

## 임펠러의 효율적인 5축 NC 가공에 관한 연구 A Study on Efficient Machining of Impeller with 5-axis NC Machine

조환영\*, 장동규(전북대학교 대학원), 이희관(전북대학교 기술혁신센터)  
공영식(전북지방 중소기업청), 양균의(전북대학교 기계항공시스템공학부)

### Abstract

An efficient method of machining impeller is presented. In the roughing process, the cutting area is divided into two regions to reduce cutting time and select cutting tools. The regions are determined by characteristic point on the geometry of impeller blade. Then, the tool of the maximum radius is selected in each area. Tool interference in cutting areas is avoided by checking the intersection between cutting tool axis and ruling line on blade surface.

**Key Words** : 5-axis machining, impeller, ruled surface, tool interference

### 제 1 장 서론

현대 산업분야 전반에서 터보기기의 역할은 중요하며, 특히 자동차, 항공기, 선박 등 고유의 기계분야에서는 터보기기의 효율에 따라 성능이 좌우되며, 관련산업을 선도할 수 있는 핵심기술에 해당한다. 따라서 고성능, 고효율의 터보기기 설계를 위한 연구와 노력이 활발히 이루어지고 있다.

이와 같은 추세에 힘입어 터보기기의 가공에 대한 연구가 진행되고 있으나, 임펠러의 경우 형상이 다양하고, 각각의 종류에 따라 가공 접근 방식이 달라지게 되므로 형상의 기하학적 정보를 이용한 가공방법이나, 곡면의 특성을 이용하여 간섭검사 시간의 소요를 줄일 수 있는 효율적인 간섭제거 방법이 개발 될 필요가 있다.

임펠러와 같은 터보기기류의 가공을 수행하기 위한 논문을 살펴보면 전차수 등[1]은 터빈 블레이드의 5축가공에서 bounding sphere tree를

이용하여 간섭영역을 국부적으로 계산하는 방법을 소개하였으며, 이철수 등[2]은 프로펠러의 형상 특징을 고려하여 가공오차를 최소화 할 수 있는 가공 경로 계획을 수립하였고, 이정재 등[3]은 비틀림이 큰 룰드곡면의 측면가공시에 공구간섭이 없이 곡면에 가장 근접하게 위치한 공구자세를 갖는 공구 경로 산출 방법에 대해 연구를 수행하였다. 강제관[4]은 볼 엔드밀을 이용한 자유곡면의 NC 가공시 공구 볼륨을 고려하여 곡면상의 임의의 점에 간섭 없이 접근할 수 있는 자세 영역의 계산에 관하여 연구를 수행하였다.

기존 연구에서는 공작기계의 기구학적 모델링, 간섭검사 및 공구 자세 설정에 관한 연구가 주류를 이루었다. 즉 지금까지의 연구는 가공을 위한 간섭제거 문제나 정삭가공시 효율적인 공구 자세의 설정에 대해서만 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 모델링을 수행하였고, 임펠러의 기하학적 정보를 사용하여 가공영역을 자동으로 분할하여 최적공구를 사용하여 가공을 행하는 효율적인 가공 경로 생성 방법을 제안하였다.

그리고 블레이드면 사이에서 발생할 수 있는 간섭을 제거하기 위하여 실린더형 공구의 중심축 벡터와 블레이드면의 룰링라인과의 거리검사를 통한 간섭제거 방법을 제안하였다.

### 제 2 장 임펠러의 모델링

본 연구에서는 임펠러 형상 모델링을 수행하게 되는데, 모델링 방법으로는 룰드곡면을 이용하여 블레이드 면을 생성하였고, sweep 곡면을 사용하여 shroud와 hub를 생성하였다.

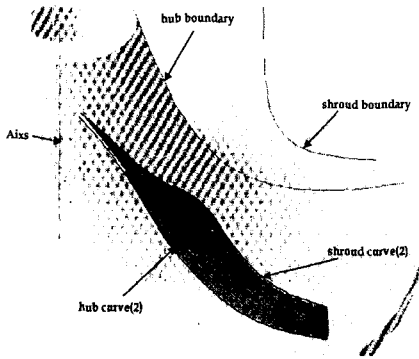


Fig. 1 Impeller modeling

모델링을 위해 필요한 hub와 shroud curve(2개씩), hub 와 shroud boundary 그리고 축을 포함한 총7개를 사용하여 hub surface, tip shroud 그리고 blade surface를 생성하였고, 중심축을 중심으로 회전시켜 회전체로서 모델링을 하였다.(Fig.1)

### 제 3 장 임펠러의 가공경로 계획

Fig.2는 임펠러의 전반적인 가공경로 계획을 보여주고 있다.

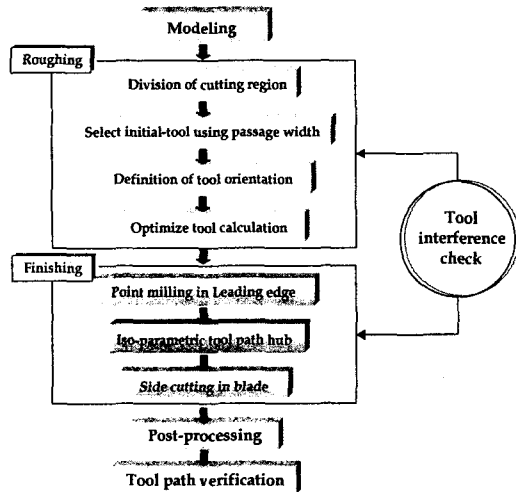


Fig. 2 Impeller Machining procedure

임펠러의 5축 가공을 수행하기 위한 가공 순서로는 크게 황삭과 정삭의 2단계로 나누어 행하게 된다. 첫 단계로 황삭은 영역의 분할, 초기공구 선택, 초기공구자세 정의, 최적공구 선정 순으

로, 두 번째 단계는 정삭으로 leading edge 정삭, hub 정삭, 블레이드 정삭순으로 제안 하였다.

### 제 4 장 황삭가공영역과 간섭제거

#### 4.1 가공 영역분할

형상 가공에 있어 기하학적 정보를 사용하여 영역을 정의함으로써 가공영역의 분할을 용이하게 한다.

본 연구에서는 hub curve와 shroud curve의 형상 변화량의 차이가 크고, 공구사용의 효율성을 높이기 위해서 shroud curve상의 특징점을 정의하여 영역을 나눌 수 있도록 하였다. 특히 Fig.3에서 보이는바와 같이 shroud curve가 hub curve에 비해 형상변화가 심하기 때문에 특징점을 정의하기에 용이하다.

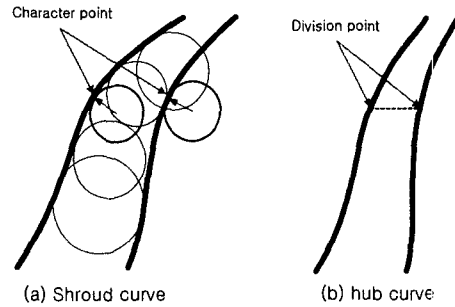


Fig. 3 Division of roughing area

Fig.3에서처럼 shroud curve에서 곡률이 가장 큰 위치를 특징점으로 정의하고, 그 때의 특징점에서의 롤링라인과 hub curve가 만나는 위치를 영역의 분기점으로 정의하고 영역을 분할한다.

이를 위해 shroud curve에서 곡률이 가장 큰 부분을 계산하여야 한다.

곡률계산을 위해, 3차원상의 임의의 곡선이 다음과 같은 방정식으로 표현된다고 가정할 때

$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1)$$

$\dot{r}(t)$ 는 곡선  $r(t)$ 의 접선벡터이고 단위접선벡터는 다음과 같을 때

$$T = \dot{r}(t) / |\dot{r}(t)| \quad (2)$$

곡선의 한점에서의 곡률은

$$\kappa = |dT/ds| \quad (3)$$

가 되고, 그때의  $t$ 는 곡선에서 법선벡터의 외적이 가장 큰 지점을 말한다. 정의된 곡률의 역수를 곡률 반경(radius of curvature)이라고 부르는데, 곡선이 부분적으로 구부러진 정도를 나타낸다.

#### 4.2 초기공구 선정 및 초기공구 자세

롤드곡면  $S$ 는 두 개의 자유곡선  $P(u), Q(u)$ 를 따라 움직이는 롤링라인으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$S(u, v) = P(u) + v(Q(u) - P(u)) \quad u, v = [0, 1] \quad (4)$$

$$S(u, v) = P(u) + vR(u)$$

일반적으로 롤링라인  $R(u)$ 와 평행하며 공구반경  $R$  만큼 움푹된 거리를 유지하면서 가공을 행하게 된다. 따라서 영역분기점에서의 롤링라인과 공구반경만큼 움푹하여 초기자세를 취하게 된다.

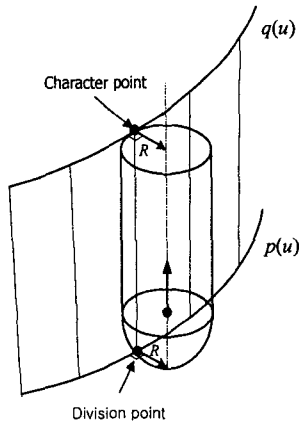


Fig. 4 Initial attitude of cutting tool

#### 4.3 간섭제거

임펠러 가공시 공구의 간섭은 특히 블레이드 면과 블레이드 면사이에서 발생하게 된다. 초기공구 자세에서의 공구 축 벡터와 롤드라인의 간섭을 검사 하므로써 간섭을 제거하였다.

공구간섭은 공구 중심축과 롤링라인과의 거리( $d$ )가 공구 반경  $R_T$  보다 작은 경우 발생하게 된다.

Fig.5에서처럼 공구중심축의 직선 방정식을  $T(t)$ 라 하고 블레이드의 롤링라인의 방정식을  $R(u)$ 라고 하면[4]

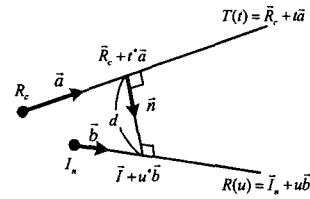


Fig. 5 The distance between two lines in space

두 직선간의 최소거리를 이루는  $d$ 는 다음의 벡터 방정식으로부터 계산된다.

$$\vec{I} + u\vec{b} = \vec{R}_c + t\vec{a} + d\vec{n}, \quad \vec{n} = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} \quad (5)$$

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

$$d < R_T, \quad 0 \leq t^* \leq 1, \quad 0 \leq u^* \quad (6)$$

하지만 공구축과 롤링라인이 아닌 공구축과 롤링라인들 사이의 면에서 간섭을 일으킬 수 있는 경우가 발생하게 된다.(Fig. 6)

롤링라인과 면의 거리검사를 위해서 면이 오목인지 볼록인지 여부를 먼저 확인하는 것이 필요하다.

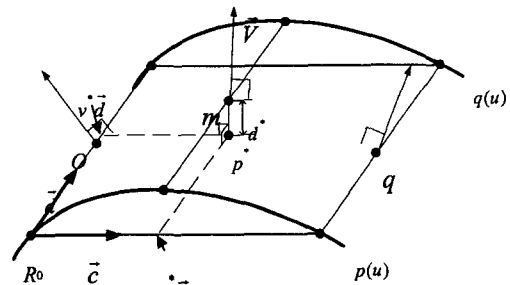


Fig. 6 The distance between ruling line and surface

볼록한 경우, Fig.6에서와 같이 먼저 공구축과의 거리가 가장 짧은 롤링라인과 그것을 기준으로 이웃하는 두 개의 롤링라인을 선택, 각각의 법선벡터를 생성하고, 법선벡터 사이의 외적을 비교하여 외적이 큰 쪽의 롤링라인을 선택하고 기준 롤드라인 사이에 중간 롤링라인을 생성한다. 또한 기준 롤링라인과 외적이 큰 쪽의 롤링라인을 지나는 평면을 생성한다. 축벡터와 중간

롤링라인 사이의 최단거리를 계산하고, 계산된 거리값이 허용오차내에 존재하면 기준 롤링라인에서의 거리값을 사용하고, 오차를 벗어나면 중간 롤링라인을 기준으로 새로운 롤링라인을 생성하고, 평면으로 근사후에 포인트와 평면과의 거리계산을 하는 계산과정을 반복한다.

거리 최소값 계산은 한 점과 평면 사이의 최단거리를 계산하면 된다. 두 개의 롤링라인을 지나는 임의 평면방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R(u,v) = R_0 + u\vec{c} + v\vec{d} \quad u,v \in [0,1] \quad (8)$$

두 요소간의 최소를 이루기 위한 평면에서의 매개 변수  $u, v$  값과 그 거리 값을 각각  $u^*, v^*$  는 다음의 벡터 방정식으로부터 계산된다.

$$p^* = \vec{R}_0 + u^*\vec{c} + v^*\vec{d} \quad \vec{V} = \frac{\vec{c} \times \vec{d}}{|\vec{c} \times \vec{d}|} \quad (9)$$

여기서  $\vec{V}$  는 평면의 법선벡터이며,  $\vec{c}, \vec{d}$  에 각각 수직이다.

따라서 점  $m$  과 평면과의 최소거리는 다음과 같이 계산된다.

$$d^* = |p^* - m| \quad (10)$$

단,  $P^*$  는  $(P^* - m) \times \vec{V} = 0$  를 만족하여야 한다.

이와 같이 계산된 최소거리 값  $d^*$  가 허용오차  $\delta$  이내의 값인지를 판단하여 식(11)을 만족하면 간섭검사를 수행한다.

$$d^* < \delta \quad (11)$$

## 제 5 장 황삭가공

### 5.1 최적 공구크기 계산

본 논문에서는 가공 효율 측면에서 공구크기의 최대화에 초점을 맞추는 공구크기를 선정하도록 하였다. 공구크기는 간섭을 일으키진 않는 범위 내에서 영역분기점에서 최대 크기가 되도록 하였다.

$$R' = R - \alpha - \beta \quad (12)$$

$R'$  : 실제 사용 공구크기

$\alpha$  : 미절삭 여유(=황삭여유)

$\beta$  : 간섭량

### 5.2 황삭 가공경로 생성

본 연구에서는 중삭을 거치지 않고 곧바로 정삭을 하기 때문에 기존 황삭의 가공여유보다는 정삭을 고려한 가공여유에 가깝도록 여유치를 설정하였다.

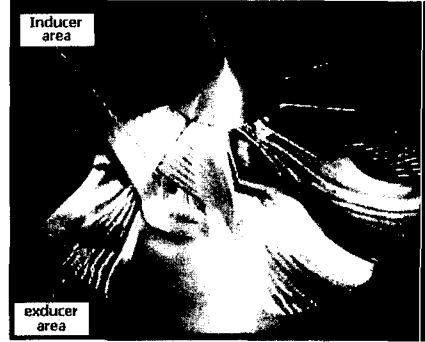


Fig. 7 Tool path for roughing

공구의 효율적인 사용을 위해 전체 영역을 두 부분으로 나누어 가공경로를 생성한다. 또한 불필요한 공구 air-cut양을 줄이기 위해 지그재그(Zig-Zag)방식을 사용하였다.

가공 순서는 exducer 부분을 먼저 가공하고, inducer 부분을 가공하는 순서로 행하였다.(Fig.7)

## 제 6 장 정삭

### 6.1 Leading edge의 가공

Leading edge는 길이가 길고 날개의 두께가 얇은 부분이므로, 임펠러축 방향으로 point milling 방식으로 사용함으로써 leading edge 부분의 변형(deflection) 및 체터(chatter)등으로 인한 가공 정밀도의 저하를 방지하였다. 가공경로의 방식에 있어 edge의 선단을 기준으로 좌측은 shroud에서 hub로 우측은 hub에서 shroud 방향으로 One-way 방식을 사용하였다.

### 6.2 Hub surface 가공

Hub의 정삭에서는 유체의 흐름을 원활하게 할 수 있도록 하기 위하여 유선방향으로 공구 경로를 생성하였다. hub curve 사이에 일정한 등-매개변수 곡선(iso-parametric curve)을 따라 생성하였다.

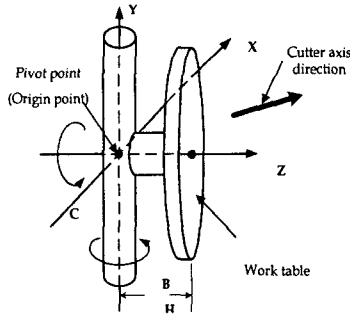
### 6.3 Blade surface 가공

공구의 측면 날을 사용하여 blade 면을 따라가는 side cutting 방식을 사용하였다. 피삭재가 공구의 진행방향 우측에 위치하도록 진행방향을 좌측 trailing edge부분에서 시작하여 leading edge를 거쳐 우측 trailing edge에서 끝나도록 경로를 생성하였다. 즉 다운밀링 방법을 사용하였다. 이 방법의 사용은 블레이드의 떨림이 적어 over-cut이나 un-cut 양을 줄일 수 있다.

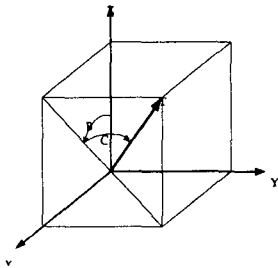
## 제 7 장 후처리 및 실제 가공

### 7.1 후처리(Post-processing)

NC가공을 위해서는 계산된 공구 경로를 기계 형태에 맞게 NC 형태로 바꾸어 주어야 한다. 또한, 5축 공작기계의 pivot point가 서로 다르므로 공구축 벡터를 회전각으로 변환하는 kinematic solution이 필요로 하게 된다.



(a) Tool axis direction and worktable movement



(b) The relation of the tool axis direction vector and B&C

Fig. 8 Machine coordinate for calculating the kinematic solution

본 연구에서는 Mitsuiiseiki HU50A 5축 기계가 사용되었다. 식(13)에 의해 부가축 좌표값이 계산되고, Y축에 대한 회전을  $\theta$ , Z축에 대한 회전을  $\phi$ 라고 하면  $\theta$ 와  $\phi$ 는 식(14)로 표현된다. 초기 공구 좌표계는 회전에 의한 좌표변환을 적용하여 식(15)와 같이 된다. ( $P_x, P_y, P_z$ )는 공구 위치 좌표 값이며 ( $X, Y, Z$ )는 인덱스 테이블의 회전 운동이 이루어진 후에 새로운 좌표 값이다.

$$B = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{T_{(\partial)\partial x}^2 + T_{(\partial)\partial y}^2}}{T_{(\partial)\partial z}} \right) \quad (13)$$

$$C = -\tan^{-1} \left( \frac{T_{(\partial)\partial y}}{T_{(\partial)\partial x}} \right)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{T_{(\partial)\partial x}^2 + T_{(\partial)\partial y}^2}}{T_{(\partial)\partial z}} \right) \quad (14)$$

$$\phi = -\tan^{-1} \left( \frac{T_{(\partial)\partial y}}{T_{(\partial)\partial x}} \right)$$

$$(X, Y, Z, 1) = (P_x, P_y, P_z, 1)M(\theta)M(\phi) \quad (15)$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

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

### 7.2 실제가공 및 검증

본 연구에서는 가공 시뮬레이션 프로그램인 VERICUT을 이용하여 가공경로를 검증하였다.(Fig 9)



Fig. 9 Machining simulation

## 제 8 장 결론 및 추후 연구

임펠러 가공은 먼저 소재를 선반을 이용하여 shroud boundary형상으로 가공한 후 5축 가공을 수행하였다. 소재의 재질은 내식성이 뛰어난 계열인 알루미늄(AL6061-T6)이고, 직경은 94mm. 높이는 38.94mm이다. 날개의 개수는 10개이고, 회전각도는 36°이다.

Table 1은 실제가공에서 절삭조건을, Table 2는 황삭가공시 공구를 1개 사용할 때와 2개 사용할 때의 절삭시간의 비교를 보여주고 있다.

Table.1 Cutting conditions

	Region	End mill (mm)	Feedrate (mm/min)	Spindle (rev/min)	cutting time(min)
Roughing	Exducer	ball $\phi$ 10	1,500	3,000	62
	Inducer	ball $\phi$ 6	1,500	3,000	59
Finishing	Leading edge	Taper ball $\phi$ 3	250	4,000	10
	Hub	Taper ball $\phi$ 3	1,000	4,000	105
	Blade	Taper ball $\phi$ 3	150	2,000	30

Table. 2 Cutting time of Roughing

Number of Tool	End mill	Feedrate (mm/min)	cutting time (hr)
1	ball $\phi$ 6	1,500	2.2
2	ball $\phi$ 6,10	1,500	2

Fig. 10은 실제 가공된 임펠러의 그림을 보여주고 있다.

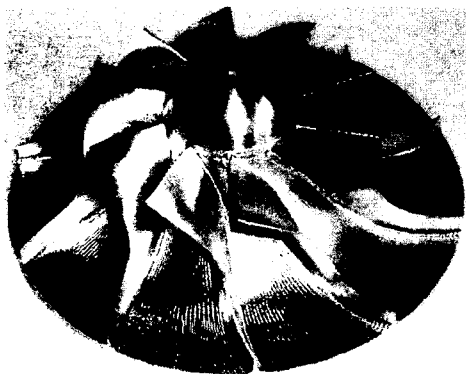


Fig. 10 Machined product

본 연구에서는 효율적인 5축 NC 가공을 위해 기하학적 정보를 사용한 영역분할 방법을 사용해서 황삭가공경로를 생성할 수 있도록 하였다. 이 방식은 단일공구를 사용한 방식에 비해 절삭시간을 절감할 수 있었고, 사용자 의도에 의한 임의의 영역분할방식에 비해서는 형상정보를 사용함으로써 분할을 자동으로 행할 수 있었다.

또한 간섭제거 방법에 있어 공구축과 롤링라인 사이의 최단 거리로서 간섭 검사를 행하여 기존 방식에 비해 비교 데이터양과 간섭검사 시간을 줄일 수 있도록 하였다.

추후연구로는 내경과 외경이 클 경우 임펠러의 통로 폭 변화가 다양하게 변화하므로 영역을 좀더 세분화할 수 있도록 하여야 한다. 또한 임펠러 황삭가공에 있어 볼 엔드밀이 아닌 다른 공구에 대한 간섭검사 방법에 대한 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- [1] 전차수, 박재성, "터빈블레이드 가공을 위한 전용 CAM 시스템 개발", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 181-186, 2001
- [2] 이철수, 이재현, 박성도 "선박용 소형 프로펠러 단일 셋업을 위한 4축 NC 데이터 생성에 관한 연구", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 187-194, 2001
- [3] 이정재, 서석환, 김성구, 김형우, "부가 5축 머신을 이용한 볼드곡면의 측면가공 : 실험 및 분석", 한국 CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 112-117, 1997
- [4] 강재관, "자유 곡면의 다축 NC 가공시 간섭 없는 공구 접근 자세 영역", 한국정밀공학회지 제14권 제7호, pp. 108-115, 1997
- [5] 강지훈, 서석환, 이정재, "저축 CNC 환경에서의 황삭가공", 한국CAD/CAM 학회논문지 제2권 제1호, pp19-27, 1997
- [6] 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, "CAD/CAM 시스템과 CNC절삭가공", 청문각, 1995.
- [7] "CAD/CAM 형상모델링에서 NC가공까지", 이철수 저, 터보테크 출판부, 1996. 11.