

기하학적 형상정보와 벡터망을 이용한 임펠러의 5축가공

황종대*^{,#}, 윤일우*

*한국폴리텍대학 부산캠퍼스 기계시스템과

5-axis Machining of Impellers using Geometric Shape Information and a Vector Net

Jong-Dae Hwang*^{,#}, Il-Woo Yun*

*Department of Mechanical System, Busan Campus of Korea Polytechnics

(Received 6 January 2020; received in revised form 15 January 2020; accepted 26 January 2020)

ABSTRACT

Two rotational motions of the 5-axis machine tool maximize the degree of freedom of the tool axis vector, which improves tool accessibility; however, this lowers feed speed and rigidity, which impairs machining stability. In addition, cutting efficiency is lowered when compared with a flat end mill because typically, the ball-end mill is used when machining by rotational motion. This study increased cutting efficiency by using a corner radius flat end mill during impeller roughing. Furthermore, we proposed a fixed controlled machining of the rotary motion using geometric shape information to improve the feed speed and machining stability. Finally, we proposed a finishing tool path generation method using a vector net to increase the convenience and practicality of tool path generation. To verify its effectiveness, we compared the machining time, shape accuracy, and surface quality of the proposed method and an existing dedicated module.

Key Words : 5-axis Machining(5축가공), Impeller(임펠러), Geometric Shape(기하학적 형상), Vector Net(벡터망)

1. 서 론

임펠러는 유체에너지를 운동에너지로 변환하여 원하는 기계적 일을 수행하기 위한 회전체로서 자동차, 항공기, 로켓, 발전기 등의 터보기거나, 터빈, 압축기, 펌프, 송풍기 등 유체기계의 핵심 부품으로 관련 설계 및 제작 기술이 비약적으로 발전하고 있다. 임펠러 형상은 직선이송으로 가공하기 어려우므로 일반적으로 5축가공을 통하여 제작한다. 5축가공은 2개의 회전이송축(이하 회전축)이 추가됨으

로써 공구접근성과 자유도가 확장되고 치공구 사용의 절감과 1회 세팅으로 완가공이 가능하므로 가공 정밀도 및 가공시간 단축에도 효과적이다.

임펠러의 5축가공 관련 연구는 절삭조건 및 가공성 평가에 관한 연구^[1-2]와 공구경로 생성에 관한 연구^[3-5], 간섭회피 및 공구자세제어 관련 연구^[6-7]등이 주로 발표되고 있다. 그러나 대부분의 관련 연구는 현장의 CAM 작업자가 직관적으로 이해하고 적용하기 어려우며 실용화가 쉽지 않았다. 월드 곡면 임펠러의 롤링라인을 공구축 벡터로 하여 황삭 영역을 분할하고 직선이송 가공 방법을 제안한 연구^[8]가 있었으나 볼엔드밀을 사용함으로써 회전축 고정제어 가공의 장점인 절삭효율 향상

Corresponding Author : hjd@kopo.ac.kr

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

효과를 극대화하지 못하였다.

본 연구에서는 임펠러의 기하학적 형상정보와 코너레디우스 평엔드밀을 활용하여 회전축 고정제어 황삭경로를 생성하고 벡터망을 이용하여 회전축 동시제어 정삭경로를 생성하는 방법을 제안함으로써 절삭효율과 가공안정성을 극대화하고 공구자세를 용이하게 제어하며 CAM 프로그램 작성 시 편의성과 실용성을 높이고자 하였다. 또한 가공시간, 가공형상 정밀도, 표면 품질의 측면에서 기존의 임펠러 CAM 전용 모듈과 비교하여 제안한 방법의 효용성을 검증하고자 한다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험방법

5축가공기의 두 개의 회전이송은 공구축벡터의 자유도를 극대화하여 공구접근성을 향상시키는 반면 이송속도를 저하시키고 강성을 저하시켜 가공 안정성을 해친다. 또한 회전이송에 의한 가공 시 불가피하게 볼엔드밀을 사용하므로 평엔드밀에 비해 피크피드 방향의 스텝오버 길이가 줄어들게 되므로 절삭효율을 저하시킨다. 따라서 본 연구에서는 황삭가공 시 코너레디우스 평엔드밀을 사용하

Table 1 Experimental condition

Item	Proposed method	Dedicated module
CAM S/W	CATIA	HyperMill
Rotating control	Fixed	Simultaneous
Tool (JJtools)	Corner radius endmill (∅6-0.5R)	Taper ball endmill (∅4-5)
Roughing		
Spindle (rpm)	5300	8000
Feed (mm/min)	2120	3200
D.O.C (mm)	1	1
Step over (mm)	3	1
CAM S/W	CATIA	HyperMill
Rotating control	Simultaneous	
Tool (JJtools)	Taper ball endmill (∅4-5)	
Finishing		
Spindle (rpm)	8000	
Feed (mm/min)	3200	
Scallop height (mm)	0.1 (Semi-finishing)	
	0.01 (Finishing)	
Machine tool : Mytrunnion-5 (Kitamura) Work piece : AL6061-T6		

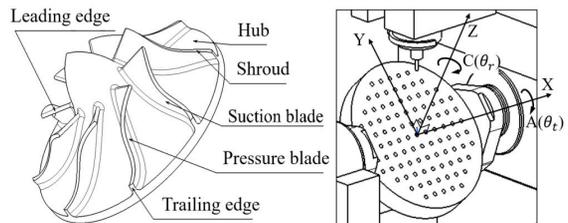
여 절삭효율을 극대화하고, 이송속도와 가공 안정성을 높이기 위한 회전축 고정제어 황삭과, 공구경로 생성의 편의성과 실용성을 높이기 위하여 벡터망을 이용한 정삭을 수행한다. 이를 위하여 기하학적 형상정보와 회전이송의 매칭, 특이점을 이용한 황삭영역 정의, 폴리곤망과 벡터망 등을 활용한다.

제안한 방법의 효용성을 검증하기 위하여 HyperMill의 임펠러 전용모듈에 의한 방법을 동시에 수행하여 가공한 후 상호 비교한다. 사용된 가공방법, 공구, 절삭조건, 5축가공기 및 소재는 Table 1에 제시한 바와 같다. 제안한 방법의 황삭에서는 회전축 고정제어가 가능하므로 코너레디우스 평엔드밀을 사용하고 기존방법은 테이퍼 볼엔드밀을 사용하였으며 공구직경은 블레이드 곡면사이에 접근할 수 있는 최대크기로 선정하였다.

2.2 임펠러 모델링 및 회전축 정의

Fig. 1의 (a)는 본 연구의 시험편(Test piece)으로 설정한 임펠러로서 AL6061-T6 재질로 ∅120×60L 사이즈이다. 그림과 같이 허브(Hub) 곡면과 쉬라우드(Shroud) 곡면 사이에 흡입 블레이드(Suction blade)와 압축 블레이드(Pressure blade)가 회전배치 되고, 유체의 유입부에 리딩에지(Leading edge), 유출부에 트레일링에지(Trailing edge)로 구성되어 있다.

Fig. 1의 (b)는 본 연구에서 사용한 5축가공기의 회전축을 정의한 개략도이다. X축을 회전중심으로 유한각도 회전하는 축을 틸팅(A)축이라 하고 Z축을 회전중심으로 무한각도 회전하는 축을 로테이션(C)축이라 정의한다. 틸팅(A)축의 회전각을 틸트각, θ_t , 로테이션(C)축의 회전각을 로테이트각, θ_r , 로 정의한다.



(a) Entity of impeller (b) Definition of the rotary axes
Fig. 1 Schematic of impeller and 5-axis machine tool

3. 공구경로 생성 및 5축가공

3.1 기하학적 형상정보를 이용한 황삭

3.1.1 기하학적 형상정보와 회전이송의 매칭을 통한 공구축벡터 설정

황삭영역을 분할하고 회전축 고정제어 직선이송 공구경로를 생성하기 위한 공구축벡터를 설정한다. 공구축벡터는 2개의 회전이송에 의해 정의되므로 틸팅과 로테이션 동작의 범위를 룰을 정하고 임펠러의 기하학적 형상정보와 매칭시킴으로써 결정할 수 있다. 먼저 틸팅에 의한 공구축벡터를 정의하기 위하여 수평면(X-Y)상의 임의 각도에서 반경방향(R) 축을 정의하고 수평면에 직각(Normal)인 Z축과 이루는 R-Z 평면상에 Fig. 2와 같이 임펠러 형상을 투영한다. R-Z 평면에 쉬라우드, 허브, 리딩에지, 트레일링에지 곡면 등을 투영하면 그림과 같이 $s_{RZ}(u)$ 와 $h_{RZ}(u)$ 의 2개 곡선이 생성된다.

u 파라미터를 등간격으로 지정하여 2개 곡선상에 생성되는 점을 연결하면 L_i 직선들이 정의된다. L_i 직선들과 Z축이 이루는 각도, θ_i 는 식 (1)과 같이 구할 수 있으며 포스트프로세싱 후에 틸트각, θ_t 가 되므로 결국 θ_i 는 틸팅에 의한 1차적인 공구축벡터 결정근거가 된다. 여기서 L_1 직선은 리딩에지 곡면을 투영한 L_0 와 평행하게 함으로써 간섭을 사전에 방지할 수 있으며 본 연구에서는 L_i 직선 중 3개를 선택하여 틸팅에 의한 1차 공구축벡터 T_1, T_2, T_3 로 정의하였다.

틸팅에 의한 1차적인 공구축벡터 정의 후 로테이션에 의한 최종 공구축벡터를 정의하기 위하여 Fig. 3과 같이 L_i 직선들을 Z축 중심으로 회전한 후 블레이드 및 쉬라우드 곡면과 트림함으로써 $st_i(u)$ 곡선들을 얻을 수 있다. 이 곡선상의 u 파라미터를 식 (2)와 같이 정의하면 P_{st_i} 점들이 얻어진다. 여기서 일반적인 임펠러에 비하여 블레이드 곡면의 경사각도 변화가 큰 경우에는 u 파라미터를 일부 조정할 필요가 있다. 식 (3)과 같이 P_{st_i} 점 벡터들과 P_i 점 벡터들을 내적함으로써 두 개의 점 벡터가 이루는 사이각 ϕ_i 를 구할 수 있으며 이 각도는 포스트프로세싱

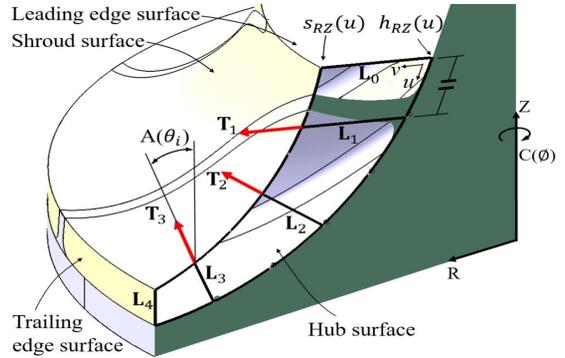


Fig. 2 Tool axis vector setting matching with tilt angle

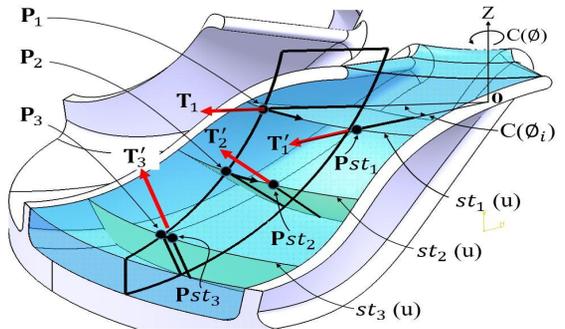


Fig. 3 Tool axis vector setting using rotate angle

후에 로테이션각, θ_r 를 결정하게 되므로 결국 회전각, ϕ_i 를 사용하여, 틸팅에 의한 1차 공구축벡터, T_i 를 식 (4)와 같이 회전 변환함으로써 로테이션에 의한 최종 공구축벡터 T'_i 를 얻을 수 있다.

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

$$P_{st_i} = st_i(u) \quad (2)$$

$$P_{st1} = st_1(0.7)$$

$$P_{st2} = st_2(0.6)$$

$$P_{st3} = st_3(0.5)$$

$$\phi_i = P_{st_i} \cdot P_i \quad (3)$$

$$T'_i = R_z(-\phi_i) T_i \quad (4)$$

3.1.2 기하학적 형상정보를 활용한 황삭영역 정의 및 공구경로 생성

공구축벡터 T'_i 에 수직인 법평면 NP_i 를 구한 후 각각의 법평면에서 Fig. 4와 같이 황삭가공 영역을 정의한다. 이 때 각각의 법평면에는 도시한 바와 같이 블레이드의 실면과 배면이 교차되는 반전점 (Reverse point), P_{ri} 가 존재하게 되며 이 특이점들을 영역분할의 기준으로 하여 경계(boundary) 정의에 활용한다. Fig. 4의 RA_i (Roughing Area)와 같이 황삭영역이 구해지면 각각의 영역에서 공구축벡터 T'_i 과 황삭영역, RA_i 의 경계선을 활용하여 회전축 고정제어 공구경로를 생성하며 Fig. 5와 같이 공구경로 및 절삭 시뮬레이션을 수행할 수 있다. Fig. 6은 비교를 위하여 전용모듈에서 작성한 회전축 동시제어 황삭경로이다.

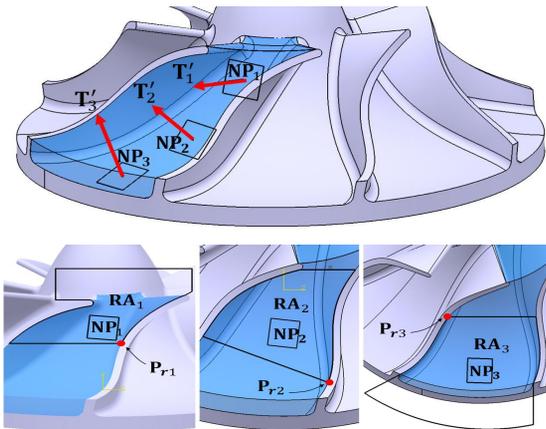


Fig. 4 Definition of roughing Area

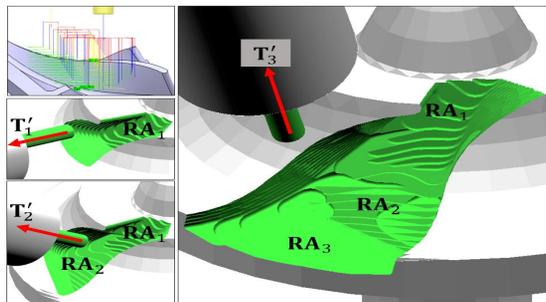


Fig. 5 Roughing tool-path generation and cutting simulation by proposed method

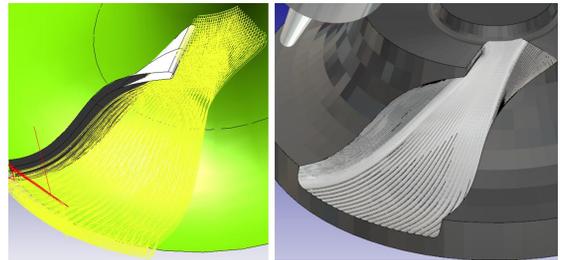


Fig. 6 Tool path generation and cutting simulation by dedicated module

3.2 벡터망을 이용한 정삭

3.2.1 벡터망을 이용한 공구축벡터 설정

황삭과 달리 중, 정삭 경로는 간섭 및 공구경로 간 단락, 표면품질 등의 문제로 인해 회전축 고정제어 가공이 불리하다. 따라서 임펠러의 기하학적 형상에 기반한 벡터망을 활용하여 공구축벡터를 설정한 후 공구자세를 연속적으로 보간하여 회전축 동시제어 가공을 수행하였다.

Fig. 7과 같이 흡입 블레이드의 쉬라우드 곡선, $s_s(u)$ 와 허브 곡선, $h_s(u)$ 를 등간격의 파라미터에 의한 점데이터로 연결하고 압축 블레이드의 쉬라우드 곡선, $s_p(u)$ 와 허브 곡선, $h_p(u)$ 또한 등간격의 파라미터에 의한 점데이터로 연결하면 V_{si} 및 V_{pi} 가 생성되며, 각 블레이드의 허브곡선상의 점데이터를 연결하면 L_{si} 및 L_{pi} 가 생성되어 이들 폴리곤망으로 구성된 폴리곤망이 형성된다.

폴리곤망의 V_{si} 및 V_{pi} 를 각각 L_{si} 및 L_{pi} 를 회전중심으로 하여 식 (5)와 같이 회피각도 α_{si} 및 α_{pi} 로 회전 변환하면 Fig. 8과 같이 T_{si} 및 T_{pi} 로 구성된 벡터망이 형성되며 이 벡터들을 공구축벡터로 활용하여 공구경로를 생성한다. 회피각도 α_{si} 및 α_{pi} 는 공구와 블레이드 곡면간의 간섭을 회피하기 위한 각도로 테이퍼 볼엔드밀을 사용할 경우 테이퍼 각도보다 크도록 하고 과도하게 털팅이나 로테이션이 되지 않는 범위로 선정한다.

$$\begin{aligned} T_{si} &= R_{L_{si}}(-\alpha_{si})V_{si} \\ T_{pi} &= R_{L_{pi}}(-\alpha_{pi})V_{pi} \end{aligned} \quad (5)$$

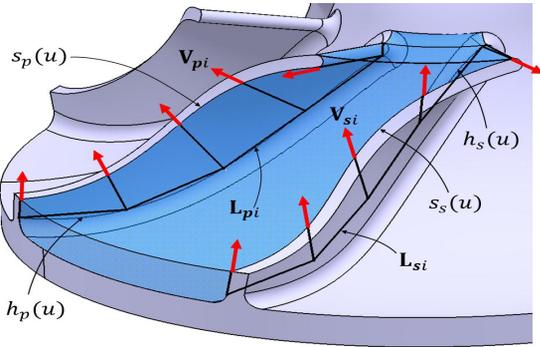


Fig. 7 Definition of polygon net

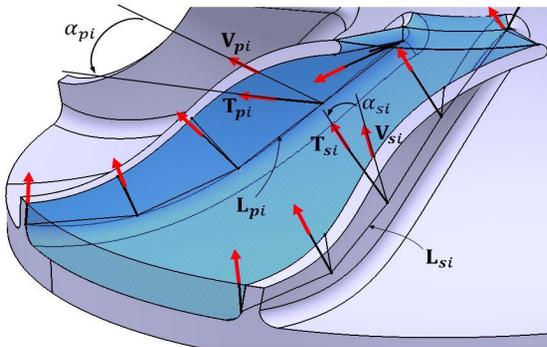


Fig. 8 Tool axis vector setting using vector net

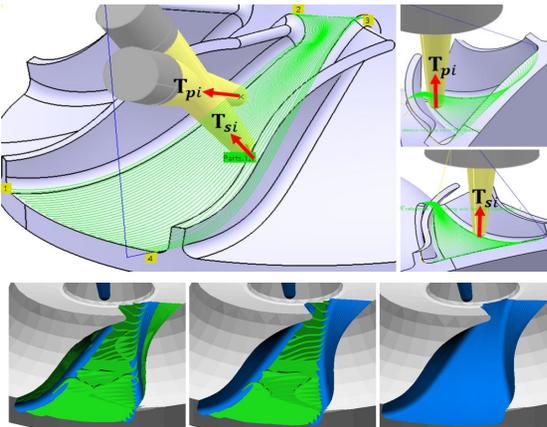


Fig. 9 Finishing tool-path generation and cutting simulation by proposed method

3.2.2 황산삭 및 중, 정삭 공구경로 생성

T_{si} 및 T_{pi} 로 구성된 공구축벡터를 사용하여

공구자세를 보간하면 Fig. 9와 같이 공구경로를 생성하고 절삭시뮬레이션을 수행할 수 있다. Fig. 9의 아래 그림은 좌측부터 황산삭, 블레이드 중삭, 허브 중삭 시뮬레이션 결과를 보여주는 것으로 코너레이디우스 평엔드밀을 사용한 회전축 고정제어 황삭의 특성상 블레이드면과 허브면의 필렛부에 일정량 이상의 중삭여유량이 발생할 수 있으므로 과도한 가공부하를 억제하기 위하여 중삭이전에 황산삭 가공을 수행하였다.

3.3 포스트프로세싱 및 시뮬레이션가공

공구경로가 생성되면 공구위치벡터와 공구축벡터로 구성된 CL데이터가 구해지며 해당 5축가공기의 메커니즘에 맞도록 포스트프로세싱을 통하여 위치좌표와 회전축값으로 구성된 NC 데이터로 변환한다. 회전축이 AC인 5축가공기의 틸트각과 로테이트각은 다음의 식 (6) 및 식 (7)과 같이 역기 구해로 부터 구할 수 있다.

$$\theta_t = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{u_i^2 + u_j^2}}{u_k} \right) \quad (6)$$

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

여기서, θ_t 는 유한회전각인 틸트각, θ_r 는 무한회전각인 로테이트각을 나타내며 u_i, u_j, u_k 는 CL 데이터 공구축벡터의 각 축 성분이다.

틸트각과 로테이트각이 구해지면 아래의 식 (8)을 이용하여 CL 데이터의 위치벡터를 NC 데이터의 위치벡터로 변환할 수 있으며 결과적으로 최종 NC 데이터는 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 화낙 컨트롤러의 G43.4와 같이 공구선단점제어(RTCP)를 지원한다면 CL 데이터의 위치벡터를 NC 데이터의 위치벡터로 그대로 사용한다.

$$P_{NC} = P_{CL} R_z(-\theta_r) R_x(-\theta_t) \quad (8)$$

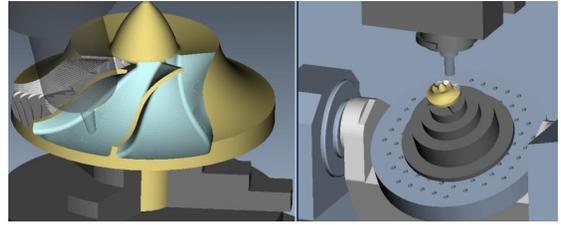
$$NC = P_{NC}, \theta_t, \theta_r \quad (9)$$

여기서 P_{NC} 은 NC 데이터의 위치벡터이고 P_{CL}

는 CL데이터의 위치벡터이다. 포스트프로세싱을 수행하여 얻은 NC데이터를 사용하여 Fig. 10과 같이 Vericut S/W에서 절삭 시뮬레이션을 수행하여 실제가공에서의 미, 과절삭과 간섭 및 장비충돌을 사전에 방지한다.

3.4 5축가공

Fig. 11의 (a)는 본 연구에서 적용한 AC 타입 5축가공기에서의 가공장면을 보여주고 (b) 및 (c)는 각각 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 황삭 및 정삭 결과이다.



(a) Stock simulation (b) Machine simulation

Fig. 10 Cutting simulation using NC data

4. 가공결과 고찰

4.1 가공시간

Table 2는 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법 각각에 대하여 가공시간을 측정된 결과로 Vericut S/W에 의한 시뮬레이션 가공과 실제 5축가공 시간을 비교하였다. 시뮬레이션 가공에 비하여 실제가공은 약 2~3배 정도 더 많은 시간이 소요되었는데 이는 공작기계의 가감속 제어 특성과 회전이송 특성에 의한 것이다. 즉, 가속 후 정속가공 구간이 짧을 뿐만 아니라 직선이송과 회전이송이 조합되면서 틸팅과 로테이션 동작에 의해 시뮬레이션 시간 보다 더 많은 시간이 소요되었다. 제안한 방법의 회전축 고정제어 황삭은 시뮬레이션에 비해 1.9배 소요된 반면 전용모듈에 의한 회전축 동시제어 황삭은 2.2배 소요되었으며, 제안한 방법의 황삭은 전용모듈에 의한 황삭에 비해 66.1% 가공시간 단축 효과를 나타내었다. 중삭 가공시간에서, 제안한 방법은 황삭 시 과도하게 남는 부분에 대한 황잔삭을 포함하므로 전용모듈에 의한 방법에 비해 37.3% 지연되었으나 황삭 소요시간에 비하여 작은 시간이며 전체 공정에 걸친 가공시간 비교 결과를 보더라도 제안한 방법은 전용모듈에 의한 방법에 비해 30.5%의 가공시간 단축효과를 보였다.

따라서 회전축 고정제어 황삭을 통하여 가감속 및 회전이송 특성에 의한 단점을 보완하고 코너레디우스 평엔드밀을 사용하여 절삭물을 향상한 결과 획기적인 가공시간 단축효과와 생산성 향상을 꾀하였다.



(a) 5-axis machining in AC type machine tool



(b) Roughing and finishing by proposed method

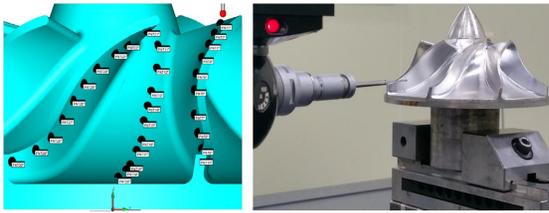


(c) Roughing and finishing by dedicated module

Fig. 11 5-axis machining and processing result

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	43.2	83	113.6	245
Semi-finishing	24.8	67	17.6	42
Finishing	44	166	51.2	168
Sum	112	316	182.4	455



(a) Measuring element (b) Measuring scene

DIM	LOC1=	LOCATION OF POINT	PNT1	UNITS=MM			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
X	25.022	0.000	0.000	25.037	0.015	0.015	----->
Y	-15.358	0.000	0.000	-15.350	0.008	0.008	----->
Z	36.337	0.000	0.000	36.304	-0.033	0.033	----->

DIM	LOC2=	LOCATION OF POINT	PNT2	UNITS=MM			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
X	23.700	0.000	0.000	23.717	0.017	0.017	----->
Y	-19.398	0.000	0.000	-19.391	0.007	0.007	----->
Z	34.464	0.000	0.000	34.440	-0.024	0.024	----->

DIM	LOC3=	LOCATION OF POINT	PNT3	UNITS=MM			
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL	
X	22.410	0.000	0.000	22.435	0.025	0.025	----->
Y	-23.293	0.000	0.000	-23.287	0.006	0.006	----->
Z	32.315	0.000	0.000	32.289	-0.026	0.026	----->

(c) Measuring result

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)	0.037	0.108
d(2)	0.030	0.089
d(3)	0.036	0.079
⋮		
d(30)	0.051	0.045
Mean	0.042	0.048

4.2 가공형상 정밀도

Fig. 12의 (a)는 3차원 측정 S/W인 PC-DMIS에 임펠러 모델링을 업로드하고 측정요소를 선정한 장면으로 흡입 블레이드, 압축 블레이드 및 허브에 각각 10개의 포인트를 지정하였다. Fig. 12의 (b)는 BROWN & SHARP사의 Global Image CMM을 사용하여 PC-DMIS에서 선정한 측정요소를 3차원측정하는 장면이다. Fig. 12의 (c)는 측정결과를 보여주는 것으로 빨간색 사각형으로 도시한 바와 같이 모델링 형상과 가공형상의 오차를 나타내는 ‘DEV’값의 각 축 성분을 사용하여 식 (10)과 같이

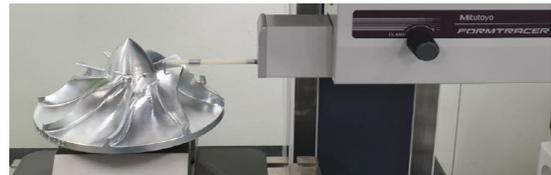
3차원 공간상의 오차를 구하였다.

제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 임펠러에 대하여 가공형상 정밀도 오차를 구한 결과 Table 3과 같이 각각 0.042mm와 0.048mm로 측정되어 두가지 방법 모두 일반적인 형상정밀도 공차인 0.05mm 이내로 평가되었다.

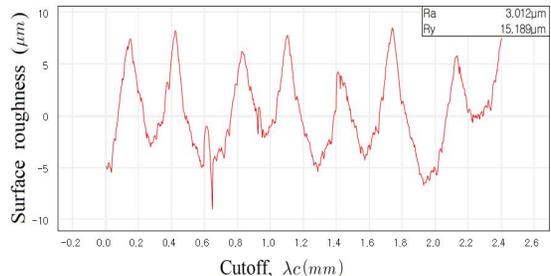
$$d(i) = \sqrt{d_x(i)^2 + d_y(i)^2 + d_z(i)^2} \quad (10)$$

4.3 표면조도

Fig. 13의 (a)는 곡면형상의 표면조도 측정이 가능한 Mitutoyo사의 FORMTRACER 표면조도 형상 측정기에서 블레이드 부의 표면조도를 측정하는 장면으로 4개소를 측정하였으며 Fig. 13의 (b)와



(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	3.012	3.884
02	4.187	2.991
03	3.216	4.019
04	3.836	3.240
Mean	3.56	3.53

같이 측정결과 그래프를 출력하였다. 제안한 방법과 전용모듈에 의한 방법으로 가공한 임펠러에 대하여 각각 표면조도를 구한 결과 Table 4와 같이 두가지 방법 모두 평균 표면조도가 $4\mu\text{m}$ 이내로 측정되어 Table 1에서 제시한 정삭 Scallop height 인 $10\mu\text{m}$ 오차 범위 이내로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 임펠러의 5축가공 시 기존의 회전축 동시제어 황삭에서 발생하는 이송속도 저하, 강성 저하에 따른 가공 불안정성 문제를 해결하고 불엔드밀에 의한 절삭효율 저하를 해결하기 위하여 기하학적 형상정보와 코너레디우스 평엔드밀을 이용한 회전축 고정제어 황삭경로를 제안하였으며 정삭경로 생성의 편의성과 실용성을 향상하기 위하여 벡터망을 이용한 공구경로를 생성하여 가공한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기하학적 형상정보를 활용하고 코너레디우스 평엔드밀을 사용한 회전축 고정제어 황삭의 경우 기존의 전용모듈에 의한 황삭에 비해 절삭효율을 극대화하고 가공안정성을 도모함으로써 획기적인 가공시간 단축 효과를 도출하였다.
2. 벡터망을 이용한 회전축 동시제어 정삭경로를 생성함으로써 CAM 작업 시 편의성과 실용성을 도모할 수 있으며 전용모듈에 의한 방법과 비교한 결과 형상정밀도 및 표면품질의 측면에서 두가지 방법 모두 요구공차 이내로 가공되었음을 검증하였다.
3. 따라서 본 연구에서 제안한 기하학적 형상정보와 벡터망을 이용한 임펠러의 5축가공 방법은 생산성 향상과 가공품질 확보에 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Fontaine, M., Devillez, A., Moufki, A. and Dudzinski, D., "Modeling of cutting forces in ball-end milling with tool-surface inclination Part II. Influence of cutting conditions, run-out, ploughing and inclination angle", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 189, No. 1-3, pp. 85-96, 2007.
2. Lim, P. and Yang, G. E., "Optimization of finish cutting condition of impeller with five-axis machine by Response Surface Method", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 31, No. 9, pp. 924-933, 2007.
3. Cho, H. D., Jung, D. I., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, E. S. and Dong, Y. G., "The development of exclusive CAD/CAM system for impeller blades formed by ruled surface II (A study on the 5-axis machining)", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineer, Vol. 11, No. 3, pp. 1-8, 2002.
4. Chen, S. L. and Wang, W. T., "Computer aided manufacturing technologies for centrifugal compressor impellers", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 115, No. 3, pp. 284-293, 2001.
5. Bohez, E. L., Senadhera, S. R., Pole, K., Duflou, J. R., & Tar, T., "A Geometric Modeling and Five-Axis Machining Algorithm for Centrifugal Impellers", Journal of Manufacturing systems, Vol. 16, No. 6, pp. 422-436, 1997.
6. 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.
7. Hwang, J. D., Oh, J. Y. and Jung, Y. G., "A Study on the Improvement of Surface Roughness of Impeller by Selection of Tool Path and Posture and Control of Feedrate", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 32, No. 12, pp. 1088-1095, 2008.
8. Jang, D. K, Lim, K. N. and Yang, G. E., "A Study on Five-Axis Roughing of Impeller with Ruled Surface", Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 24, No. 7, pp. 60-68, 2007.