

## 임펠러의 효율적인 5축 NC 황삭가공에 관한 연구

조환영\*·장동규\*·이희관\*\*·양균의†  
(2003년 3월 27일 접수, 2003년 9월 9일 심사완료)

### A Study on Efficient Roughing of Impeller with 5-Axis NC Machine

Hwan-young Cho, Dong-Kyu Jang, Hi-Koan Lee and Gyun-Eui Yang

**Key Words** : Turbomachinery(터보기기), Impeller(임펠러), Ruled Surface(룰드곡면), Interference Check(간섭검사), Roughing(황삭)

#### Abstract

This paper proposes a roughing path generation method for machining impeller with 5-axis machining center. Traditional researches are focus on finishing for machining impeller. To achieve efficient machining, roughing method must be studied. The proposed method consists two steps : One is to select optimal tool size and tool attitude by dividing cutting area into two regions to reduce cutting time. The regions are automatically divided by character point on the geometry of impeller blade. After dividing, the tool of the optimal size is selected for each divided region. The other is avoidance of tool interference. Tool interference in cutting areas is avoided by checking the distance between tool axis vector and ruling line on blade surface or approximated plan between ruling line. Using this method, the cutting time is reduced efficiently.

#### 1. 서론

에너지 사용의 효율을 향상시키기 위해 개발된 터보기기는 자동차, 항공기, 선박 등 고유의 기계 분야에 널리 활용되고 있을 뿐만 아니라 제트엔진이나 발사체 등의 방산분야의 핵심부품으로 이용되고 있다. 따라서 고성능, 고효율의 터보기기 설계를 위한 연구와 노력이 활발히 이루어지고 있고, 그 수요 또한 증가하고 있다.

이러한 추세에 맞춰 터보기기의 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 관련 연구를 살펴보면 Lee 등<sup>(1)</sup>은 터빈 블레이드의 5축 가공 시 heel angle을 조정하여 NC가공데이터를 생성

하는 연구를 수행하였다. Jun 등<sup>(2)</sup>은 터빈 블레이드의 5축 가공에서 bounding sphere tree를 이용한 신속한 간섭검사 방법을 소개하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 프로펠러의 형상 특징을 고려하여 킬링가이드 곡선에 의한 공구축 결정방법을 제안하였고, Cho 등<sup>(4)</sup>은 ruled surface로 형성된 임펠러 블레이드의 가공을 위하여 룰드면상의 직선벡터와 평행한 벡터로 공구축 벡터를 설정하고, 공구경로상의 공구 축 벡터는 양 블레이드의 공구 축 벡터를 선형화 한 연구를 발표하였다.

또한 터보기기와 같이 복잡한 형상에 대한 가공시에는 공구의 간섭 및 충돌의 방지, 간섭이 없는 공구축 방향 벡터의 결정, 사용공구의 최적 선택에 대한 고려가 필요하다.<sup>(5-8)</sup>

그러나, 이와 같은 연구들은 주로 정삭가공에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다. 임펠러는 형상이 복잡하고 다양하며 각각의 형상에 따라 가공접근 방식이 달라지므로 이에 맞는 연구가 필요하며 생산성 향상을 위한 효율적인 가공방법에 대한

† 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail : Geyang@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2322 FAX : (063)270-2315

\* 전북대학교 대학원

\*\* 전북대학교 자동차부품·부품금형 기술혁신센터

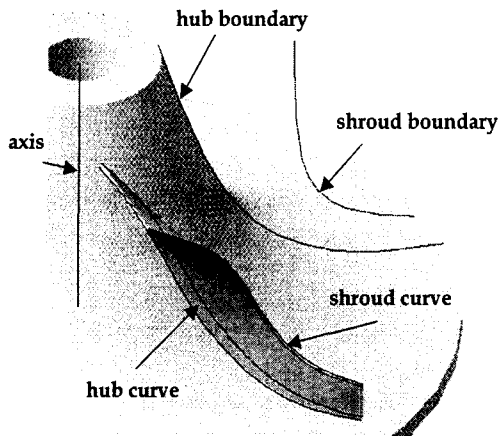


Fig. 1 Impeller modeling

연구가 현장에서 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 임펠러 가공경로 생성시 형상의 기하학적 정보를 사용하여 황삭가공영역을 자동으로 분할하고, 최적공구를 사용하여 가공을 수행함으로써 생산시간을 줄이는 효율적인 황삭 공구경로 생성 방법을 제안하였다. 또한 간섭검사 시간의 단축을 위하여 공구축 벡터와 롤링라인의 거리검사를 통한 간섭제거 방법을 제안하였다.

2. 임펠러의 형상 모델링

유체역학적 곡면은 유체의 흐름과 관련되기 때문에 곡면이 전체적으로 방향성을 갖는다.

일반적으로 임펠러는 유체의 압축비를 크게 할 수 있도록 CFD(Computational Fluid Dynamics) 및 압축률, 회전수 등의 조건으로부터 최적의 형상을 갖도록 설계된다.

임펠러는 hub surface, 블레이드 면(pressure surface, suction surface), tip shroud, leading edge, trailing edge로 구성된다. 모델링에 필요한 요소로 hub와 shroud curve, hub 와 shroud boundary 그리고 중심축이 있다.

블레이드면은 롤드면으로 생성하였고, sweep 곡면으로 tip shroud와 hub surface를 생성하였으며, 중심축을 중심으로 회전시켜 회전체로서 Fig. 1과 같이 모델링을 수행하였다.

3. 임펠러의 가공경로 계획

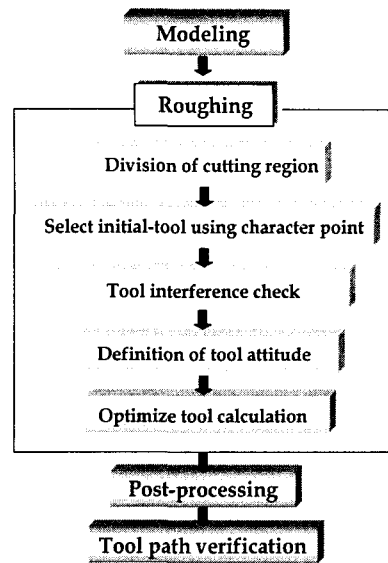


Fig. 2 Machining procedure

Fig. 2는 본 연구의 전반적인 가공경로 계획을 보여주고 있다.

임펠러의 5축 황삭가공을 수행하기 위한 가공 순서로는 영역의 분할, 초기공구 선택, 공구간섭 제거, 초기공구자세 정의, 최적공구 선정 순으로 제안하였다. 다음으로 포스트 프로세싱을 수행하였고 마지막으로 공구경로를 검증하였다.

3.1 황삭가공

본 연구에서 임펠러 황삭가공시 고려한 사항들은 다음과 같다.

첫째, 블레이드 사이의 가공에서 전체를 단일 공구로 사용해서 가공하는 것보다는, 공구사용의 효율 및 가공시간 단축을 위하여 형상특징에 맞는 최적공구를 사용하여 가공경로를 생성하는 것이 효과적이다.

둘째, blade의 개수가 많아질수록 황삭가공에서 소요되는 시간이 길어지게 된다. 즉, 공구의 불필요한 움직임이 많아지게 된다. 따라서, 공구의 air-cut을 줄여줄 수 있는 방법이 필요하다.

마지막으로 통로폭에 맞는 최대한 큰 공구를 사용함에 있어 초기 공구자세에서 간섭이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위한 공구와 블레이드면 사이의 간섭제거를 위한 방법이 요구된다.

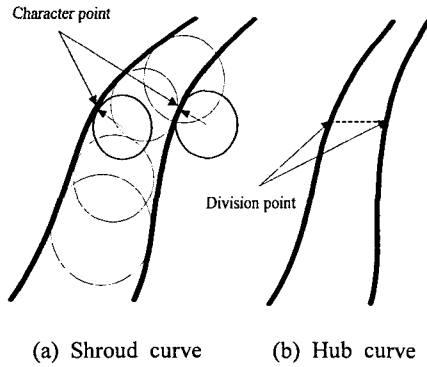


Fig. 3 Division of roughing area

위와 같은 사항들을 고려하여 다음과 같이 황삭가공을 수행하였다.

3.1.1 가공 영역분할

형상가공에 있어 기하학적 정보를 사용하여 영역을 정의함으로써 효율적이고 체계적인 가공을 수행할 수 있다. 또한 아주 복잡한 형상을 황삭가공 할 경우 가공영역을 다분할 하여 적합한 공구를 사용함으로써 가공시간을 절감할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 임펠러 날개의 형상 변화량이 큰 경우 공구사용의 효율성을 높이기 위해서 shroud curve상의 특징점을 정의하여 영역을 나눌 수 있도록 하였다. Fig. 3에서처럼 shroud curve상에서 곡률이 가장 큰 지점을 특징점(Character point)으로 정의하고, 그 때의 특징점에서의 롤링라인과 hub curve가 만나는 위치를 가공영역의 분기점(Division point)으로 정의하여 이를 기준으로 영역을 분할하였다.

먼저 특징점의 정의를 위해 shroud curve에서 곡률이 가장 큰 부분을 계산해야 한다.

곡률계산을 위해서, 3차원상의 B-spline 곡선의 방정식  $R(u)$ 가 다음과 같을 때<sup>(10)</sup>

$$R(u) = \sum_{i=0}^n Q_i N_{i,k}(u) \tag{1}$$

$Q_i$  : 조정점,  $N_{i,k}(u)$  : B-Spline의 블렌딩 함수

위 식을 매개변수  $u$ 로 미분하면 곡선의 접선 벡터가 얻어진다. 즉,

$$\dot{R}(u) = dR(u)/du \tag{2}$$

가 정의되고, 이 곡선에 대한 단위 접선벡터는

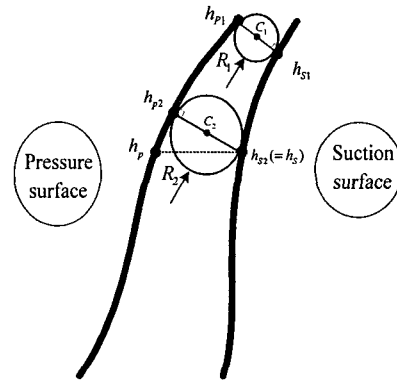


Fig. 4 Calculate optimal tool radius

$$T = \dot{R}(u) / |\dot{R}(u)| \tag{3}$$

로 표시되며 곡선의 길이는 다음과 같이 정의된다.

$$S(u) = \int_0^u |\dot{R}(u)| du \tag{4}$$

식 (3)으로 정의된 단위접선벡터를 식 (4)로 정의된 곡선의 길이로 미분하면 단위접선벡터의 변화율이 얻어지는데 이 값의 크기를 곡률이라 한다. 따라서 곡선의 한 점에서의 곡률은 식 (5)와 같다.

$$\kappa = |dT/du| \tag{5}$$

3.1.2 초기 공구크기의 정의

황삭 가공은 절삭량이 많은 작업으로서, 공구 크기에 따라 전체 가공시간의 차이가 크게 된다. 또한 비정밀 가공이기 때문에 가공정밀도 보다는 가공 효율, 즉 가공 시간과 가공비용을 먼저 고려하여야 한다.

본 논문에서는 가공 효율 측면에서 공구크기의 최대화에 초점을 맞추어 각 영역의 최소 통로폭에서 최대 크기를 갖도록 초기 공구크기를 계산하였다.

임펠러에서 유체가 유입되는 부분을 흡입영역(Inducer area)이라 하고, 방출되는 부분을 토출영역(Exducer area)이라 정의 할 때, Fig. 4에서처럼 흡입영역의 최소 통로폭은 hub curve의 끝점  $h_{p1}$ 에서  $h_{s1}$ 에 수선을 내렸을 때의 수선의 길이이고

흡입영역의 최대공구크기가  $R_1$ 이 된다. 또한 토출영역의 최대공구크기의 정의를 위해 최소 통과폭은 분기점  $h_{\infty}$ 에서  $h_{F2}$ 에 수선을 내렸을 때이고 그 수선의 길이가 토출영역의 최대공구크기  $R_2$ 로 정의 될 수 있다. 왜냐하면 영역경계의 통과 폭으로 공구크기를 정의 할 경우 공구의 실루엣이 양방향의 hub curve와 중첩이 발생하여 간섭을 일으키게 되기 때문이다.

3.2 간섭제거

임펠러 황삭가공에서 최대공구크기 사용에 따른 간섭은 분할된 영역 내에서 날개 사이의 통과폭이 가장 작은 부분 즉, Leading edge 부분과 영역의 분기점 부분에서 발생하기 쉽다. 따라서 통과폭이 가장 작은 부분에서의 공구 자세를 정의할 때 공구와 롤드면 사이의 간섭검사를 수행하여 공구간섭을 제거할 수 있다.

3.2.1 공구자세의 정의

공구의 간섭검사를 수행하기 위해서는 간섭검사 영역을 고려한 자세가 정의되어야 한다.

본 연구에서는 공구자세를 결정하기 위해서 롤링라인의 읍셋을 사용하였다.

롤드곡면 S는 두 개의 자유곡선  $P(u), Q(u)$ 를 따라 움직이는 롤링라인으로 식 (6)과 같이 정의될 수 있다.

$$S(u, v) = P(u) + v(Q(u) - P(u)) \tag{6}$$

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

여기서,  $u, v = [0, 1]$

일반적으로 롤링라인 R(u)와 평행하며 공구반경  $R_T$  만큼 읍셋된 거리를 유지하면서 가공을 행하게 된다. 즉, 영역분기점에서의 롤링라인과 공구반경만큼 읍셋하여 Fig. 5와 같이 공구자세를 취하게 된다.

3.2.2 공구와 롤드면의 간섭

본 연구에서는 공구와 롤드면의 간섭검사를 위해서 공구 중심축과 롤링라인 사이의 거리를 계산하였고, 롤링라인 사이의 롤드면에서 발생 가능한 간섭을 고려하기 위해서 롤드면을 평면으로

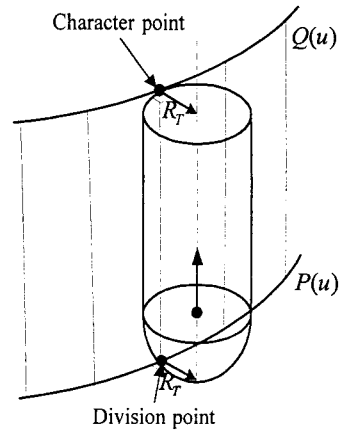


Fig. 5 Attitude of cutting tool

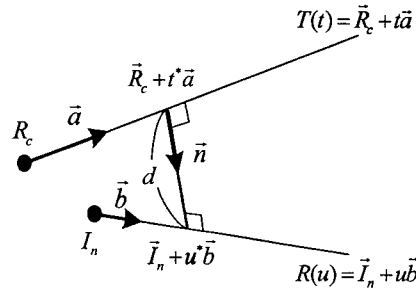


Fig. 6 The distance between two lines in space

근사화하여 허용오차를 이용한 간섭검사 방법을 사용하였다.

3.2.2.1 공구축과 롤링라인의 간섭

공구축과 롤링라인 사이의 최단 거리를 계산하여 공구반경과 값을 비교하여 간섭검사를 다음과 같이 수행하였다.

공구의 간섭은 공구 중심축과 롤링라인의 최단 거리d가 공구 반경  $R_T$  보다 작은 경우 발생하게 되는데, Fig. 6에서처럼 공구중심축의 직선 방정식을 T(t)라 하고 블레이드의 롤링라인 방정식을 R(u)라고 하면<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned} T(t) &= \vec{R}_c + t\vec{a} \\ R(u) &= \vec{I}_n + u\vec{b} \end{aligned} \tag{7}$$

여기서  $\vec{R}_c$ : 공구중심점,  $\vec{a}$ : 공구축벡터  
 $\vec{I}_n$ : 롤링라인 시작점,  $\vec{b}$ : 롤링라인 벡터

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.

$$\vec{I}_n + u^*\vec{b} = \vec{R}_c + t^*\vec{a} + d\vec{n}, \vec{n} = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a} \times \vec{b}|} \quad (8)$$

따라서 두 직선간의 최소거리를 결정하는 매개변수 값과 거리값  $t^*, u^*, d$  를 식 (8)로 계산한 후 다음 조건식이 만족되는 경우이다.

$$d < R_T, 0 \leq t^* \leq 1, 0 \leq u^*$$

### 3.2.2.2 공구축과 롤드면의 간섭

본 연구에서는 분석의 용이함을 위하여 롤링라인 사이의 롤드면에서 발생하는 간섭검사를 위해 평면근사를 사용하였다. 평면의 사용은 근사모형이라는 단점이 있으나 허용오차 내에서 근사모형을 얻을 경우 곡면을 이용하는 것보다 문제의 분석과 계산이 훨씬 용이해진다.

공구축과 롤드면에서 간섭을 수행하기 위해서 롤드면이 볼록한 경우만을 고려하였고, 롤링라인 사이의 롤드면을 평면으로 근사화하여 롤링라인과 평면의 사이의 허용오차를 계산하였다. 그 이유는 공구축과의 최단거리가 되는 롤링라인과 같은 평면상에 존재한다면 근사화가 가능한 롤드면도 최단거리 롤링라인과의 거리가 같다고 할 수 있기 때문이다.

본 연구의 간섭검사 절차는 다음과 같다.

1. Fig. 7에서 처럼 공구축과 최단 거리에 있는 롤링라인과 이웃하는 롤링라인을 선택하고 각각에 법선벡터를 생성한다.

여기서,  $b, o, e$ 는 각 롤링라인에서 공구축과 최단거리가 되는 위치.

2. 각각의 롤링라인 사이의 외적을 비교하여 값이 큰 쪽 선택하고 Fig. 8과 같이 두 개의 롤링라인을 통과하는 평면을 생성하여 평면으로 근사화한다.

3. 롤드면에 중간롤링라인을 삽입하고 평면과의 거리검사를 실시한다.

4. 계산된 거리값이 허용오차내에 들어오면 평면과 공구축과의 간섭검사를 수행한다.

5. 반대의 경우, 다시 법선벡터를 생성함과 동시에 외적값을 비교하여 큰 쪽을 평면으로 근사화하고, 새로운 중간롤링라인을 생성하고 평면과의 거리계산을 수행하고 계산값이 허용오차내에 존재할 때까지 과정을 반복한다.

롤링라인과 평면 사이의 최단거리 계산은 한 점과 평면 사이의 최단거리를 계산하면 된다. 이웃하는 두 개의 롤링라인을 지나는 임의 평면 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

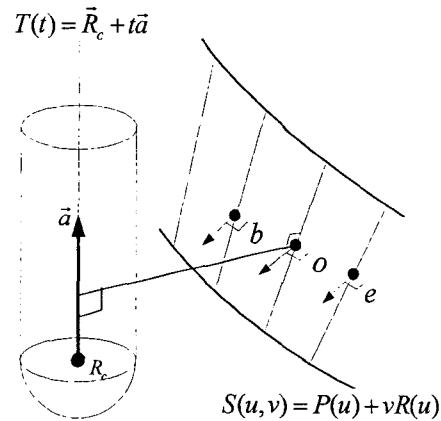


Fig. 7 Interference between tool axis and ruled surface

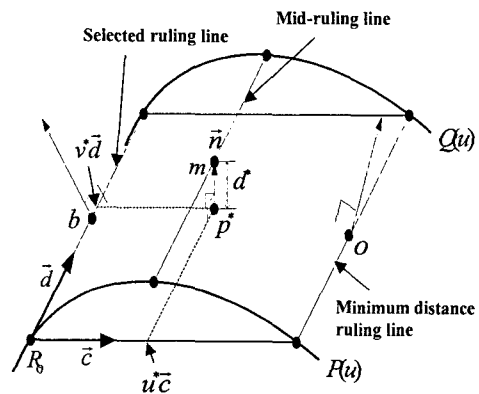


Fig. 8 The distance between ruling line and plane

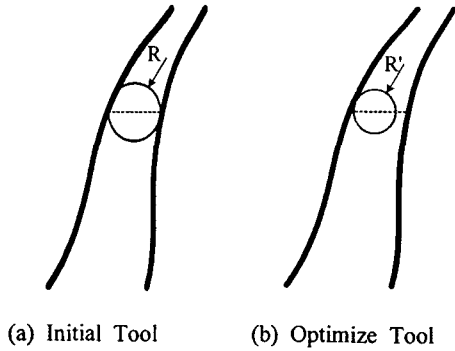


Fig. 9 Calculate optimal tool radius

$$R(u, v) = R_0 + u\vec{c} + v\vec{d} \quad u, v = [0, 1] \quad (9)$$

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

$$p^* = \vec{R}_0 + u^*\vec{c} + v^*\vec{d}, \quad \vec{n} = \frac{\vec{c} \times \vec{d}}{|\vec{c} \times \vec{d}|} \quad (10)$$

여기서  $\vec{n}$  는 평면의 법선벡터이며,  $\vec{c}, \vec{d}$  에 각각 수직이다. 따라서 점  $m$ 과 평면과의 최소 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$d^* = |p^* - m| \quad (11)$$

$p^*$ 는  $(p^* - m) \times \vec{n} = 0$ 를 만족하여야 한다.

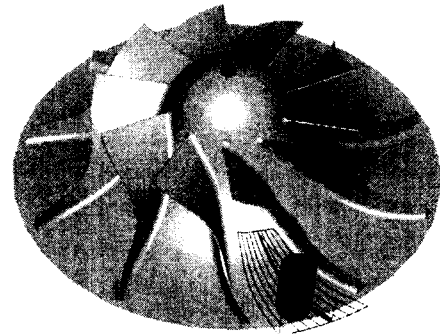
식 (11)과 같이 계산된 최소거리 값  $d^*$ 가 허용 오차  $\delta$  이내의 값으로 계산되면 간섭검사를 마무리한다.

### 3.2.3 최적 공구크기 계산

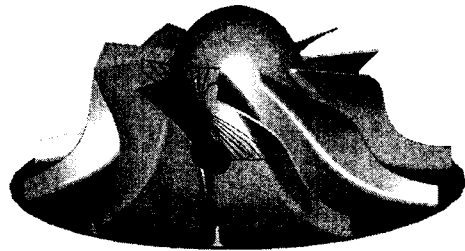
Fig. 9와 같이 각각의 분할된 영역 내에서 계산된 초기 공구크기 계산한 후 간섭검사를 수행했을 때 계산된 간섭량과 미절삭 두께를 고려하여 간섭을 피할 수 있는 공구로 최적공구크기( $R'$ )를 계산하였다.

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

- R : 초기선정 공구 크기
- $\alpha$  : 미절삭 두께(=항삭여유)
- $\beta$  : 간섭량

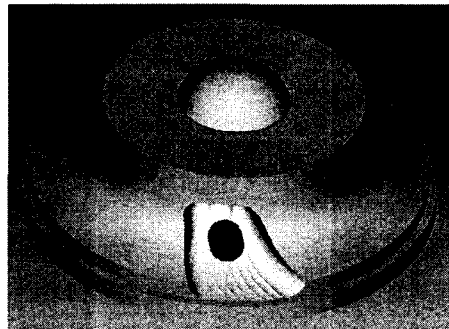


(a) Tool path of exducer area

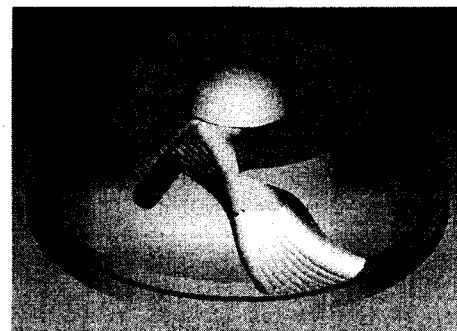


(b) Tool path of inducer area

Fig. 10 Tool path of Roughing



(a) Exducer roughing



(b) Inducer roughing

Fig. 11 Vericut Simulation for Roughing

Table 1 Cutting time of Roughing

Method	End mill	Feedrate (mm/min)	cutting time (min)
Conventional	ballø6	1,500	142
In this study	ballø6,10	1,500	121

Table 2 Cutting conditions of Roughing

Region	End mill (mm)	Feedrate (mm/min)	Spindle (rev/min)	cutting time(min)
Exducer	ball ø10	1,500	3,000	62
Inducer	ball ø6	1,500	3,000	59

3.2.4 황삭 가공경로 생성

본 연구에서는 공구의 효율적인 사용을 위해 전체 영역을 두 부분으로 나누어 가공경로를 생성하였고, 불필요한 공구의 air-cut양을 줄이기 위해 등-매개변수 곡선(iso-parametric curve)을 따라 지그재그(Zig-Zag)경로를 생성하였다. 가공 순서는 Fig. 10과 같이 exducer 부분을 먼저 가공하고 inducer 부분을 가공하는 순서로 수행하였다.

또한 임펠러에서 블레이드면의 정밀도 향상을 위해서 황삭에서 미 절삭두께를 최소화하여 정삭시 미절삭량에 의한 공구부하를 줄일 수 있도록 하였다.

4. 시뮬레이션 검증

실제 가공에 앞서 실제 가공에서 발생할 수 있는 가공 저해 요소(공구와 공작물의 충돌, overcut, uncut, 공구의 접근과 후퇴 등)와 공구경로 데이터의 검증을 위해서 상용소프트웨어를 통하여 검증 후에 실제 가공에 들어 갈 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 가공검증 시뮬레이션 소프트웨어인 VERICUT을 사용하여 Fig. 11과 같이 가공을 검증하였다.

5. 실제가공 및 분석

본 논문에서 제시한 방법을 검증하기 위해 수평형 5축 가공기를 사용하여 임펠러 가공을

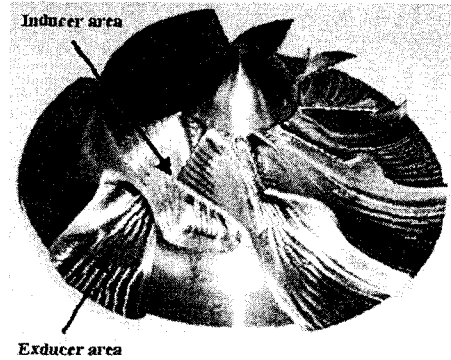


Fig. 12 Machined product

수행하였다. 임펠러의 가공은 먼저 소재를 선반을 이용하여 shroud boundary형상으로 가공한 후 5축 가공을 수행하였다. 소재의 재질은 내식성이 뛰어난 계열인 알루미늄(AL6061-T6)을 사용하였다. Inducer 부분의 최소 폭은 6.455mm이고, exducer 부분의 최소 폭은 10.553mm이다. 따라서 본 연구에서 선정된 최대 크기의 공구는 ø6mm, 10mm인 ball-end mill이다.

Table 1은 전체 가공영역을 단일 공구를 사용하는 기존방식과 가공영역을 두 개의 영역으로 나누고 각각의 영역에서의 최적공구를 사용하여 가공을 수행한 본 연구의 방식의 절삭시간의 차이를 보여주고 있으며, 실질적으로 약 15% 정도의 절삭시간이 감소했음을 알 수 있다.

Table 2는 본 연구에서의 각각의 분할된 가공 영역에서 사용된 공구에 따른 절삭조건 및 절삭 시간을 보여주고 있다.

Fig. 12는 임펠러의 가공 진행과정을 알아볼 수 있도록 각 공정별로 구간을 나누어 가공한 임펠러의 사진을 보여주고 있다. hub 부분은 유체의 흐름을 따라 가공면이 이루어진 것을 볼 수 있다. 또한, inducer 부분은 공구의 중복 때문에 커슥(cusp)의 높이가 낮게 나타나고, exducer 부분은 적은 중복으로 인해 경로 간격이 커져 커슥높이가 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 커슥높이는 50µm로 공구경로간격의 조절에 의한 커슥높이 계산이 아닌 커슥 높이에 의한 공구경로간격을 정의하여 표면의 거칠기를 일정하게 하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 임펠러의 전체 가공시간의 감소를 위한 황삭가공 방법을 제안하였다. 이를 위하여 블레이드 형상의 기하학적 정보를 활용하여 특징 점을 정의하고 가공 영역을 분할하여 가공경로를 생성할 수 있도록 하였고, 분할된 가공영역에 따라 형상특징에 맞는 최적공구를 정의하여 공구 사용의 효율성을 높일 수 있었으며 가공시간 또한 단축 할 수 있었다. 이를 검증하기 위해 실시한 실제가공에서 기존방식에 비해 전체적인 절삭시간을 절감할 수 있었다. 더불어 공작물의 크기가 커질수록 전체적인 가공시간에 미치는 영향이 커짐을 예측할 수 있었다.

또한, 공구의 간섭제거를 위해서 공구축과 롤링라인 사이의 최단거리의 계산방법과 롤링라인 사이에 존재하는 롤드면의 평면 근사화를 통한 롤링라인과의 허용오차를 이용해서 간섭 검사를 수행하여 기존의 방식들에 비해서 비교 데이터양과 간섭검사 시간을 줄일 수 있도록 하였다.

## 참고문헌

- (1) Lee, C. S. and Park, G. R., 1999, "Generation of 5-axis NC Data for Machining Turbine Blades by Controlling the Heel Angle," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 4, No. 2, pp. 110~120.
- (2) Jun, C. S. and Park, J. S., 2001, "Development of Dedicated CAM System for Turbine Blades," *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Annual Meeting*, pp. 181~186.
- (3) Lee, C. S., Lee, J. H. and Park, S. D., 2001, "Generation of 4-axis NC Data for Single Setup of Ships Propeller Machining," *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers*, pp. 187~194.
- (4) Cho, H. D., Jung, D. I., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, E. S. and Dong, Y. G., 2002, "The Development of Exclusive CAD/CAM System for Impeller Blades Formed by Ruled Surface II(A Study on the 5-axis Machining)," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 1~7.
- (5) Cho, H. D., Jun, Y. T. and Yang, M. Y., 1993, "A Study on the Machining of Sculptured Surfaces by 5-Axis CNC Milling (II)," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 17, No. 8, pp. 2012~2022.
- (6) Kang, J. G., 1997, "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.
- (7) Kang, J. G. and Suh, S. H., 1997, "Machinability and Set-up Orientation for Five-axis Numerically Controlled Machining of Free Surface," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, pp. 311~325.
- (8) Takeuchi Y., Idemura, T. C., 1991, "Generation of 5-Axis Control Collision-Free Tool Path and Postprocessing for NC Data" *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 455~458.
- (9) Kang, J. H., Suh, S. H. and Lee, J. J., 1997, "Rough Cut Tool Path Planning in Fewer-axis CNC Machining," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 2, No. 1, pp. 19~27.
- (10) David F. Rogers and J. Alan Adams, 1976, "Mathematical Elements for Computer Graphics" *Mc Graw Hill*, second edition, pp. 305~375.