

5축 Machining Center를 이용한 임펠러 가공을 위한 공구경로 생성에 관한 연구

장동규*, 조환영*, 이희관**, 공영식***, 양균의#

A Study on Tool Path Generation for Machining Impellers with 5-Axis Machining Center

Dong Kyu Jang*, Hwan Young Cho*, Hi Koan Lee**, Young Sik Kong*** and Gyun Eui Yang#

ABSTRACT

This paper proposes a tool path generation method for machining impellers with 5-axis machining center. The shape of impeller is complex, being composed of pressure surface, suction surface and leading edge, and so on. The compound surface which is made of ruled surface such as pressure surface and suction surface and leading edge such as fillet surface, makes the tool path generation much complicated. To achieve efficient roughing, cutting area is divided into two region and then tool radius of maximum size that do not cause tool interference is selected for shortening machining time. In finishing, accuracy is improved using side cutting for blade surface and point milling for leading edge.

Key Words : 5-axis NC machining (5축 NC가공), Impeller (임펠러), Ruled Surface (룰드 곡면), Tool path generation (공구 경로생성)

1. 서론

임펠러는 나선펌프의 회전부품을 이루는 것을 갖춘 차(車)이며 발전기, 터보차저, 압축기, 분사기, 송풍기, 터보엔진, 제트엔진의 핵심부품으로 이용되고 있으며 종류로는 booster, turbo-charger, fan등이 있다. 사용하는 주요재질로는 Ti6242, 17-4PH, SUS630, SUS304, Al-6061-T6등이며 고속, 고온, 고압의 환경에서 사용되고 있으며 항공산업 및 방위산업, 미래의 자동차 산업등 활용분야가 매우

넓은 제품이다^{1,2}. 이러한 임펠러는 제품의 형상 특성상 3축 가공으로는 가공하지 못하며 5축 가공으로 생산한다.

5축 가공은 5축 NC기계를 이용하여 3축 가공으로 가공이 불가능한 형상을 가공하기 위해 주로 이용된다. 이러한 5축 가공은 공구의 자세를 조절하여 가공성 및 양호한 표면조도를 얻을 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있는 반면 공작기계의 kinematic solution과 공구자세의 smoothing, 충돌문제, feedrate number결정과 최적의 공구자세를 구해야

접수일: 2003년 1월 17일; 게재승인일: 2004년 1월 9일
* 전북대학교 대학원 기계공학과
** 전북대학교 자동차 부품·금형 기술혁신센터
*** 전북지방 중소기업청
교신저자: 전북대학교 기계항공시스템공학부
E-mail geyang@moak.chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2322

하는 등 해결해야 할 문제들이 추가로 발생하게 된다. 5축 가공에 대한 연구는 기존에 많이 수행되어 왔으나 임펠러를 가공하기 위한 논문은 그리 많지 않고 또한 임펠러의 가공 논문에서도 정삭부위에 대한 연구는 많이 수행되었으나 황삭 등을 포함한 전반적인 연구는 많이 없는 실정이다.

터보기기류의 가공을 수행하기 위한 5축관련 논문을 살펴보면 크게 가공경로 산출, 공구자세 결정, 공구자세 최적화 및 공구간섭에 대하여 다루고 있다. 가공경로 산출연구는 공구에 맞는 가공경로 산출을 다루는 논문들^{3,4,5}이 있으며 공구자세 결정은 블레이드 중심선 벡터나 ruling line과 평행한 자세로 결정한 연구들이 수행되어 왔으며^{6,7,8} 공구자세 최적화에 대한 논문들은 cusp높이나 곡률을 이용한 최적자세 결정등에 대한 연구들이 수행되어 왔다^{9,10}. 공구간섭에 대한 연구들은 boundary space tree를 사용하여 국부적 검색이나C-Space를 이용한 간섭검사 방법등이 연구 되어 왔다^{11,12}.

본 연구는 임펠러 5축 가공을 수행하기 위하여 황삭가공에서 가공시간 단축의 일환으로 가공 영역을 2개의 영역으로 자동분할하고 각 영역에서 간섭이 없는 최대 크기의 공구를 선정한 후 가공경로를 산출하는 방법을 제안하고 있으며 정삭가공을 위하여 leading edge에서 point milling을, 블레이드면에서 side cutting을 이용하여 가공 경로를 생성하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 임펠러 모델링

임펠러의 형태는 pressure surface와 suction surface로 구성된 블레이드와 leading edge 그리고 hub로 구성이 되며 임펠러의 각 부위의 명칭은 Fig. 1 과 같다.

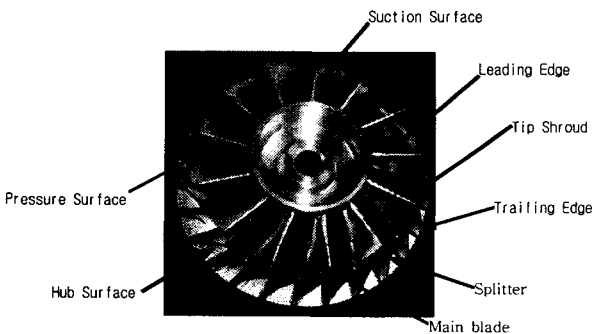


Fig. 1 Impeller part

임펠러 모델링은 2개의 hub curve, 압축비를 위해 생성된 2개의 shroud curve, 2개의 blade surface를 가지고 각각의 단면 curve를 이용하여 곡면을 생성한다. 이때, 임펠러 블레이드의 형상은 ruled surface로 모델링을 실시하였고, 회전체로 완전한 대칭을 이루며 leading edge는 유체유동을 위해 fillet surface로 모델링하였다. Fig. 2는 임펠러 모델링의 예를 보여주고 있다.

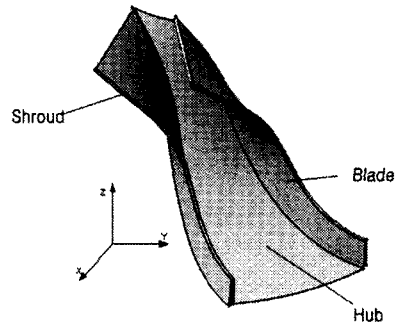


Fig. 2 Impeller modeling

3. 임펠러 가공

3.1 5축 가공 계획

본 논문의 5축 가공의 전반적인 절차가 Fig. 3에 나타나 있다.

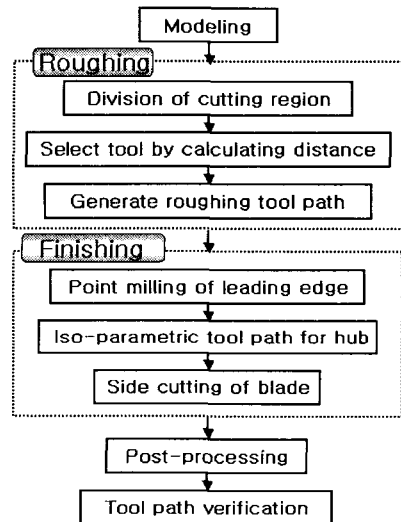


Fig. 3 5-Axis Machining procedure

주요문제는 기계에 맞는 kinematic 해석과 간섭제거에 있으며 간섭을 제거한 공구자세에서 공구의 움직임을 최소로 하거나 cusp량을 최소로 하는 공구자세의 최적화에 중점을 두고 연구를 수행하였다. 그러나, 임펠러는 유체의 유동에 관점을 주어야 하며 유체의 유동에 방해가 되지 않을 정도의 표면 거칠기를 유지하면서 가공속도를 향상시키는 것이 중요하다.

본 연구에서는 가공경로 계획으로 황삭과 정삭의 2단계로 나누어 수립하고 가공경로 생성은 가공경로 계획에 의해 생성하게 된다. 경로는 크게 CC 경로와 CL경로 생성을 한 후 간섭 검사를 수행하여 간섭이 없는 CL경로를 생성한다.

3.2 황삭가공

일반적인 임펠러 황삭가공은 황삭가공영역을 단일공구로 경로를 생성하여 가공하는 방법을 사용한다. 이러한 방법은 황삭가공의 효율성을 저하시켜 가공시간이 많이 걸리게 된다. 본 논문은 생산성 향상을 위하여 hub면과 블레이드 면이 이루는 영역의 황삭가공시 영역을 2개로 구분하여 가공을 수행한다. 영역구분은 블레이드면의 twist point를 기준으로 상단과 하단으로 자동으로 분할한다. Twist point란 ruling line의 각 변화를 기준으로 다음 ruling line이 음의 방향이 되거나 각 변화가 급격히 변화하는 부분이다. 이를 구하기 위하여 음의 방향으로 변하는 것은 토출구방향에서 본 첫 번째 ruling line vector와 다른 ruling line vector들간의 관계를 식(1)로 판별한다. 각 변화가 심하게 변화하는 부분을 찾기 위해서는 식(2)를 이용하여 각각의 ruling line vector간의 사이각을 검사하여 판별한다(Fig. 4).

1) Ruling line이 음의 방향으로 설정되는 것을 검사

$$\mathbf{r}_1(t) \cdot \mathbf{r}_i(t) > 0, \quad \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} < 0 \quad (1)$$

2) Ruling line이 급격하게 변화하는 것을 검사

$$\angle (\mathbf{r}_{i+1}(t), \mathbf{r}_i(t)) < Tol \quad (2)$$

여기서

$$\mathbf{a} : \mathbf{r}_1(t) \times \mathbf{r}_2(t), \quad \mathbf{b} : \mathbf{r}_i(t) \times \mathbf{r}_{i+1}(t)$$

$\mathbf{r}_1(t)$: 첫 번째 ruling line vector

$\mathbf{r}_i(t), \mathbf{r}_{i+1}(t)$: $i, i+1$ 번째 ruling line vector

Tol : ruling의 각 변화량 공차

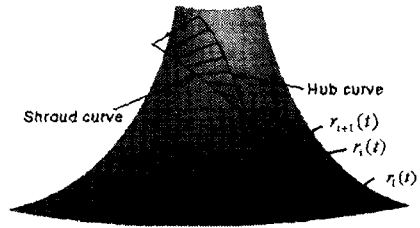
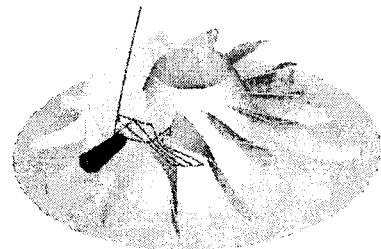


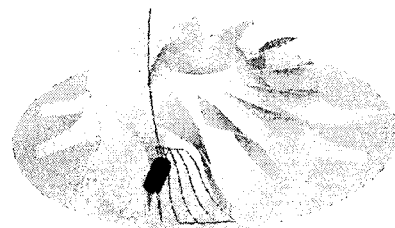
Fig. 4 Ruling line vector

위의 식을 이용하여 구한 twist point를 기점으로 영역이 자동으로 분할된다. 본 논문에서 공차는 3°로 설정하였다. 영역이 분할되면 각 영역에서 간섭을 일으키지 않는 공구를 선정하고 가공경로를 생성한다. 공구크기 선정은 구분된 영역에서 최단 블레이드 폭에서 황삭을 위한 가공여유와 간섭을 일으키지 않는 허용공차를 뺀 크기로 선정한다.

간섭을 일으키지 않는 최대직경의 공구가 선정되면 iso-parametric방식으로 가공 경로를 구하여 가공을 수행한다. 이때, 공구 축 방향 벡터는 ruled surface상의 직선과 평행하도록 하고 공구 경로상의 공구 축 방향 벡터는 간섭을 일으키지 않으며 최대한 공구 축 방향 벡터의 각 변화가 적도록 하여 구하였으며 경로간격 4mm, 절삭깊이는 3mm가 되도록 경로를 산출하였다. Fig. 5는 황삭가공 경로를 보여주고 있다.



(a) Tool path for upper region



(b) Tool path for lower region

Fig. 5 Tool path generation for roughing

3.3 공구간섭 검사

공구간섭 검사는 공구축과 롤링라인 사이의 최단 거리를 계산하여 공구반경과 값을 비교하는 검사를 수행하였다.

공구의 간섭은 공구 중심축과 롤링라인의 최단 거리 d 가 공구반경 R_T 보다 작은 경우 발생하게 되는데, Fig. 6에서처럼 공구중심축의 직선 방정식을 $T(t)$ 라 하고 블레이드의 롤링라인 방정식을 $R(u)$ 라고 하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다¹³.

$$\begin{aligned} T(t) &= \vec{R}_c + t\vec{a} \\ R(u) &= \vec{I}_n + u\vec{b} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

\vec{R}_c : 공구중심점, \vec{a} : 공구축벡터

\vec{I}_n : 롤링라인 시작점

\vec{b} : 롤링라인 벡터

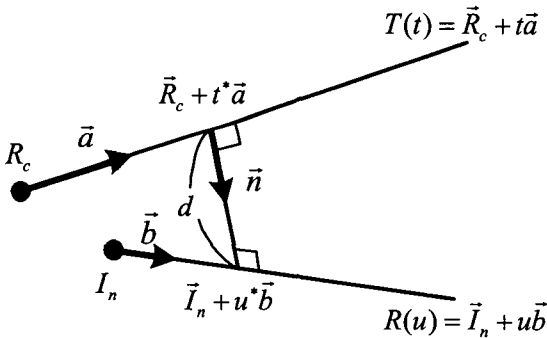


Fig. 6 The distance between two lines in space

두 선간의 최소거리를 이루는 매개변수 t, u 값과 그 거리 값을 각각 t^*, u^*, d 로 표시하면 t^*, u^*, d 는 다음의 벡터 방정식으로부터 계산된다.

$$\vec{I}_n + u^*\vec{b} = \vec{R}_c + t^*\vec{a} + d\vec{n}, \vec{n} = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} \quad (4)$$

따라서, 두 직선간의 최소거리를 결정하는 매개변수 값과 거리값 t^*, u^*, d 를 식(4)로 계산한 후 다음 조건식 (5)가 만족되는 경우이다.

$$d < R_T, 0 \leq u^* \leq 1, 0 \leq t^* \quad (5)$$

3.4 정삭가공

정삭가공의 수행은 세 부분으로 구분하여 허브면 가공, 블레이드면 가공 그리고 leading edge가공으로 나누어 고려하였다. 가공은 먼저 leading edge정삭을 수행한 후 블레이드면 가공을 수행하고 마지막에 허브면의 정삭가공을 수행한다.

3.4.1 허브면의 정삭가공

허브면의 정삭가공을 위하여 parametric가공 경로로 생성하였다. 허브면은 표면조도보다는 유체의 흐름을 고려하여 공구축 벡터는 양블레이드의 중심선 벡터와 평행하게 하여 설정하고 cusp높이가 0.01mm가 되게 경로간격을 설정하여 iso-parametric 가공경로를 산출하였다⁶. Fig. 7은 가공 경로 생성한 결과를 보여 주고 있다.

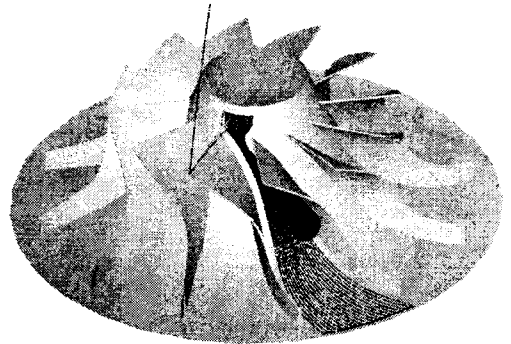


Fig. 7 Tool path for finishing in hub

3.4.2 블레이드면의 정삭가공

블레이드면의 자체의 모델링은 유체의 흐름을 고려하여 ruled surface로 모델링하게 된다. 이렇게 ruled surface로 모델링되어 있는 블레이드면의 가공은 가공 흔적을 남기지 않으며 사상작업이 필요없는 side cutting을 수행하여 가공한다. 즉, ruling line을 공구의 축벡터로 사용하여 법선방향으로 평행하게 공구자세를 잡아 공구의 측면날로 절삭을 수행하였다⁸.

Fig. 8은 블레이드면 가공 경로를 보여주고 있다.

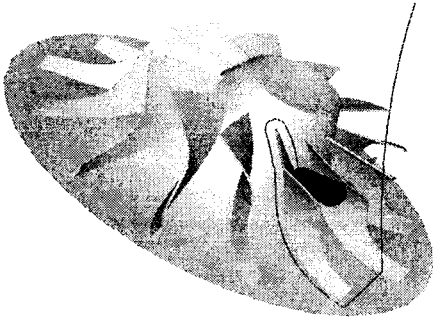


Fig. 8 Tool path for finishing in blade

3.4.3 Leading edge의 가공

Leading edge부는 두께가 얇아 가공시 파단을 일으키기 쉬우며 측면날 절삭시 가공부하로 인한 힘이 발생하게 된다. 이러한 leading edge의 가공은 측면날이 가공에 참여하지 않고 ball날끝으로 가공하는 point milling을 수행하여 파단 및 힘을 방지하게 된다. Point milling 수행시 절삭 부하를 줄이기 위하여 공구는 leading edge의 수직 방향으로 접근하여 가공하도록 하였으며 shroud에서부터 hub로 가공하도록 one-way형으로 가공 경로를 산출하였다.

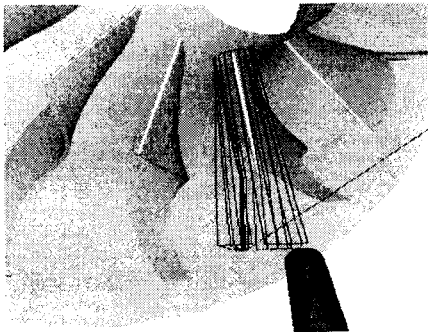
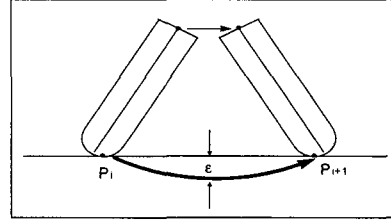


Fig. 9 Tool path for leading edge

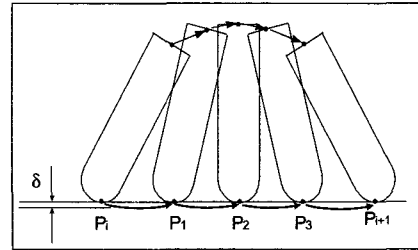
3.5 선형화(Linearization)

대부분의 5축 NC기계에서는 joint space상에서는 선형보간 기능은 가지고 있으나 Fig. 10과 같이 Cartesian space상에서 공구 끝 중심의 선형보간 기능을 제공하지 않는다. 즉, 그림 (a)와 같이 이동 및 회전이 병행되는 경우에는 회전에 의해 과절삭하게 된다. 따라서, 주어진 2개의 CC데이터를 그림

(b)와 같이 직선으로 이동하거나 각 자세의 변화가 큰 경우에는 공구 끝 중심점의 궤적이 직선에 가깝도록 여러 개의 NC데이터를 별도로 구해서 삽입해야 한다³.



(a) Overcut



(b) Insert new point

Fig. 10 Linearization

선형보간 공차 δ 가 주어졌을 경우 두 CC 데이터 사이에 삽입할 CC데이터수 N 은 근사식으로 다음의 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$N = \text{trunc} \left\{ \left[e_A \alpha / 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{\delta}{d_A} \right) + e_B \beta / 2 \cos^{-1} \left(1 - \frac{\delta}{d_B} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

여기서, trunc : 실수의 정수화

d_A, d_B : CC점에서 B축, C축의 회전중심축까지의 거리

e_A, e_B : CC점에서 B축, C축의 회전중심축 방향벡터

α, β : B축, C축의 이동량

P_i 와 P_{i+1} 사이에 삽입할 P_j^* ($j = 1, \dots, N$)은 다음 식 (7), (8)과 같이 표현된다.

$$P_j^* = P_i + (P_{i+1} - P_i) * j / (N + 1) \quad (7)$$

$$n_j^* = \text{unit} \left\{ n_i + (n_{i+1} - n_i) * \frac{j}{(N + 1)} \right\} \quad (8)$$

3.6 후처리(Post-processing)

NC가공을 위해서는 계산된 공구 경로를 기계 형태에 맞게 NC format으로 바꾸어 주어야 한다. 또한, 5축 공작기계의 pivot point가 서로 다르므로 공구축 벡터를 회전각으로 변환하는 kinematic solution이 필요로 하게 된다. 이때, 필요한 것이 기계의 구조이다. 즉, 기계의 구조에서 kinematic solution의 변환행렬을 구해야 하는 것이다.

본 연구에서 사용된 5축 기계의 구조는 Fig. 11과 같이 축벡터에서 회전각을 구하는 식은 (9)와 (10)을 이용하여 구하게 된다.

$$B = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{u_{(i)(j)x}^2 + u_{(i)(j)y}^2}}{u_{(i)(j)z}} \right) \quad (9)$$

$$C = - \tan^{-1} \left(\frac{u_{(i)(j)y}}{u_{(i)(j)x}} \right) \quad (10)$$

여기서

B, C : Y축과 Z축에 대한 공구의 기울임각

$u_{(i)(j)x}, u_{(i)(j)y}, u_{(i)(j)z}$: 공구축벡터 성분

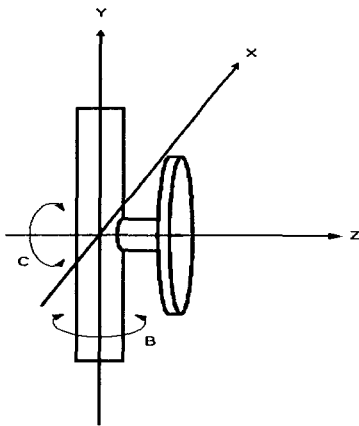


Fig. 11 Tool axis rotation direction

Fig. 12에서와 같이 좌표계가 형성이 되면 이동해야 할 좌표는 변환행렬 식 (12)와 (13)을 이용하여 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

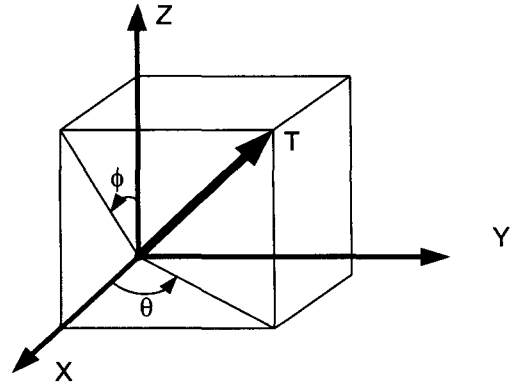


Fig. 12 Machine coordinate for calculating kinematic

$$(X, Y, Z, 1) = (P_x, P_y, P_z, 1)M(\theta)M(\phi) \quad (11)$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, θ : Z축 방향의 회전각

ϕ : Y축 방향의 회전각

4. 임펠러 가공

임펠러의 가공시 주요한 사항으로는 공작물의 셋업과 공구보정이다. 임펠러를 가공하기 위해서는 장비별 pivot point거리와 치공구 높이가 정확하게 NC program에 반영되어야 한다. 만일 동일한 값이 적용되지 않을 때는 임펠러 각각의 형상 연결부위에서 단차가 발생하게 된다.

공구보정은 블레이드와 허브면의 윤곽가공에 영향을 주는 인자이며 윤곽공차는 일반적으로 0.1mm를 사용하게 된다. 각 공정 진행시 주기적으로 공구보정을 진행하며 각 공정 첫 번째 블레이드 작업후 제품상태를 검토하여 절삭조건 및 보완사항 등을 반영해 추후 블레이드 작업을 진행해야 한다.

임펠러 가공은 먼저 소재를 선반을 이용하여 먼저 원추형으로 가공한 후 5축 가공을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 절삭조건은 table 1과 같다.

Table 1 Cutting conditions

	Region	Endmill (mm)	Feedrate (mm/min)	Spindle (RPM)	Cutting time(min)
Roughing	Lower	ball ϕ 10	1,400	3,500	65
	Upper	ball ϕ 6	1,400	3,500	62
Finishing	Leading edge	Taper ball ϕ 3	250	4,000	10
	Hub	Taper ball ϕ 3	1,000	4,000	105
	Blade	Taper ball ϕ 3	150	2,000	30

Fig. 13은 임펠러 가공 경로의 검증예를 보여주고 있으며 Fig. 14는 가공한 임펠러 가공 결과이다.

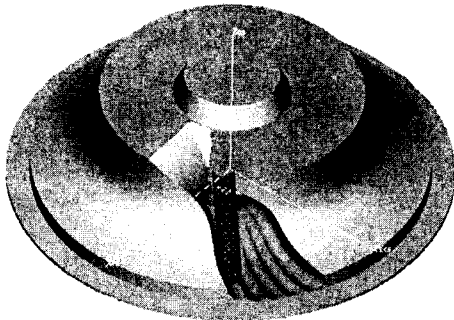


Fig. 13 Vericut simulation for roughing

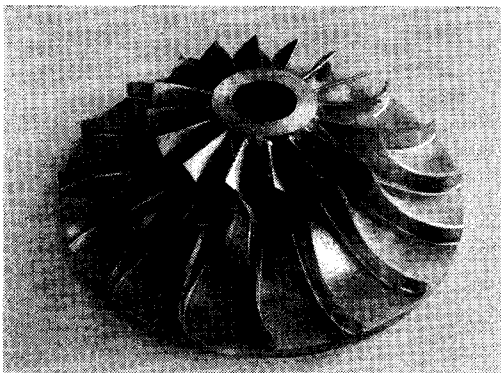


Fig. 14 Machined result

본 연구에서 사용한 방식과 기존의 단일공구에 의한 가공방식에 대한 비교결과를 table 2에 나타내고 있다. 기존의 단일 공구로 절삭하는 경우 공구직경이 6mm인 공구로 가공하여 가공시간 142분이 나왔으나 본 연구에서 제시한 방법으로 가공한 경우 황삭영역에서 직경 6mm와 10mm공구로 가공영역이 자동분할되어 가공되어 가공시간이 127분으로 절삭시간이 단축되었다.

Table 2 Compare cutting time of roughing

Method	Feedrate (mm/min)	Cutting time (min)
Conventional	1,400	142
Proposed	1,400	127

5. 결론

본 연구에서는 임펠러의 5축 가공에 대하여 연구하였으며 유체흐름을 고려한 가공 경로 계획 등을 다루었다.

5축 가공을 위하여 황삭가공 경로 생성시 가공영역을 2개로 분할하여 각 영역에서 간섭이 없는 최대 공구 반경을 선정하여 가공함으로써 가공시간의 단축 및 생산성을 향상시켰으며 공구축과 롤링라인과의 교차검사를 수행하여 간섭검사 시간을 단축하였다.

정삭가공에서 블레이드 가공을 위하여 side cutting을 사용하였으며 leading edge의 파단이나 휨을 방지하기 위하여 point milling을 수행함으로써 가공정밀도를 향상시켰다. 또한, 공구간섭 제거와 절삭 조건을 반영한 가공 경로의 검증을 미리 수행함으로써 가공오류의 제거를 시도하였다.

참고문헌

1. Jun, Y. T., Park, S. H., "Development of a CAM system for Impeller Machining," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting(I), pp. 217-220, 1994
2. Cho, H. D., Park, J. B., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, S. C., "A Study on the 5-Axis CNC Machining of Impeller," Journal of the

- Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 6, No. 4, pp. 19-26, 1997.
3. Jun, C. S., Park, S. H., Jun, Y. T., "Development of a CAM System for 5-axis NC Machining of Sculptured Surfaces," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 52-61, 1993
 4. Susan X. Li and Robert B. Jerard, "5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-end Cutter," Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 3, 1994.
 5. Jung, J. Y., "Parametric Shape Design and CNC Tool Path Generation of a Propeller Blade," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 8, pp. 46-59, 1998
 6. Jun, Y. T., Park, S. H., Yoon, J. W., "Development of a CAD/CAM System for Marine Propeller," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 9, pp. 53-61, 2000
 7. Lee, C. S., Lee, J. H., Park, S. D., "Generation of 4-axis NC Data for Single Setup of Ship's Propeller Machining," Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers, pp. 187-194, 2001.
 8. Cho, H. D., Jung, D. I., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, E. S., 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)," Journal of the KSMTE, Vol. 11, No. 3, pp. 1-7, 2002
 9. White, K. A., Hill, J. K. and Jensen, C. G., "Curvature matched machining methods versus commercial CAD method," Machining Impossible Shapes(ed. Olling, G. J. et al.), Kluwer Academic Publisher, pp. 361-365, 1999
 10. Jun, C. S., Cha, K. D., "Optimal Tool Positions in 5-axis NC Machining of Sculptured Surface," Journal of the Society of CAD/CAM engineer, Vol. 5, No. 4, pp. 393-402, 2000
 11. Morishige, K., Kase, K. and Takeuchi, Y., "Collision-free Tool Path Generation Using 2-Dimensional C-Space for 5-Axis Control Machining," The Int'l Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, No. 6, pp. 393-400, 1997
 12. Jun, C. S., Park, J. S., "Development of dedicated CAM system for turbine blades," Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Annual Meeting, pp. 181-186, 2001.
 13. Kang, J. K., "Interference-Free Tool Approach Directions in Multi-Axis NC Machining of Sculptured Surfaces," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 108-115, 1997.