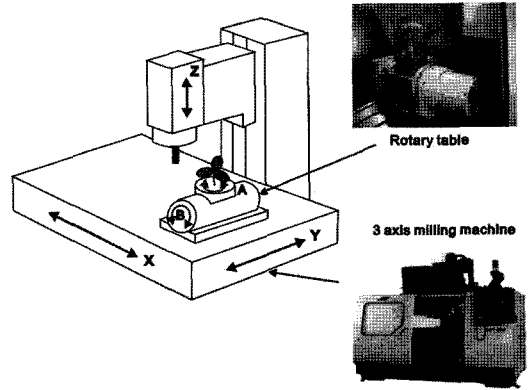


Fig. 9 Constitution of 5-axis milling machine

지 않다. 따라서 본 연구에서는 황삭과 정삭을 위한 공구 경로 생성에 대하여 설명한다. 본 연구에서 사용한 5 축 공작기계는 3 축 밀링 머신에 2 개의 회전축을 갖는 회전 테이블을 결합한 형태이다 (Fig. 9). 3 축만으로 취할 수 없는 공구 자세가 가능하기 때문에 절삭 효율의 향상이 가능하고 프로펠러와 같은 복잡한 형상 가공이 가능하다.

4.1 황삭

황삭은 프로펠러 가공을 위한 초기 가공 단계로서, 원통형의 초기 소재에서 프로펠러의 대략적인 형상을 만들어 내는 과정이다. 황삭 가공은 실린더 형태의 평엔드밀을 사용하고 3 축(x,y,z)만을 사용하여 가공하는 형태로 진행된다. 따라서 프로펠러의 기하학적 특성상 흡입면을 가공하고 가공물의 세팅을 변경하여 압력면을 가공하게 된다. 원통형 소재로부터 날개가 위치하고 있지 않은 부분을 제거하는 과정과 날개가 위치한 부분을 가공하는 과정으로 나누어 가공한다.

황삭 공구 경로 생성을 위한 과정은 Fig. 10과 같은 순서로 진행된다. 프로펠러의 형상을 표현한 좌표는 실제 가공 시 사용되는 기계 좌표와 다르기 때문에 형상 좌표를 기계 좌표로 변환하는 작업이 필요하다. 즉 프로펠러의 회전축을 기계의 z 축으로 설정한다. 다음으로 가공 허용 오차를 고려하여 공구 경로 계산을 위한 등축선(contour)을 찾는다. 날개가 위치하고 있지 않은 부분을

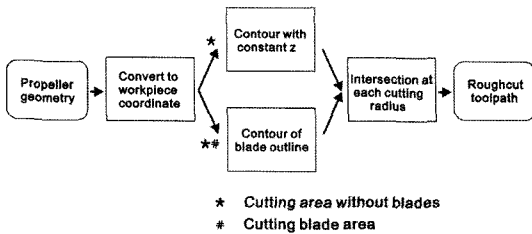


Fig. 10 Overview of roughcut process

제거하는 과정에서는 날개의 윤곽선이 등축선이 되며, 날개가 위치한 부분을 가공하는 과정에서는 날개의 윤곽선과 날개 표면과 z 축을 법선 벡터로 갖는 평면과의 교차곡선이 등축선이 된다. 이렇게 계산된 등축선과 가공 반경의 교점을 계산하고 이를 이용하여 공구 경로를 zig-zag 로 형성한다.

일정한 z 좌표에 따른 등축선은 다음과 같이 계산한다. 날개 윤곽선에 의한 등축선은 날개면을 가공할 때와 날개가 없는 부분을 가공할 때 모두 필요하다. 날개 윤곽선은 프로펠러의 뒷날로 구성된 곡선과 이웃하는 날개의 앞날로 구성된 곡선으로 정의할 수 있다. 이 곡선들을 가공에 사용되는 공구의 반경만큼 오프셋하여 등축선을 정의한다. 날개가 위치한 부분을 가공할 때 사용되는 등축선은 가공 깊이 z 를 갖는 날개 표면상의 곡선을 공구 반경만큼 오프셋하여 정의한다(Fig. 11). 따라서 프로펠러 회전축을 법선으로 갖는 평면과 프로펠러 날개면의 교차곡선을 계산할 필요가 있다. 본 연구에서는 베지어 subdivision 방법을 이용하여 교차 곡선을 계산하였다. 계산 과정은 다음과 같다. 우선 B-spline 곡면으로 표현된 가공하려는 프로펠러 곡면을 knot 삼입을 이용하여 여러 개의 베지어 단위곡면(patch)로 나타낸다. 프로펠러의 기하학적 특성상 교차 곡선은 허브에서 날개끝 방향으로 형성되기 때문에 허브 쪽의 베지어 단위곡면으로부터 하나의 베지어 단위곡면과 평면의 교차 곡선을 찾아나가면 전체 교차 곡선을 구할 수 있다. 하나의 베지어 단위곡면과 평면의 교차 곡선을 찾을 때, subdivision 방법(Hoschek and Lasser 1993)을 사용한다. 베지어 단위곡면에서 하나의 매개변수를 고정하면 베지어 곡선이 얻어

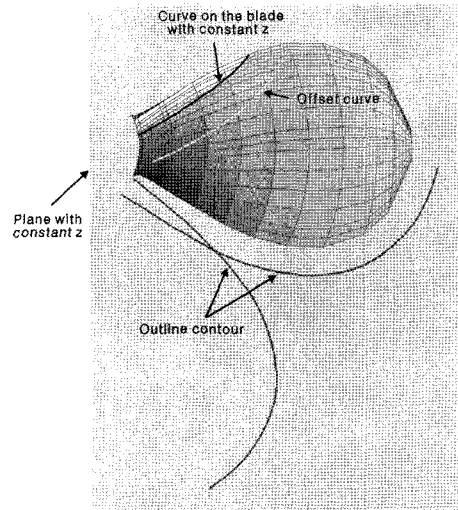


Fig. 11 Blade and outline contours with constant z

지고, 이 곡선 상의 점들 중에서 가공 깊이와 같은 z 값을 갖는 점을 베지어 곡선을 subdivision 하여 해의 범위를 줄여가면서 찾는다. 이 방법은 베지어 곡선의 convex-hull 성질을 이용하기 때문에 해의 존재 여부를 빨리 결정할 수 있고, 미분 값을 이용하는 방법이 아니기 때문에 항상 수렴하는 해를 얻을 수 있다. 이렇게 계산된 곡선을 공구 반경만큼 오프셋하여 날개에 의한 등축선을 얻을 수 있다. 이때 곡선의 곡률 반경이 공구 반경보다 작을 경우에 오프셋된 곡선에서 가공시 과절삭을 일으킬수 있는 자기교차(self-intersection)가 발생할수 있다. 이 때에는 오프셋 곡선에서 폐곡선을 찾아 제거하는 과정이 추가로 필요하다.

가공 깊이가 결정되면 한 쌍의 등축선이 정의된다. 즉, 날개가 없는 부분 가공에서는 날개 윤곽선에 의한 등축선 두개가, 날개가 있는 부분 가공에서는 날개 윤곽선에 의한 등축선 하나와 날개면에 의한 등축선 하나가 쌍을 이룬다. 한 쌍의 등축선 사이를 프로펠러 날개 끝 반경에서부터 허브 방향으로 접근하는 zig-zag 형태의 경로를 생성할 수 있고 이것이 황삭을 위한 공구경로가 된다. Fig. 12는 가공 경로와 방향을 보이고, Fig. 13은 생성된 공구 경로를 보여주고 있다.

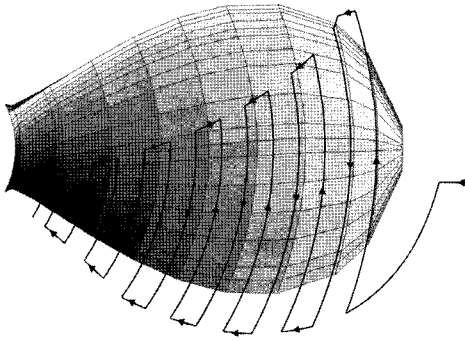


Fig. 12 Tool-path direction for roughcut

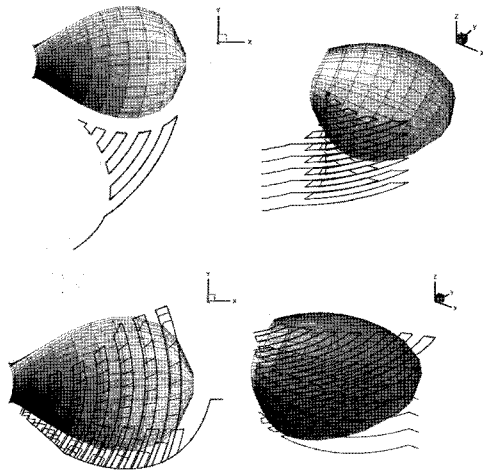


Fig. 13 Tool-path for roughcut

4.2 정삭

정삭은 황삭이 끝난 상태의 소재에서 프로펠러의 표면을 가공하는 단계로서, 공작기계에서 가공되는 마지막 단계이다. 정삭 가공은 가공의 정밀도를 위해 압력면과 흡입면 가공을 동일한 세팅에서 수행한다. 프로펠러 표면과 같은 자유 곡면 가공은 가공의 품질 향상을 위해 볼엔드밀을 사용하고 5 축(x, y, z, α, β)을 사용하여 가공하는 형태로 진행된다. 정삭 경로 생성은 Fig. 14와 같은 순서로 진행된다. 프로펠러의 회전축을 기계의 z 축으

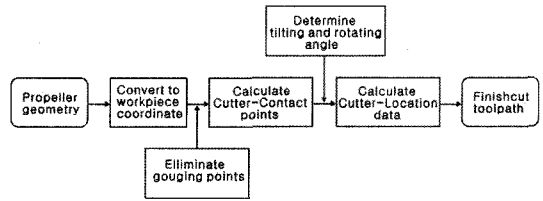


Fig. 14 Overview of finishcut process

로 설정하고 경사각(β)의 회전 중심이 $z=0$ 이 되도록 변환한다. 다음으로 공구접촉점(CC:Cutter-Contact point)을 결정한다. 이 때, 공구 반경에 따라 가공시 과절삭이 발생할 수 있는 점을 제거하는 과정이 추가된다. 이렇게 계산된 CC 점에서 공구 반경만큼 오프셋하여 공구위치점(CL:Cutter-Location point)을 계산하고, 경사각과 회전각(α)을 조절하여 가공시 공작물과 공구의 간섭이 없는 공구 자세를 결정한다. 계산된 공구위치점과 공구 자세 정보를 이용하여 정삭 공구 경로를 생성한다.

프로펠러의 표면은 B-spline 곡면으로 모델링되어 있기 때문에 공구 접촉점은 매개변수 (u, v)를 이용하여 정의할 수 있다. 반경 방향을 나타내는 매개변수가 v 이며, 코오드 방향을 나타내는 매개변수가 u 이기 때문에 가공 간격을 고려하여 u, v 의 증가량을 결정한다. 정삭용 공구의 위치는 Fig. 15와 같이 공구접촉점에서 법선 방향으로 공구 반경만큼 오프셋하여 결정한다. 이 때, 곡면의 곡률 반경이 오프셋 양보다 작을 경우, 일반적으로 오프셋 곡면에서 자기교차가 발생하며, 이는 가공시 과절삭을 발생시킨다. 또한 자기 교차가 발생하지 않더라도 과절삭을 유발할 수 있는 경우(Fig. 16)가 나타날 수 있다. 따라서 자기교차를 제거할 수 있는 오프셋 방법이 Aomura and Uehara(1990)와 Ravi Kumar et al.(2002)등에 의해서 제안되었지만, 해의 수렴문제와 자기교차가 없는 과절삭의 경우에 적용할 수 없는 단점이 있다.

프로펠러의 경우, 필렛 부분의 영향으로 뿌리부근에서 과절삭이 발생할 가능성이 높다. 본 연구에서는 자기교차가 없는 경우도 과절삭을 판단하기 위하여, 오프셋 점과 곡면과의 최단 거리를 계산하는 방법을 사용한다. 가공하려는 곡면에 검

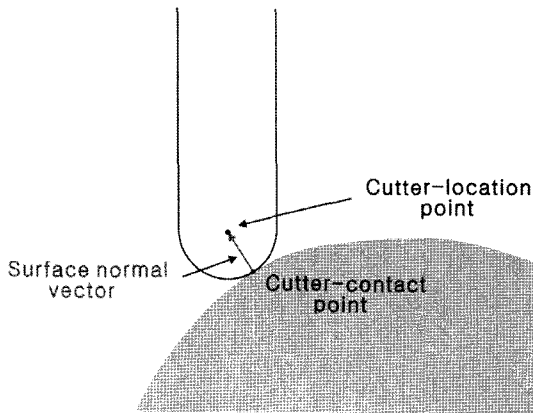


Fig. 15 Cutter location point

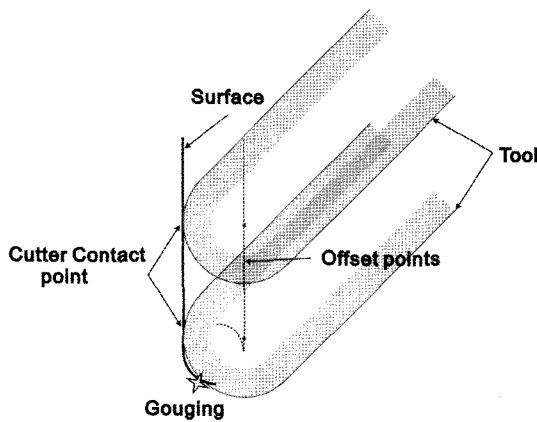


Fig. 16 Gouging

사점을 분포시키고, 오프셋 점과의 거리를 계산하여 가장 작은 값을 오프셋 점과 곡면과의 최단 거리로 정의한다. 본 연구에서는 곡면의 2차 미분값을 이용하여 검사점의 수(n)를 결정한다(Piegl and Tiller 1999).

$$n = \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{pow} \sqrt{\frac{M_1 + 2M_2 + M_3}{8}}$$

where $pow = 0.5$

$$\begin{aligned} M_1 &= \|s_{uu}(u, v)\| \\ M_2 &= \|s_{uv}(u, v)\| \\ M_3 &= \|s_{vv}(u, v)\| \end{aligned}$$

(4)

프로펠러의 기하학적 특성상 모든 오프셋 점에서 최단거리를 계산할 필요가 없다. 프로펠러의 곡면 중에서 과절삭이 발생할 수 있는 부분은 프로펠러의 뿌리 부근으로 한정되어 있기 때문이다. 프로펠러의 필렛은 앞서 설명한 것처럼 뿌리 부분의 두께(T)만큼의 위쪽에서부터 곡률 반경이 $3T$, 곡률 반경이 $T/3$ 인 두 개의 원호로 정의 된다. 일반적으로 모형프로펠러 가공시 공구 반경이 $3T$ 보다 크지 않기 때문에 최단 거리 계산은 허브로부터 T 이내로 한정할 수 있다. Fig. 17은 이 방법으로 계산된 과절삭이 없는 영역을 매개변수 영역에서 나타낸 것이고, Fig. 18은 생성된 공구 경로를 보여주고 있다.

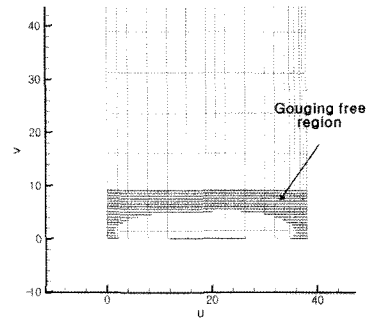


Fig. 17 Gouging free region in parameter domain

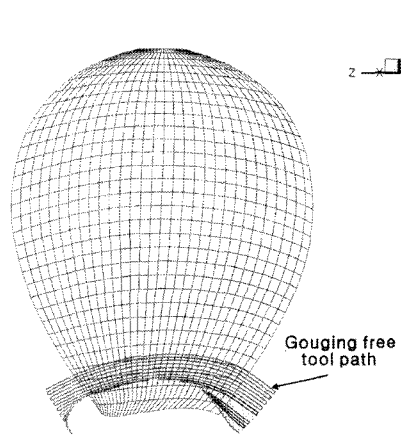


Fig. 18 Gouging free tool-path

정삭 가공시는 5 축을 모두 사용하기 때문에 공구가 주위 날개와 간섭이 일어나지 않도록 하는 공구 자세를 결정해야 한다. 공구 자세를 결정하는 방법은 공작물에 검사점을 분포하고 모든 가공점에서 회전각과 경사각을 바꿔가면서 공구축과의 거리를 계산하여 간섭이 없는 영역을 계산하는 방법(Choi and Jerard 1998)과 가공하는 날개와 이웃하는 날개에 한 쌍의 간섭이 없는 벡터를 설정하고 공구 축벡터가 두 개의 벡터 사이에 위치하도록 하는 방법(Youn et al. 2003)이 있다. 첫번째 방법은 모든 가공점에서 간섭이 없는 영역을 모두 계산하기 때문에 계산 시간이 길어지는 단점이 있고, 두번째 방법은 회전각과 경사각을 동시에 계산할 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 프로펠러의 날개면이 변화가 적은 자유곡면이기 때문에 간섭이 없는 영역이 점진적으로 변한다는 가정하에 첫번째 방법을 수정하여 사용한다.

프로펠러 곡면상에서 매개변수 v 를 고정하면 코오드 방향의 공구 경로가 얻어진다. 코오드 방향의 경로상의 샘플점에서만 간섭 영역을 계산한다. 샘플점은 half cosine spacing 을 사용한다. 이렇게 생성된 샘플점에서 간섭 영역을 계산하면 각 점에서 Fig. 19 와 같은 간섭이 없는 회전각과 경사각의 영역을 계산할 수 있다. 이렇게 샘플점에서 계산된 간섭이 없는 영역의 도심점을 계산하고, 이를 공구 경로 방향으로 3 차 spline fitting 을 하면 공구 경로를 따라서 회전각과 경사각을 모두

계산할 수 있다. 위의 과정을 매개변수 v 를 가공 간격에 따라 바꿔가면서 수행하면 정삭을 위한 간섭이 없는 공구 자세를 모두 얻을 수 있다. 공작물에 분포한 검사점과 공구축과의 거리를 계산하기 위해서 회전각과 경사각에 따른 공구의 자세를 수학적으로 표현할 필요가 있다. Fig. 9와 같이 경사각 β 는 공작기계의 y 축을 중심으로 회전하는 각이고, 회전각 α 는 프로펠러 축을 중심으로 회전하는 각이기 때문에 초기 공구축 벡터가 $(0,0,1)$ 이면 각도 변화에 따른 공구축의 변화는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha \sin\beta \\ \cos\beta \end{pmatrix} \quad (5)$$

이렇게 표현된 공구축과 프로펠러 표면에 분포된 검사점과의 거리를 계산하여 간섭 여부를 판단한다. 정삭에 사용하는 공구는 볼엔드밀로써 공구 중심점 아래는 반구 형태를 갖고 있으며 위는 실린더 형태를 갖는다. 따라서 Fig. 20과 같이 공구 중심점 아래에 위치한 검사점(p_1)과의 거리는 공구 중심점과 검사점과의 거리로 계산하고, 공구 중심점 위에 위치한 검사점(p_2, p_3)과의 거리는 공구 중심축과 검사점과의 거리로 계산한다. 이렇게 계산된 거리가 공구의 반경이나 지지구(holder)의 반경보다 작으면 충돌이 발생하는 상태이다. 모든 검사점들과의 거리가 공구 반경이나 지지구의 반경보다 클 때만이 충돌이 없는 공구 자세가 된다.

정삭은 정밀도를 위해 세팅을 변경하지 않고 압력면과 흡입면을 가공하기 때문에 공구의 접근 방향을 프로펠러의 반경 방향으로 한다. 따라서 공구 경로는 코오드 방향을 따라 생성하면서 날개끝에서 허브 쪽으로 내려오면서 zig-zag 로 생성한다. 즉 매개변수 v 를 고정하고 매개변수 u 를 변화시키면서 등매개변수 곡면상에서 코오드 방향의 공구 경로를 생성하고 v 를 줄여가면서 반복 수행하면 날개 한 면을 가공하는 공구 경로를 구할 수

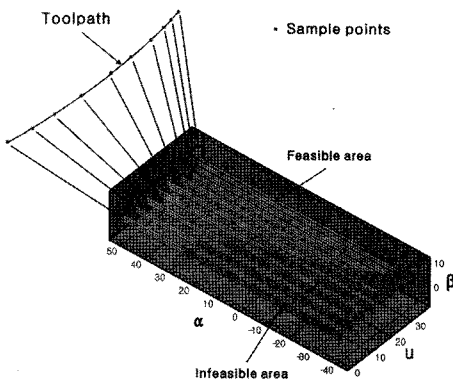


Fig. 19 Feasible area

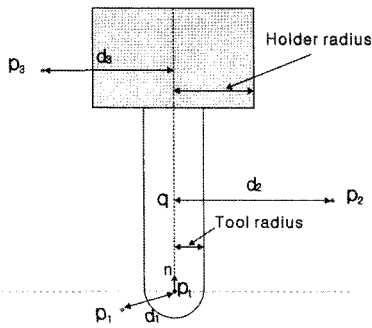


Fig. 20 Calculation of distance between sample points and a cutter

있다. 이 때, 프로펠러 날개끝 부분은 코오드 길이가 0 에 가깝기 때문에 공구 경로 생성시 오류를 발생시킬 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 매개변수 v 의 시작을 날개끝에서 바로 시작하지 않고 가공 간격을 하나 내려온 위치에서부터 시작한다. Fig. 21은 생성된 정삭 공구 경로의 예이다.

Fig. 6에서와 같이 수면관통형 프로펠러의 경우, 뒷날(물고기 꼬리 형상)이 일치하지 않기 때문에 압력면과 흡입면을 모두 가공하더라도 가공되지 않는 부분(뒷날면)이 발생한다. 따라서 수면관통형 프로펠러의 경우 이 부분을 가공하기 위한 과정이 추가로 필요하다. 뒷날 부분은 날개 단면상에서 볼 때, 두 개의 뒷날점을 직선으로 연결한 형태이므로 뒷날면은 선직면(ruled surface)로 생각할 수

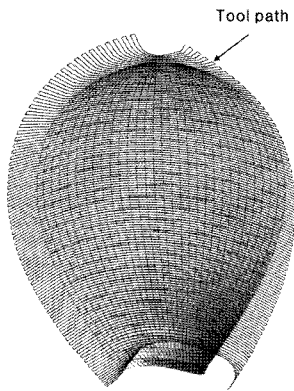


Fig. 21 Tool-path for finishcut

있다. 따라서 날개 가공시와 같이 날개끝 부분부터 허브 부분 방향으로 가공 경로를 생성할 수 있다(Fig. 22).

허브 부분은 Fig. 8과 같이 실린더 곡면의 일부로서 양끝이 날개면으로 둘러싸인 형태이다. 따라서 공구 경로 생성시 날개와의 경계 부분에서 날개와의 간섭이 발생한다. 결국 허브 가공을 위한 공구 경로는 날개와 가까운 일부 부분을 제외한 허브면의 안쪽에서 생성하게 된다. 프로펠러 축방향 매개변수를 u , 허브 곡면의 원호 방향 매개변수를

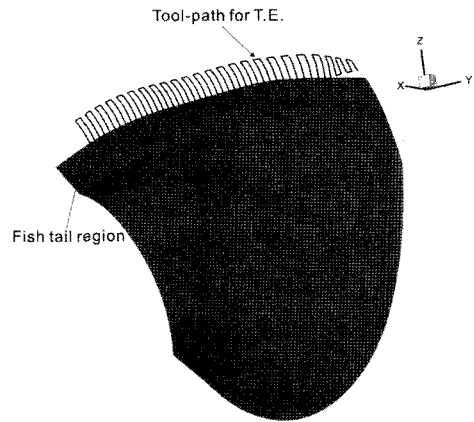


Fig. 22 Tool-path for trailing edge of surface piercing propeller

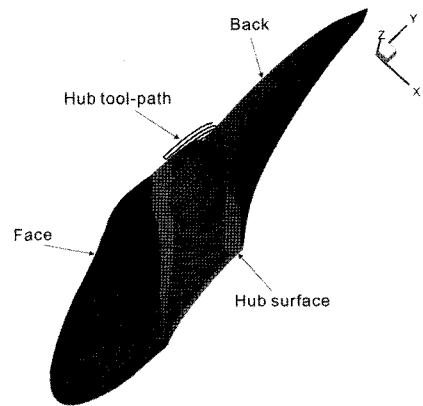


Fig. 23 Generated tool-path for hub surface

v 라 하면, 고정된 u 에 대하여 날개와의 간섭이 없는 한 쌍의 v 를 계산할 수 있고 이 한 쌍의 v 사이에서 가공 경로를 생성하고 u 방향으로 진행 하면서 zig-zag 형태로 공구 경로를 생성하게 된다(Fig. 23).

5. 프로펠러 가공

모형 프로펠러를 가공하는 과정은 다음과 같다. 프로펠러의 부피를 모두 포함할 수 있는 크기의 원통형 소재를 기본 소재로 한다. 황삭 과정에서 흡입면을 가공한 후에 소재의 세팅을 변경하기 때문에 소재에 기준을 정할 수 있는 기준(key)홀을 만든다. 소재가 프로펠러의 두께보다 두껍고, 직경보다 클 경우, 이에 맞도록 소재를 가공하여 프로펠러의 크기에 맞춘다. 다음으로 프로펠러의 날개가 없는 부분을 절삭하여 제거한다. 흡입면의 황삭 과정을 거치고, 소재의 세팅을 변경하여 압력면의 황삭을 수행하면 황삭 과정이 끝난다. 압력면과 흡입면의 정삭 과정을 거치면 공작 기계에서의 가공이 모두 끝난다. 수작업과 표면처리(anodizing)를 마치면 모형 프로펠러의 제작이 완성된다(Fig. 24).

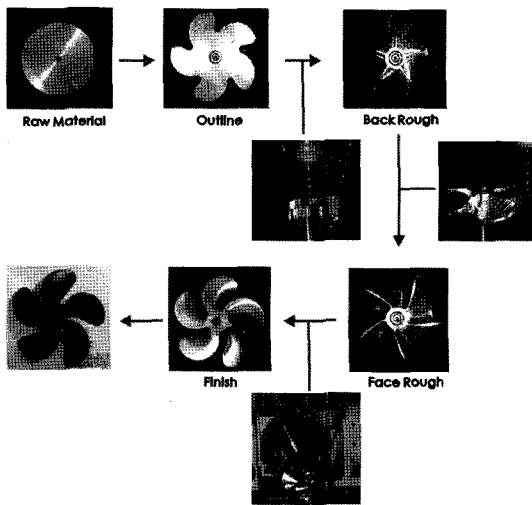


Fig. 24 Process of manufacturing a model propeller

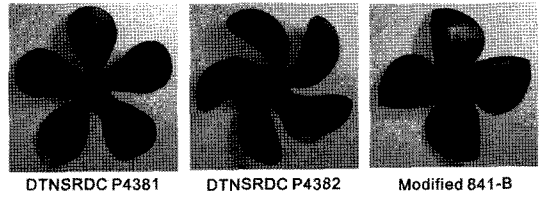


Fig. 25 Manufactured propellers

Fig. 25는 본 연구를 통해 제작한 직경 150mm DTNSRDC P4381, DTNSRDC P4382, 841-B 를 기본으로 변형한 모형 프로펠러이다.

6. 결론 및 향후 과제

일반적인 프로펠러와 수면관통형 프로펠러를 5축 공작기계를 사용하여 가공할 수 있는 간섭이 없는 공구 경로를 생성하였다. 수면관통형 프로펠러의 경우 뒷날면을 가공하기 위한 과정이 추가로 필요하다. 황삭과 정삭 가공 경로 생성시 발생할 수 있는 과절삭과 공구와 공작물 간의 간섭을 회피할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 5 의 P4381, P4382 프로펠러와 수면관통형 프로펠러인 841-B 를 기본으로 변형한 모델을 가공하였다.

본 연구는 과절삭과 간섭이 없는 가공 경로 생성에 초점을 두었다. 따라서 보다 정밀한 가공을 위한 가공 세팅과 가공 조건, 공구 진동 등에 대한 연구는 수행하지 않았다. 하지만 보다 높은 정밀도를 달성하기 위해서는 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 정밀한 측정에 의한 가공 정밀도 측정도 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구 과제(R01-2004-000-10518-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김유철, 김태완, 서정천, 2006, “ 표면 유선에

- 정렬된 날개 단면을 이용한 프로펠러 형상 설계,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 4 호, pp. 440-450.
- 윤병로, 서승완, 김원돈, 김광욱, 1985, “ B-spline 을 이용한 선체 표면의 표현에 관한 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 22 권, 제 3 호, pp. 19-26.
 - 윤재웅, 박종환, 1998, “ 프로펠러 5 축 가공을 위한 CAD/CAM 시스템,” 대한조선학회 논문집, 제 35 권, 제 2 호, pp. 51-62.
 - 정성욱, 이승희, 2006, “ 수면관통형 터널 프로펠러의 성능해석을 위한 실험적 연구,” 대한조선학회 논문집, 제 43 권, 제 3 호, pp. 294-303.
 - Aomura, S. and Uehara, T., 1990, "Self-Intersection of an Offset Surface," Computer-Aided Design, Vol. 22, pp. 417-422.
 - Choi, B.K. and Jerard, R.B., 1998, Sculptured Surface Machining, Kluwer Academic Publishers.
 - Farin, G. and Hansford, D., 2000, The Essentials of CAGD, Ak Peters.
 - Hoschek, J. and Lasser, D., 1993, Fundamentals of Computer Aided Geometric Design, Ak Peters.
 - Youn, J.W., Jun, Y.T. and Park, S.H., 2003, "Interference-free Tool Path Generation in Five-axis Machining of a Marine Propeller," International Journal of Production Research, Vol. 41, No. 18, pp. 4383-4402.
 - Kuo, H.-C. and Dzan, W.-Y., 2002, "The Analysis of NC Machining Efficiency for Marine Propellers," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, pp. 389-395.
 - Piegl, L.A. and Tiller, W., 1999, "Computing Offsets of NURBS Curves and Surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 31, pp. 147-156.
 - Ravi Kumar, G.V.V., Shastry, K.G. and Prakash, B.G., 2002, "Computing Non-self-intersecting Offsets of NURBS Surfaces," Computer-Aided Design, Vol. 34, pp. 209-228.



< 김 유 철 >



< 김 태 완 >



< 서 정 천 >