

# 기하학적 특성을 이용한 프로펠러의 효율적인 5축가공

황종대\*<sup>,#</sup>, 윤일우\*

\*한국폴리텍대학 부산캠퍼스 기계시스템과

## Efficient 5-axis Machining of a Propeller using Geometric Properties

Jong-Dae Hwang\*<sup>,#</sup>, Il-Woo Yun\*

\*Department of Mechanical System, Busan Campus of Korea Polytechnics

(Received 14 January 2020; received in revised form 10 March 2020; accepted 17 March 2020)

### ABSTRACT

The rotary feed axes of a 5-axis machine tool can increase the freedom of the tool posture, while reducing feed speed and rigidity. In addition, as a ball-end mill is inevitably used during machining by rotational feed, the step-over length is reduced compared to the flat-end mill, thereby reducing the material removal rate. Therefore, this study attempts to improve the material removal rate, feed speed, and machining stability using the corner radius flat-end mill and a fixed controlled machining method for the rotary feed axes during roughing. In addition, the tapered ball-end mill and simultaneously controlled machining method for the rotary feed axes were used for finishing to improve the propeller's 5-axis machining efficiency by enhancing the surface quality. In order to create the tool path effectively and easily, we propose a specific approach for using the propeller's geometric properties and evaluate the effectiveness of the proposed method by comparing it with the method of the dedicated module.

**Key Words** : 5-axis Machining(5축가공), Propeller(프로펠러), Geometric Properties(기하학적 특성)

### 1. 서 론

임펠러는 회전 운동에너지를 반경방향의 유체에 너지로 전환하는 반면 프로펠러는 축방향으로 전환함으로써 선박이나 기체를 추진하기 위한 핵심 부품이다. 최근 고부가가치 LNG선을 필두로 조선해양산업의 선진화를 추구하는 호프이나 드론산업의 폭발적인 수요에 비추어 볼 때 고성능의 프로펠러 설계 및 제작은 필수적이다.

프로펠러 제작에 요구되는 특성은 공동(Cavity) 현

상이나 저항 없이 유체가 매끄럽게 흐르도록 표면 품질을 높이는 것이다. 이를 위하여 프로펠러 블레이드와 공구가 간섭되지 않으면서도 공구경로의 미스매치가 없이 효과적으로 1회 세팅으로 완가공이 가능한 5축가공 기술이 적용되고 있다.

프로펠러의 5축가공에 관한 연구는 모형 프로펠러의 곡률 등 기하학적 특성을 활용하여 과절삭(Gouging)을 제거하는 방법<sup>[1]</sup>, 인접한 모델링 곡면을 구성공간(C-space)으로 매핑하여 프로펠러 5축가공을 위한 공구방향 변화를 최소화하는 연구<sup>[2]</sup>, 프로펠러 블레이드 곡면의 곡률과 주 방향 등 기하학적 특성을 활용한 NC 프로그래밍 연구<sup>[3]</sup> 등과 같이 프로펠러 곡면의 설계나 주어진 모델링의 기하학적 형상 정보를

# Corresponding Author : [hjd@kopo.ac.kr](mailto:hjd@kopo.ac.kr)

Tel: +82-51-330-7764, Fax: +82-51-332-4801

활용하여 공구경로를 생성하는 연구들이 발표되었으나 실용적인 접근이 어려웠다. 대형 선박 프로펠러 곡면의 5축가공을 위하여 공구회전각을 변수로 한 CL 데이터 최적화에 관한 연구<sup>[4]</sup>, CAM, 후처리, 머신 시뮬레이션을 통합하고 충돌 없는 공구자세를 생성하여 프로펠러 뿌리(Root) 부 가공에 적용한 연구<sup>[5]</sup> 등과 같이 공구자세 제어 및 순정에 관한 연구가 발표되었으나 황삭 및 정삭을 위한 구체적인 프로세스가 제시되지 않아 실제적 적용이 어려웠다. 응용 연구로는 선박용 프로펠러의 후란주형 설계 및 가공 시스템 개발에 관한 연구<sup>[6]</sup> 등이 있었으며, 프로펠러와 유사한 임펠러의 5축 황삭에 관한 연구<sup>[7]</sup>가 있었으나 볼 엔드밀을 사용함으로써 회전축 고정제어 황삭의 장점인 가공효율 향상 극대화를 피하지 못하였다.

본 연구에서는 프로펠러의 기하학적 특성을 이용하여 손쉽게 황삭 및 정삭 경로를 생성하기 위한 방법을 제시함으로써 가공시간 단축, 표면 품질 향상 등 효율적인 5축가공을 수행할 수 있도록 하며 전용 CAM 모듈과의 비교 검증가공을 통해 유효성을 평가한다.

## 2. 실험방법 및 모델링

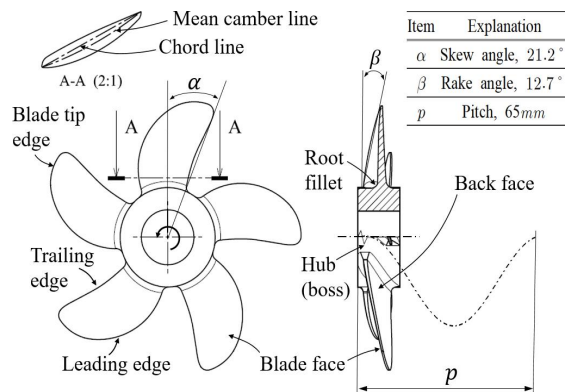
### 2.1 실험방법

5축가공기의 회전이송축은 공구자세의 자유도를 증가하여 접근성과 표면품질을 향상시키는 반면 이송속도와 강성을 저하한다. 또한 회전이송에 의한 가공 시 불가피하게 볼엔드밀을 사용하게 되므로 평엔드밀에 비해 스텝오버 길이가 줄어들게 되어 소재제거율을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 프로펠러의 황삭가공 시 코너레이우스 평엔드밀과 회전축 고정제어 방법을 사용하여 소재제거율, 이송속도 및 가공 안정성을 높이고, 정삭가공 시 테이퍼 볼엔드밀과 회전축 동시제어 방법을 사용하여 블레이드 표면의 미스매치와 과절삭이 없는 표면 품질을 확보함으로써 프로펠러의 5축가공 효율성을 높인다.

효과적이고 손쉽게 공구경로를 생성하기 위하여 프로펠러의 기하학적 특성을 활용하여 일정한 규칙을 제시하며 제시한 방법의 유효성을 검증하기 위하여 HyperMill의 전용모듈을 사용하여 가공한 후 상호 비교한다. 사용된 가공방법, 절삭조건, 5축가공기 및 소재는 Table 1에 제시한 바와 같다.

**Table 1 Experimental condition**

Application method	Proposed	Module
CAM S/W	CATIA	HyperMill
Rotating control	Fixed	Simultaneous
Tool(Endmill)	Corner radius (∅6-0.5R)	Taper ball (∅4-5°)
Spindle (rpm)	5300	8000
Feed (mm/min)	2120	3200
D.O.C (mm)	1	1
Step over length(mm)	3	1
Rotating control	Simultaneous	
Tool(Endmill)	Taper ball(∅4-5°)	
Spindle (rpm)	8000	
Feed (mm/min)	3200	
Scallop height(mm)	0.01	
Machine tool	Mytrunnon-5	Work piece AL6061-T6



**Fig. 1 Schematic of the propeller elements**

### 2.2 프로펠러 모델링

Fig 1은 프로펠러의 성능을 높이기 위한 공동 실험 등에 사용되는 모형 프로펠러로서 ∅84×13L이다. 그 림과 같이 허브(Hub or boss)에 블레이드(Blade)가 회전 배치되어 앞면인 블레이드 페이스(Blade face)와 뒷면인 백 페이스(Back face)로 이루어지고, 유체의 유입부에 리딩에지(Leading edge), 유출부에 트레일링에지(Trailing edge)로 구성된다. 블레이드와 허브는 뿌리 필렛(Root fillet)으로 연결되어 있으며 반대쪽은 블레이드팁에지(Blade tip edge)로 구성된다. 임펠러의 쉬라우드는 리딩에지와 트레일링에지 사이에서 명확한 경계가 있는 반면 프로펠러의 블레이드팁에지는 곡선연속이므로 곡률해석을 통하여 필요한 길이만큼을 추출

하여 정의하였다. 그 외 Skew angle, Rake angle, Pitch, Camber line과 Chord line 등의 기하학적 특성이 있다.

이러한 기하학적 특성은 임펠러나 기타 회전체 부품과 비교되는 프로펠러만의 고유 특성이다. 즉, 임펠러나 로우터가 회전 운동에너지를 반경방향의 유체에너지로 전환하기 때문에 허브 형상이 리딩에지 부터 트레일링 에지에 이르기 까지 대체로 완만한 경사를 이루며 반경방향으로 향하는 반면 프로펠러는 회전 운동에너지를 축방향으로 전환함으로써 추진력을 얻는 구조이기 때문에 허브 형상이 축방향과 평행을 이룬다. 이러한 기하학적 특성은 프로펠러의 형상정보가 설계에 따라 다소 상이하더라도 변함없는 구조적인 특징이다. 5축가공의 측면에서는 허브 형상이 완만한 경사를 이루는 임펠러에 비해 축방향으로 나란한 프로펠러의 경우, 가공을 위한 회전이송축의 변화가 더 큰 부품이라 할 수 있으며, 따라서 프로펠러의 효과적인 5축가공을 수행하기 위하여 이러한 기하학적 특성과 회전이송 특성을 파악하여 적절한 공구축 벡터 및 공구 경로를 생성할 필요가 있다.

### 3. 공구경로 생성 및 5축가공

#### 3.1 기하학적 특성을 이용한 황삭

##### 3.1.1 기하학적 특성을 이용한 공구축벡터

2.2절에서 기술한 프로펠러 모델의 황삭경로를 생성하기 위하여 프로펠러의 트레일링 에지와 Z축이 이루는 각도를 비롯한 기하학적 특성과 5축가공의 틸팅 각도를 비롯한 회전축 특성을 매칭하는 방법을 사용하였다. 즉 모델링의 형상정보가 다소 상이하더라도 프로펠러 고유의 기하학적 특성에 근거하여 5축가공의 회전축 특성과 일치시킴으로써 공구경로 생성을 위한 일정한 규칙을 만드는 것이다.

황삭경로를 생성하기 위한 공구축벡터는 5축가공기의 2개의 회전이송에 의해 결정되므로 틸팅과 로테이션 동작의 범위와 규칙을 정하고 프로펠러의 기하학적 특성과 매칭으로써 결정할 수 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 5축가공기(Kitamura, Mytrunion-5)와 두 개의 회전이송축을 정의한 개략도로서 X축을 중심으로 유향각도(틸트각,  $\theta_t$ ) 회전하

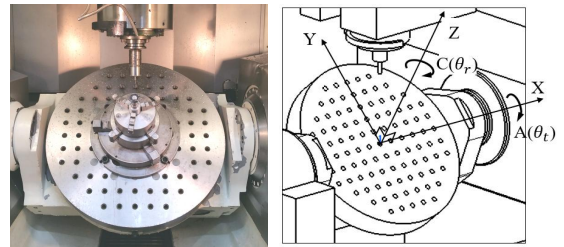


Fig. 2 Definition of the rotary axes

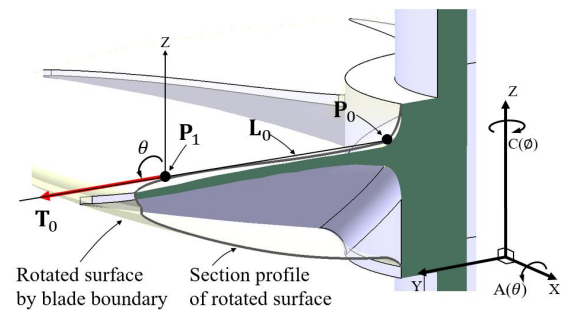


Fig. 3 Tool axis vector setting matching with tilt angle

는 축을 틸팅(A)축, Z축을 중심으로 무한각도(로테이트각,  $\theta_r$ ) 회전하는 축을 로테이션(C)축이라 정의하며 틸트각의 범위는  $-120^\circ \leq \theta_t \leq 30^\circ$  이다.

먼저, 틸팅에 의한 공구축벡터를 정의하기 위하여 Y-Z 평면상에 Fig. 3과 같이 프로펠러형상을 투영하고, 블레이드 경계(Boundary)를 회전한 곡면을 교차시키면 그림과 같이 단면곡선(Section profile)이 얻어진다. 단면곡선과 뿌리필렛의 교점,  $P_0$ 와 단면곡선과 접하는 점,  $P_1$ 을 연결하는 직선,  $L_0$ 를 정의하면 식 (1)과 같이  $T_0$  벡터가 생성된다.  $T_0$ 와 Z축이 이루는 각,  $\theta$ 는 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 여기서  $u_x, u_y, u_z$ 는 각각  $T_0$  벡터의 각 축 성분이다.

다음, Fig. 4와 같이 X-Y 평면에서 블레이드와 뿌리 필렛의 교점  $P_2$  및  $P_3$ 를 연결하는 직선,  $L_1$ 의 중점에서 수선을 만들면 직선,  $L_2$ 가 정의된다. 식 (3)에서  $N$ 은 블레이드의 개수이고  $n$ 은 형상에 따라 3~5 사이의 값으로 하면 로테이트각 결정의 근거가 되는 사이각,  $\phi$ 를 얻을 수 있다. 직선,  $L_2$ 를 식 (4)와 같이 Z축 중심으로 사이각  $\phi$  만큼 회

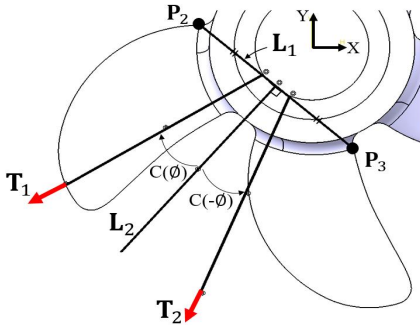


Fig. 4 Tool axis vector setting using rotate angle

전하면 로테이션 특성과 매칭시킨 1차적인 공구축 벡터,  $T_1$  및  $T_2$ 가 얻어진다.

최종적으로 직선,  $L_1$ 을 중심축으로 하고, 틸트각 결정의 근거가 되는  $\theta$ 를 이용하여 회전변환하면 식 (5)와 같이 틸팅 특성과 매칭시킨 공구축 벡터,  $T'_1$  과  $T'_2$ 이 얻어진다.

식 (4)의  $R_z(\phi)L_2$ 는  $L_2$  직선을 Z축 중심으로 사이각,  $\phi$  만큼 회전 변환함을 의미하고 식 (5)의  $R_{L_1}(90-\theta)T_1$ 은  $T_1$  벡터를  $L_1$  직선축 중심으로 회전각  $(90-\theta)$  만큼 회전 변환함을 의미한다.

$$L_0 = P_1 - P_0 = T_0 \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}}{u_z} \right) \quad (2)$$

$$\phi = (360^\circ / N) / n = (360^\circ / 5) / 4 = 18^\circ \quad (3)$$

$$T_1 = R_z(\phi)L_2, \quad T_2 = R_z(-\phi)L_2 \quad (4)$$

$$T'_1 = R_{L_1}(90-\theta)T_1, \quad T'_2 = R_{L_1}(90-\theta)T_2 \quad (5)$$

### 3.1.2 황삭영역 정의 및 공구경로 생성

공구축 벡터,  $T'_i$ 에 수직인 각각의 법평면,  $NP_i$ 에 는 Fig. 5의 (b)에 도시한 바와 같이 블레이드 경계의 읍셋곡선과 수직선이 만나는 교차점(Cross point),  $P_c$ 가 존재하게 되며 이를 활용하여 황삭영역

(Roughing Area),  $RA_i$ 를 구한다.

기하학적 특성과 회전이송축의 매칭을 통하여 생성한 공구축 벡터  $T'_i$ 과 황삭영역,  $RA_i$ 를 활용하여 Table 1에서 제시한 CATIA CAM 모듈의 Roughing 명령을 사용함으로써 Fig. 6과 같이 회전축 고정제어 공구경로를 생성하고 절삭시뮬레이션을 수행할 수 있다. 이러한 방법은 CATIA CAM 모듈만이 아닌 여타의 CAM 프로그램을 활용하더라도 적용 가능하며, Fig. 7은 비교를 위하여 기존 방식의 하이퍼밀 전용모듈에서 작성한 회전축 동시제어 황삭경로를 보여준다.

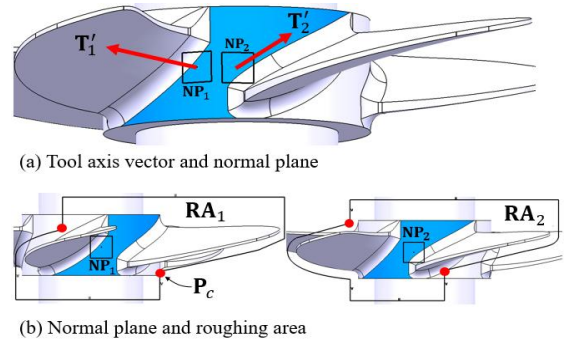


Fig. 5 Definition of roughing Area

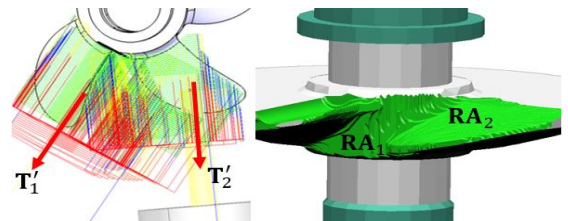


Fig. 6 Roughing tool-path generation and cutting simulation by proposed method

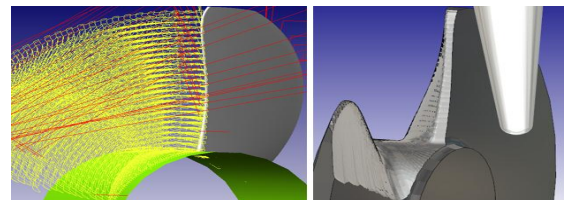


Fig. 7 Roughing tool-path generation and cutting simulation by dedicated module

### 3.2 벡터망을 이용한 정삭

황삭과 달리 정삭 경로는 간섭 및 공구경로간 미스매치, 표면품질 저하 등의 문제로 인해 회전축 고정제어 가공이 불리하므로, 프로펠러의 기하학적 특성에 기반한 벡터망을 활용하여 공구축벡터를 설정한 뒤 공구자세를 연속적으로 보간하여 회전축 동시제어 정삭을 수행한다.

전술한 바와 같이 프로펠러의 기하학적 특성은 완만한 허브곡면을 가진 임펠러나 로우터에 비해 축방향으로 나란한 형상을 가지므로 이러한 형상 특성을 반영하여 허브곡면과 블레이드 곡면이 만나는 뿌리필렛과 블레이드팁에지 및 리딩에지 곡선을 연결하는 벡터망을 정의하고 공구축벡터 생성에 활용한다.

Fig. 8과 같이 각 블레이드의 뿌리필렛 곡선과 블레이드팁에지 및 리딩에지를 등간격으로 연결하면 직선,  $V_j$ 가 생성되며, 각 블레이드의 뿌리필렛 곡선상의 점데이터를 연결하면 직선,  $L_j$ 가 생성된다.

직선,  $L_j$ 를 중심축으로 회피각도  $\alpha_j$  만큼 직선,  $V_j$ 를 회전변환하면 식 (6)과 같이  $T_j$ 로 구성된 벡터망이 생성된다. 회피각도  $\alpha_j$ 는 공구와 블레이드 곡면간의 간섭을 회피하기 위한 각도로 테이퍼 불엔드밀을 사용할 경우 테이퍼 각도보다 크도록 여유 있게 설정한다.

프로펠러의 기하학적 특성에 기반하여 생성한 벡터망을 공구축벡터로 활용하여 CATIA CAM 모듈의 Iso-parametric 명령과 Interpolation Tool Axis 컨트롤 옵션을 사용함으로써 공구축벡터를 연속적으로 보간하는 공구경로를 생성할 수 있으며, Fig. 9와 같이 정삭 공구경로를 구현할 수 있다. 이러한 방법은 CATIA CAM 모듈만이 아닌 여타의 CAM 프로그램을 활용하더라도 적용 가능하며, Fig. 9의 좌측부터 각각 정삭 공구경로, 블레이드 정삭 시뮬레이션, 허브정삭 시뮬레이션 결과를 보여준다. 벡터망을 이용한 정삭의 경우 회전축 동시제어 5축가공 경로를 생성하므로 기존의 하이퍼밀 전용 모듈에 의한 방법과 유사한 결과가 도출되었다.

$$T_j = R_{L_j}(-\alpha_j)V_j \quad (6)$$

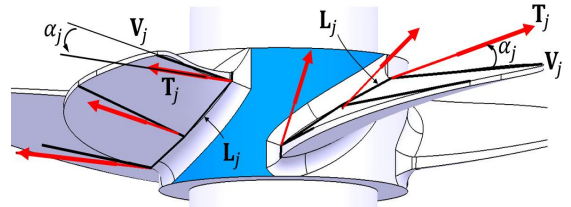


Fig. 8 Tool axis vector setting using vector net

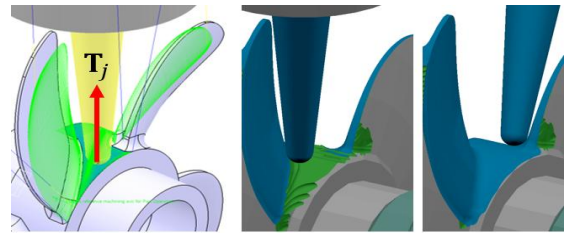


Fig. 9 Finishing tool-path generation and cutting simulation by proposed method

### 3.3 포스트프로세싱 및 5축가공

공구경로가 생성되면 공구의 위치벡터와 자세벡터로 구성된 CL데이터가 구해지며 포스트프로세싱을 통하여 위치좌표와 회전축값으로 구성된 NC 데이터로 변환한다. 회전축이 AC인 5축가공기의 틸트각과 로테이트각은 다음의 식 (7) 및 식 (8)과 같이 역기구해로 부터 구할 수 있다.

$$\theta_t = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{u_i^2 + u_j^2}}{u_k} \right) \quad (7)$$

$$\theta_r = \cos^{-1} \left( \frac{u_j}{\sqrt{u_i^2 + u_j^2}} \right) \quad (8)$$

여기서,  $u_i, u_j, u_k$ 는 CL 데이터 공구축벡터의 각 축 성분이다. 틸트각과 로테이트각이 구해지면 아래의 식 (9)를 이용하여 CL 데이터의 위치벡터,  $P_{CL}$ 을 NC 데이터의 위치벡터,  $P_{NC}$ 로 변환할 수 있으며 결과적으로 식 (10)과 같이 최종 NC 데이터를 구할 수 있다.

$$P_{NC} = P_{CL}R_z(-\theta_r)R_x(-\theta_t) \quad (9)$$

$$NC = P_{NC}, \theta_t, \theta_r \quad (10)$$

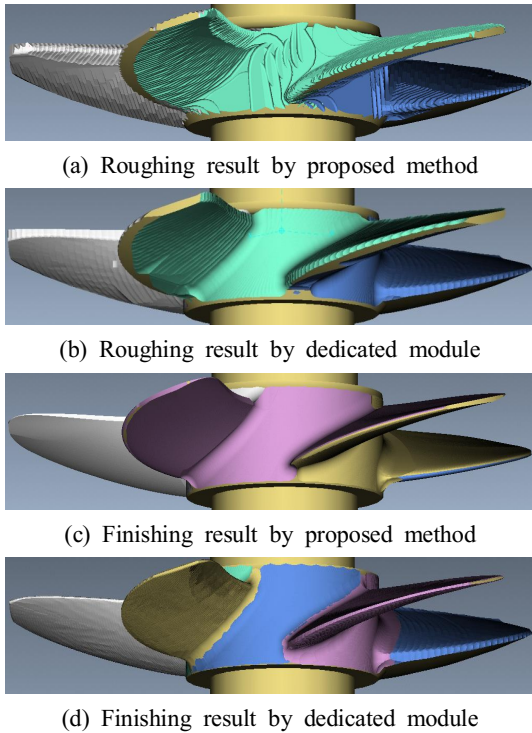


Fig. 10 Cutting simulation by Vericut S/W

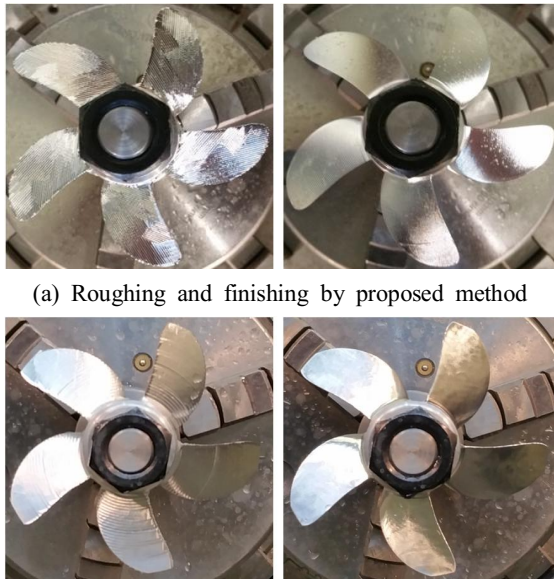


Fig. 11 5-axis machining and processing result

포스트프로세싱을 수행하여 얻은 NC데이터를 사용하여 Fig. 10과 같이 Vericut S/W에서 절삭 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10의 (a)와 (b)는 각각 제안한 방법과 기존의 전용모듈에 의한 방법으로 수행한 황삭 시뮬레이션 결과로서 회전축 고정제어 황삭과 회전축 동시제어 황삭의 가공형태가 상이함을 보여준다. Fig. 10의 (c)와 (d)는 각각 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 수행한 정삭 시뮬레이션 결과로서 두 방법 모두 회전축 동시제어 정삭으로, 가공형태가 유사함을 보여준다. Fig. 11의 (a)와 (b)는 각각 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 황삭 및 정삭 결과이다.

## 4. 가공결과 고찰

### 4.1 가공시간

Table 2는 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법 각각에 대하여 Vericut S/W에 의한 시뮬레이션가공 시간과 실제 5축가공 시간을 측정된 결과이다. 황삭시뮬레이션 결과 제안한 방법은 33.5분 소요된 반면 전용모듈에 의한 방법은 95.5분이 소요되어 약 65%의 가공시간 단축 효과를 나타내었다.

실제가공에서도 제안한 방법의 황삭은 전용모듈에 의한 황삭에 비해 약 67% 가공시간 단축 효과를 나타내었다. 전체 공정에 걸친 가공시간 비교 결과 역시 제안한 방법은 전용모듈에 의한 방법에 비해 약 56%의 가공시간 단축효과를 보였다.

이러한 결과는 회전축 고정제어 황삭을 통하여 가감속 및 회전이송 특성의 단점을 보완하고 코너레디우스 평엔드밀을 사용하여 소재제거율을 향상함으로써 획기적인 가공시간 단축이 가능함을 보여준다.

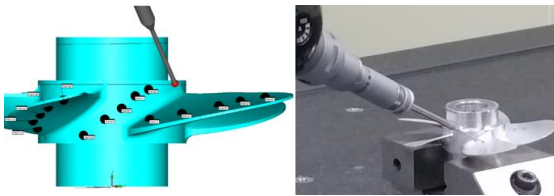
Table 2 Measuring result of machining time

Item	Proposed method, cutting time(min)		Dedicated module, cutting time(min)	
	Simulation	Real cut	Simulation	Real cut
Roughing	33.5	85	95.5	260
Finishing	24.5	50	24.0	48
Sum	58	135	119.5	308

제안한 방법의 회전축 고정제어 황삭은 시뮬레이션에 비해 실제가공에서 2.5배 더 소요되었고, 전용모듈에 의한 회전축 동시제어 황삭은 시뮬레이션에 비해 2.7배 더 소요되었다. 제안한 방법은 기존방법에 비해 시뮬레이션과 실제가공의 오차가 작아졌음을 알 수 있으며 그 이유는 회전축 고정제어 가공을 통하여 가감속 및 회전이송 특성에 의한 가공시간 지연을 감소하였기 때문인 것으로 판단된다.

### 4.2 가공형상 정밀도

Fig. 12의 (a)는 3차원 측정 S/W인 PC-DMIS에 프로펠러 모델링을 업로드 하고 측정요소를 선정한 장면으로 블레이드 페이스, 백 페이스 및 허브에 각각 5개의 포인트를 지정하였다. Fig. 12의 (b)는 BROWN & SHARP 사의 Global Image CMM을 사용하여 PC-DMIS에서 선정한 측정요소를 3차원 측정하는 장면이다. 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 프로펠러에 대하여 형상정밀도 오차를 구한 결과 Table 3과 같이 각각 평균오차 0.038mm 및 0.041mm로서 두가지 방법 모두 일반적인 형상정밀도 공차인 0.05mm 이내로 분석되었다.

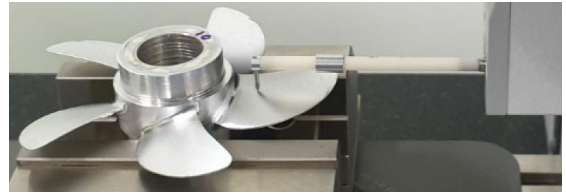


(a) Measuring element (b) Measuring scene

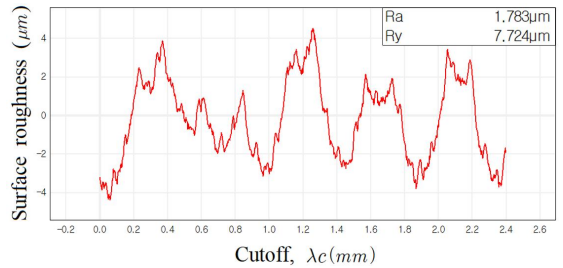
Fig. 12 Measurement of machined shape precision

Table 3 Measuring result of machined shape precision by 3-D CMM

Item	Proposed method, deviation(mm)	Dedicated module, deviation(mm)
d(1)	0.019	0.015
d(2)	0.049	0.051
d(3)	0.048	0.046
⋮		
d(15)	0.004	0.012
Mean	0.038	0.041



(a) Measuring scene



(b) Measuring result

Fig. 13 Measurement of surface roughness

Table 4 Measuring result of surface quality by surface roughness tester

Item	Proposed method, Ra(μm)	Dedicated module, Ra(μm)
01	1.783	3.315
02	1.187	2.365
03	1.778	2.587
Mean	1.58	2.76

### 4.3 표면조도

Fig. 13의 (a)는 곡면형상의 표면조도 측정이 가능한 Mitutoyo사의 FORMTRACER 표면조도 형상 측정기에서 블레이드 페이스 부의 표면조도를 측정하는 장면으로 3개소를 측정하였으며 Fig. 13의 (b)와 같이 측정결과 그래프를 출력하였다. 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 프로펠러에 대하여 각각 표면조도를 구한 결과 Table 4와 같이 두 방법 모두 평균 표면조도가 3μm 이내로 측정되어 Table 1에서 제시한 정상 Scallop height인 10μm 오차 범위 이내로 평가되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 프로펠러의 5축가공 시 기존의 회

전축 동시제어 황삭에서 발생하는 이송속도 저하, 강성 저하에 따른 가공 불안정성 문제와 볼랜드밀에 의한 소재제거율 저하 문제를 해결하기 위하여 기하학적 특성과 회전이송축의 매칭을 통한 코너레디우스 평엔드밀의 회전축 고정제어 황삭경로를 제안하였으며, 공구경로 생성의 편의성과 실용성을 향상하기 위하여 기하학적 특성과 벡터망을 통한 테이퍼 볼랜드밀의 회전축 동시제어 정삭경로를 제안하여 가공한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기하학적 특성과 회전이송축의 매칭 기법을 활용하고 코너레디우스 평엔드밀을 이용한 회전축 고정제어 황삭은 소재제거율, 이송속도 및 가공 안정성을 높임으로써 기존의 전용모듈에 의한 회전축 동시제어 황삭에 비해 획기적인 가공시간 단축효과를 도출하였다.
2. 기하학적 특성과 벡터망을 이용한 회전축 동시제어 정삭경로를 생성함으로써 CAM 작업 시 편의성과 실용성을 도모할 수 있으며 전용모듈에 의한 방법과 비교한 결과 형상정밀도 및 표면품질의 측면에서 요구공차 이내로 가공되어 제안한 방법의 실효성이 검증되었다.
3. 따라서 본 연구는 기하학적 특성을 이용하여 손쉽게 황삭 및 정삭 경로를 생성하고 가공시간을 단축하며, 표면 품질을 향상하는 등 프로펠러의 효율적인 5축가공에 기여할 것으로 기대된다.

## REFERENCES

1. Kim, Y. C., Kim, T. W. and Suh, J. C., "Gouging-free Tool-path Generation for Manufacturing Model Propellers" Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 2, pp. 198-209, 2007.
2. Jun, C. S., Cha, K. D. and Lee, Y. S., "Optimizing tool orientations for 5-axis machining by configuration-space search method", Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 6, pp. 549-566, 2003.
3. Kuo, H. C. and Dzan, W. Y., "The analysis of NC machining efficiency for marine propellers", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 124, No. 3, pp. 389-395, 2002.
4. 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.
5. Lauwers, B., Dejonghe, P. and Kruth, J. P., "Optimal and collision free tool posture in five-axis machining through the tight integration of tool path generation and machine simulation", Computer-Aided Design, Vol. 35, No. 5, pp. 421-432, 2003.
6. Park, J. W., Jung, C. W., Kwon Y. S. and Kang, S. P., "Development of Furan Mold Design and Machining System for Marine Propeller Casting", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 40, No. 1, pp. 121-128, 2016.
7. Cho, H. Y., Jang, D. K., Lee, H. K. and Yang, G. E., "A Study on Efficient Roughing of Impeller with 5-Axis NC Machine", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 11, pp. 1917-1924, 2003.