

## Ruled Surface로 형성된 임펠러 블레이드의 5-축 가공에 관한 연구.

정대일\*, 조현덕\*, 윤문철\*\*, 최두선\*\*\*, 신보성\*\*\*, 이응숙\*\*\*

### A Study on the 5-Axis Machining of Impeller Blades with Ruled Surfaces.

Dae-II Jung\*, Hyun-Deog Cho\*, Moon-Chul Yoon\*\*, Doo-Seon Choi\*\*\*, Bo-Sung Shin\*\*\*, Eung-Sug Lee\*\*\*

#### Abstract

This paper describes the method and the process for impeller machining on 5-axis CNC machining center. Also, The CAD/CAM software for the impeller post processing is developed. The software can be interfaced with Solid-works software for confirmation of the impeller shapes. In this study, blades on impeller is described from Ruled-surfaces between two Ferguson curves. In this study, using 5-axis NC part program obtained from the developed software, a sample impeller was machined on 5-axis CNC machining center. The machined impeller was very agreeable to the designed impeller. Thus, theories proposed in this study can be very useful for the 5-axis machining of impeller blades with Ruled-surfaces.

#### 1. 서 론

\* 경일대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 기계자동차공학부

\*\*\* 한국기계연구원 정밀가공그룹

임펠러(impeller)는 유체기계의 압축기 및 펌프, 항공기의 산소공급장치, 디젤 자동차의 터보 인터쿨러 등의 부품으로써 고속으로 회전하면서 유체를 압축시키거나 이동시키는데 사용되며, 일반적으로 고속, 고온, 고압의 환경조건에서 사용된다. 따라서 고속 회전 시 밸런싱(balancing)이 정확하지 않으면 소음과 진동을 크게 유발하여 기계의 효율이 떨어지고 피로파손을 불러일으킬 수 있다<sup>(1,2)</sup>. 그리하여 정확한 밸런싱이 이루어지도록 구조설계가 이루어져야 하며, 유체의 흐름이 유체역학적으로 원활하게 유동되도록 설계되어야 한다. 재료의 선정 또한 이와 같은 조건을 만족시킬 수 있을만한 재료를 선정하는 것 또한 중요하다. 그래서 이들 조건을 만족시키기 위해서는 몸체와 블레이드(blade)가 일체형이 되도록 일괄 가공하는 것이 유리하다. 그러나, 임펠러의 가공을 위해서는 5-축 가공을 하여야 하는데, 일반적으로 임펠러 5-축 가공은 사용될 기계의 5-축 구성 특성에 따라 다른 기하학적 알고리즘을 적용해야 하기 때문에 NC-code 작성이 어렵다<sup>(1~5)</sup>. 이로 인해 상용 CAM 소프트웨어들은 지금까지 5-축을 지원하는 모듈을 추가하지 않다가 근래에 들어서 상당 부분 추가되고 있으나, 아직 임펠러를 자유롭게 가공할 수 있는 소프트웨어는 보편화되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 특정

화된 임펠러를 5-축 가공하기 위하여 모델링 및 가공 방법에 대하여 언급하였고 실제 모델링된 샘플을 가공하여 이론적인 방법을 확인하였다.

본 연구에서 임펠러 블레이드는 Ferguson 커브 보간 방법으로 각각 보간된 허브 곡선(hub curve)과 쉬라우드 곡선(shroud curve)에 대하여 Ruled-surface로 압력부 곡면과 흡입부 곡면을 각각 묘사함으로써 설계하였다. 임펠러 블레이드를 5-축 가공하기 위한 공구 축 방향 벡터(cutter axis direction vector)는 Ruled-surface 모델링시 정의된 직선 축이 되는데, 공구의 측면으로 가공하기 위해 실제 사용되는 공구 축 방향 벡터는 블레이드 곡면에 대한 법선 방향으로 공구의 반지름만큼 오프셋(offset)하여 지정할 수 있다. 그리고 볼 엔드밀 공구의 볼 중심점의 지정은 공구축 방향 벡터를 따른 위치 변화에 대하여 몸체면과 간섭을 체크함으로써 결정된다. 블레이드 간의 몸체부를 가공하기 위한 공구 경로 폭은 주어진 경로 수에 대하여 계산되었고, 공구 경로상의 공구축 방향 벡터는 양 블레이드의 공구축 방향 벡터를 선형화 함으로써 결정할 수 있었다. 이러한 임펠러 설계와 가공을 일괄적으로 처리할 수 있도록 소프트웨어화하였으며, 개발된 소프트웨어는 모델링 결과를 상용 소프트웨어인 솔리드 워크스(Solid Works)와 인터페이스 가능하도록 하여 솔리드 모델을 생성할 수 있도록 하였다. 개발된 소프트웨어를 이용하여 TCH-45와 2개의 축을 추가하여 구성한 5-축 CNC 기계로 임펠러를 가공한 결과 본 연구는 블레이드가 Ruled-surface로 구성된 임펠러의 가공에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

## 2. 임펠러 모델링

### 2.1 임펠러 형상 및 구성

임펠러는 Fig.1에서와 같이 몸체(boss)와 블레이드(blade)로 구성되는데, 블레이드는 압력

(pressure)부와 흡입(suction)부 2개의 곡면을 갖고 있으며 각 곡면에서 몸체와 만나는 부분의 곡선을 허브(hub) 곡선이라 하고 끝 부분의 곡선을 쉬라우드(shroud) 곡선이라 한다. 그리고 몸체부는 허브 곡선의 임펠러 축에 대한 회전면이 되는데, 가공면을 균일하게 하기 위해서는 설계에서 두 개의 허브 곡선의 회전면이 서로 일치하도록 지정할 필요가 있다.

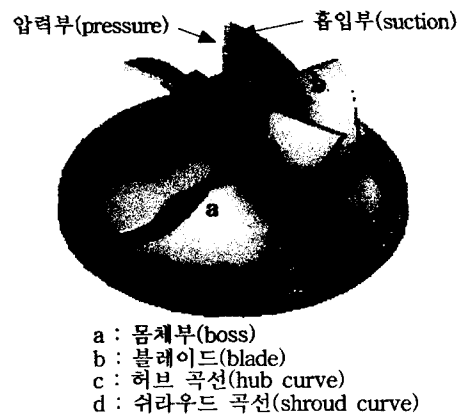


Fig1. The representation of impeller

본 연구에서는 Fig1.의 임펠러 블레이드의 곡선을 설계하기 위하여 임의로 설정된 점 데이터(point data)를 입력 데이터로 사용하였다. 점 데이터의 결정은 유체역학적 설계분야로 본 연구에서는 입력 데이터의 효율성 문제는 다루지 않고, 주어진 입력 데이터에 따른 임펠러의 형상 모델링과 NC 5-축 가공에 대해서만 다루게 된다.

### 2.2 블레이드 모델링

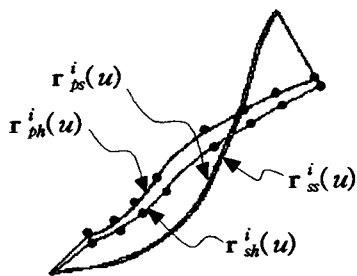
본 연구에서 사용된 블레이드(blade)의 쉬라우드(shroud) 및 허브(hub) 곡선의 표현은 일반적으로 많이 사용되는 Ferguson curve fitting 방법을 사용하였는데 각각의 곡선 식  $r(u)$ 는 다음과 표현될 수 있다. 여기서, 첫 번째 첨자  $p$ 는 압력부이고  $s$ 는 흡입부를 의미하고 두 번째 첨자  $h$ 는 허브 부이고  $s$ 는 쉬라우드 부를 의미한다. 그리고,  $i$ 는 주어진 점 데이터의  $i$

번째와  $i+1$  번째의 구간을 의미하고,  $u$ 는 0에서 1까지의 범위를 갖는 매개변수이다.

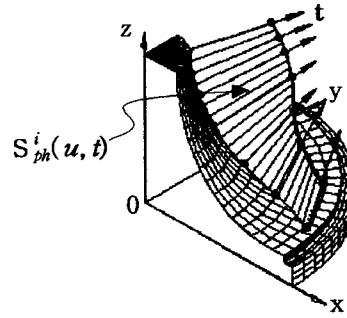
$$r_{ph}^i(u), r_{ps}^i(u), r_{sh}^i(u), r_{ss}^i(u) \quad (1)$$

(1)식에 주어진 블레이드를 구성하는 곡선들은 Fig.2의 (a)에 표현하였다. 그리고 블레이드는 압력부와 흡입부로 두 곡면으로 구성되는데, 각 곡면의 구성은 두 곡선에 대한 Ruled-surface로 묘사하였는데, Fig.2의 (b)와 같이 허브 곡선(hub curve)과 쉬라우드 곡선(shroud curve)을 경계로 하나의 직선이 서로 대응되는 점을 연결하여 곡면이 생성된다. 여기서 구해진 직선은 뒤에서 설명될 5-축 가공을 위한 공구 축 방향 벡터의 결정에 이용된다. 일반적으로 공구의 측면 날을 이용하여 블레이드 면을 용이하게 가공할 수 있도록 하기 위하여 Ruled-surface로 모델링을 하는데, 이러한 방법으로 모델링을 하여도 임펠러의 성능이 크게 떨어지지 않기 때문에 많이 사용되는 방법이라 할 수 있다.

Fig.2의 (a)에서 보는 바와 같이 임펠러의 몸체부와 만나는 허브 곡선과 바깥쪽의 쉬라우드 곡선은 각각 주어진 점 데이터를 이용하여 각 점에서 Ferguson curve fitting을 실시하여 생성하였고, Fig.2의 (b)는 두 곡선에 의하여 생성된 Ruled-surface를 표현하고 있다.



( a )

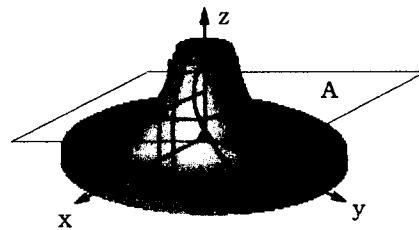


( b )

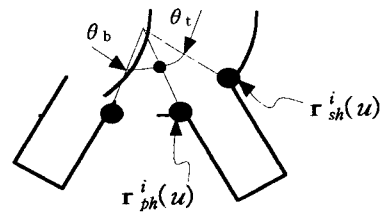
Fig.2 Modelling of impeller blade

### 2.3 몸체부 모델링(boss modelling)

임펠러의 몸체부(boss) 형상은 몸체 하단부와 상단부를 연결하는 임의의 곡선이 정의되면 임펠러 회전축에 대하여  $360^\circ$  회전시킴으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 블레이드면과 몸체면을 부드럽게 하기 위하여 블레이드의 허브 곡선을 따르는 것으로 정의하였다.



( a )



( b )

Fig.3 The definition of impeller boss

Fig.3 (a)는 블레이드 몸체면으로서 블레이드의 허브 곡선에 의하여 형성될 경우를 보여주고 있다. 여기서 압력부와 흡입부에서의 허브 곡선이 동일 z-축 상에서 z-축까지의 거리가 같아야 하는데, 이는 모델링시 입력 조건으로 알맞게 지정되어야 한다. Fig.3 (b)는 Fig.3 (a)의 평면 A에서의 단면을 보여주는데, 블레이드의 두께  $t_b$ 는 다음과 같이 된다.

$$t_b = |r_{ph}^i(u) - r_{sh}^i(u)| \quad (2)$$

따라서, 블레이드 두께에 의한 회전축에 대한 필요 각  $\theta_t$ 는 다음과 같이 된다.

$$\theta_t = 2\sin^{-1}\left(\frac{t_b}{2r_{ph}^i(u)}\right) \quad (3)$$

$$r_{ph}^i(u) = \sqrt{r_{phx}^i{}^2(u) + r_{phy}^i{}^2(u)} \quad (4)$$

만일, 임펠러의 블레이드의 개수가  $n_b$ 라면  $\theta_b$ 는 다음과 같은 식으로 구할 수 있으며,  $\theta_b$  영역만큼 허브 곡선을 회전변환하여 몸체부를 모델링할 수 있다.

$$\theta_b = \frac{2\pi}{n_b} - \theta_t \quad (5)$$

### 3. 임펠러 가공

#### 3.1 5-축 기계

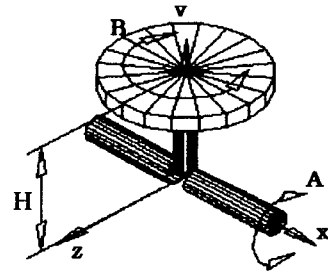
임펠러를 가공하기 위해서는 5-축 기계를 사용하여야 하며 5-축 가공은 X, Y, Z-축에 대한 운동과 A, B-축에 대한 운동으로 5 자유도를 갖는 가공을 의미한다. 본 연구에서 사용된 5-축 기계는 TCH-45를 모체로 하여 2개의 부가축 A, B를 테이블 위에 설치하여 동시 5-축 제어가 가능하도록 한 것으로 Fig.4와 같은 구성을 하였다.

5-축 NC 코드를 생성하기 위해서는 공구의 위치 벡터  $P(P_x, P_y, P_z)$ 와 공구 축 방향 벡터

$T(V_x, V_y, V_z)$ 가 필요하다. 이 두 값을 이용하여 테이블에 대한 톨팅 값과 회전값 A와 B를 구할 수 있다. Fig.5는 A, B의 방향 값과 위치 값과의 관계를 나타내고 있다. 먼저 공구의 축 방향 벡터를 yz-평면상에 z-축을 중심으로 회전시킨다. 그리고 y-축과 이루는 각으로 부가 축 A를



(a)



(b)

Fig.4 5-axis M/C and index table

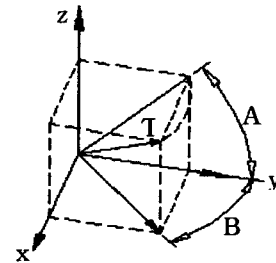


Fig.5 The relation between cutter axis direction vector and A and B

정의한다. 마찬가지로 z-축을 기준으로 yz-평면

상으로 회전하면서 발생하는  $\theta$ 를 B로 정의한다. 따라서 A와 B에 의해서 직교 성분인  $P(P_x, P_y, P_z)$ 가 변화를 일으키는데 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$(x, y, z, 1) = (P_x, P_y, P_z, 1)$$

$$\begin{pmatrix} \cos B & \sin B & 0 & 0 \\ -\sin B & \cos B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & \sin A & 0 \\ 0 & -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$A = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{V_z}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \right) \quad (7)$$

$$B = \tan^{-1} \left( \frac{V_x}{V_y} \right) \quad (8)$$

### 3.2 블레이드 가공

블레이드 면은 블 엔드 밀 공구의 측면을 이용하여 가공할 수 있는데, 공구 축 방향벡터는 Ruled-surface를 구성하는 하나의 직선의 방향 벡터의 시작위치에서 공구의 반지름 R만큼 떨어진 CL 데이터의 한 점 즉 공구의 중심점을 사용하여 가공을 한다. Fig.6은 실제 임펠러 블레이드 면의 Ruled-surface의 곡면과 공구 축 방향이 일치하도록 공구 축 방향이 결정되어진 모습을 표현하고 있다. 그리고 몸체부분의 가공은 블 엔드 밀의 노즈 부분의 가공을 피하여 아래에서 위로 up-ward 가공 방식을 사용하며, 가공 경로는 두 개의 블레이드 사이에 존재하는 허브 곡선을 경계로 일정하게 가공이 이루어지도록 가공 경로를 생성하였다. 그리고 양쪽의 블레이드에 간섭이 일어나지 않도록 공구축의 자세(방향 벡터)를 결정해야 한다. Fig.6에서  $d_{(i)(j)}$ 와  $d_{(i+1)(j)}$ 는 몸체 면 양단에 있는 블레이드의 Ruled-surface에서의 직선방향 벡터이다. 여기서 i는 블레이드를 의미하고 j는 공구경로의 진행을 의미하는 인덱스이다. 따라서, 실제 공구가 위치해야 하는 공구 축 방향은 Ruled-surface에 의한 직선 벡터와 블레

이드 면의 두 곡선과 만나는 두 위치에서의 두 법선 벡터 상에서 공구 반경만큼 떨어진 두 위치 점의 연결로 결정되는데,  $d'_{(i)(j)}$ 와  $d'_{(i+1)(j)}$ 가 되고, 몸체 면을 가공하기 위한 공구 축 방향 벡터  $T_{(i)(j)}(s)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{(i)(j)}(s) = (1-t)d'_{(i)(j)} + td'_{(i+1)(j)} \quad (9)$$

여기서  $t = s/s_0$

$s_0$  :  $P_{(i)(j)}$ 와  $P_{(i+1)(j)}$  사이의 curve length

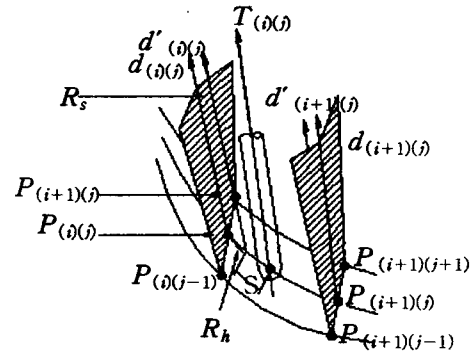


Fig.6 Direction position of cutter axis on blade and boss surfaces

### 3.3 처리 소프트웨어 및 결과

본 연구에서 연구된 특정 임펠러 설계와 가공을 위하여 처리 소프트웨어를 개발하여 실제 가공 실험을 하였는데, Fig.7은 임펠러의 모델링

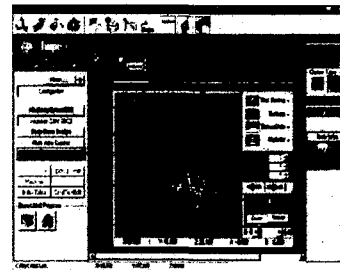


Fig.7 The result of impeller design on the developed software

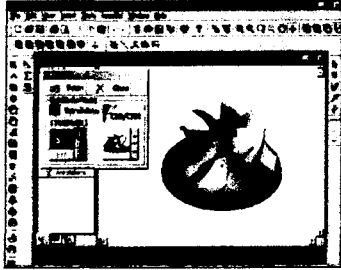


Fig.8 The solid model of impeller on the Solid-Works modelled by developed software

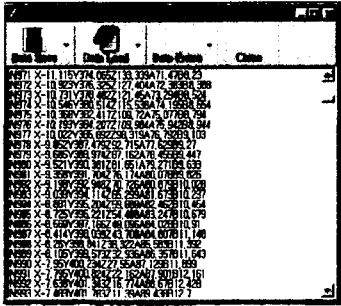


Fig.9 5-axis NC-code for impeller machining

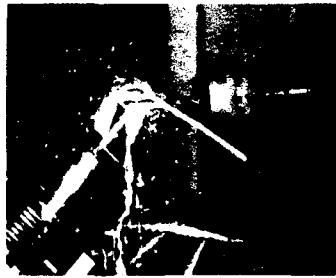


Fig.10 5-axis impeller machining

결과를 보여 주며 Fig.8은 개발된 소프트웨어에서의 결과를 상용 패키지인 솔리드 워크스에 솔리드로 모델링 되도록 한 결과를 보여 준다.

Fig.9는 본 연구에서 모델링된 임펠터를 가공하기 위해 개발된 처리 소프트웨어에서 생성된 5-축 NC-code를 보여 주며, Fig.10과 Fig.11은 가

공모습과 가공된 결과를 보여 준다.



Fig.11 Machined impeller

#### 4. 결 론

본 연구에서 개발된 Ruled-surface로 형성된 블레이드를 갖는 임펠터의 모델링 방법과 가공 방법은 가공 결과와 잘 일치함을 알 수 있었고, 일괄 처리 소프트웨어를 개발함으로써 Ruled-surface로 이루어진 특정한 임펠터의 설계와 가공을 능률적으로 할 수 있게 되었다.

#### 참고문헌

- (1) 조현덕 외 5, "임펠터 5-축 CNC 가공에 관한 연구", 한국공작기계학회, 제6권, 제4호, 1997
- (2) 전용태, 박세형, "Impeller 가공용 전용 CAM 시스템 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1994
- (3) Gershon Elber, "Accessibility in 5-Axis milling environment" Computer-Aided Design, V.26 N.11, 1994
- (4) Idemura, "Machining and Grinding By 5-Axis control machining center - for the workpiece with convex sculptured surface" JSPE, V.57, N.11, 1991
- (5) Cho H.D., "A Study on 5-Axis Precision Machining for Sculptured Surfaces", Ph.D thesis, KAIST, 1993