

Ruled Surface로 형성된 임펠러 블레이드 전용 CAD/CAM 시스템 개발 II(5-축 가공에 관한 연구)

조현덕*, 정대일+, 윤문철++, 최두선+++, 신보성+++, 이응숙+++, 董玉革++++

(논문접수일 2001. 7. 11, 심사완료일 2002. 1. 23)

The Development of Exclusive CAD/CAM System for Impeller Blades Formed by Ruled Surface II (A Study on the 5-Axis Machining)

Hyun-Deog Cho*, Dae-Il Jung+, Moon-Chul Yoon++, Doo-Sun Choi+++, Bo-Sung Shin+++,
Eung-Soog Lee+++, Yu-Ge Dong++++

Abstract

This study is continuous with the study I (A Study on the Modeling) and the sample impeller of this study is defined by the modeling process of the exclusive CAD/CAM system developed in the study I. And, this study describes a method for the 5-axis machining of impeller blades formed by ruled surface. Therefore, the exclusive CAD/CAM system is the software for modeling and machining of impeller blades. By using the machining method suggested in this study, we could manufacture impeller blades on 5-axis CNC machining center and 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.

Key Words : 5-축 CNC 머시닝 센터(5-axis CNC machining center), 5-축 가공(5-axis machining), 전용 CAD/CAM 시스템(Exclusive CAD/CAM system), 임펠러(Impeller), 인덱스 테이블(Index Table)

1. 서론

임펠러(impeller)는 수 개의 블레이드(blade)와 한 개의

몸체로 구성된 회전체로서 압축기, 펌프, 항공기의 산소공급장치 및 디젤 자동차의 터보 인터쿨러 등에 적용되며 고속으로 회전하면서 유체를 압축시키거나 이동시키는 기능

* 주저자, 경일대학교 기계공학부 (hdcho@bear.kyungil.ac.kr)

주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지

+ 경일대학교 기계공학부

++ 부경대학교 기계공학부

+++ 한국기계연구원 정밀가공그룹

++++ Heifei University of Technology, in China

을 하며 일반적으로 고속, 고온, 고압의 환경조건에서 사용된다^(1~4). 상용 임펠러는 기계가공이나 정밀주조로 제작되거나 주조의 경우 마스트(master) 제품은 반드시 기계가공으로 제작되어야 한다. 따라서 임펠러 가공은 매우 중요하며, 정밀한 제품으로 사용되기 때문에 몸체와 블레이드가 일체형이 되도록 일괄 가공할 필요가 있다. 그리고, 임펠러는 5-축 가공에 의해서만이 제작 가능하고, 5-축 가공은 사용될 기계의 축 구성 방법에 따라 다른 기하학적 알고리즘을 적용해야 하기 때문에 NC-code 작성이 3-축 가공에 비하여 복잡하다⁽⁷⁾. 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 특정화된 임펠러를 5-축 가공하기 위한 방법에 대하여 언급하였고 실제 모델링된 샘플을 가공하여 확인하였다.

본 연구에서 임펠러 블레이드를 5-축 가공하기 위한 공구 축 방향 벡터(cutter axis direction vector)는 ruled-surface 모델에서 정의되는 직선 축에 근거하여 계산되는데, 공구의 측면으로 가공하기 위해 실제 사용되는 공구 축 방향 벡터는 블레이드 곡면에 대한 법선 방향으로 공구의 반지름만큼 오프셋(offset)하여 정하는 방법과 ruled-surface의 직선 벡터와 평행한 벡터로 정하는 방법에 대하여 각각 적용하여 가공결과를 비교하였다. 그리고 볼 엔드밀 공구의 볼 중심점의 지정은 공구 축 방향 벡터상에서 위치를 변화하여 몸체면과 간섭을 피하게 함으로써 결정된다. 블레이드 간의 몸체 부를 가공하기 위한 공구 경로 폭은 주어진 경로 수에 대하여 계산되었고, 공구 경로상의 공구 축 방향 벡터는 양

블레이드의 공구 축 방향 벡터를 선형화 함으로써 결정할 수 있었다. 그리고, 본 연구에서 제시한 임펠러 5-축 가공 원리를 개발된 임펠러 전용 CAD/CAM 시스템에 적용하였으며, 개발된 소프트웨어를 이용하여 TCH-45의 기본 3-축과 2개의 부가 축으로 구성된 5-축 CNC 기계로 임펠러를 가공한 결과 본 연구는 블레이드가 ruled-surface로 구성된 임펠러의 가공에 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

2. 5-축 가공 데이터 산출

임펠러 5-축 가공을 위한 NC-code 작성 절차는 Fig. 1과 같이, 블레이드 형상에 따라 별도의 공구 축 방향 벡터를 결정하며 결정된 공구 축 방향 벡터를 따른 공구의 위치를 결정하고 5-축 기계의 구성에 따라 NC-code에 기록될 각도 변위 A와 B를 계산하고 A와 B의 운동에 의해 공작물의 위치가 새롭게 변하게 되므로 NC-code에 기록될 새로운 위치좌표 X, Y, Z 값을 구하여 NC-code를 작성한다.

본 연구에서는 5-축 가공기로 모델 TCH-45의 수평 머시닝 센터에 Fig. 2와 같은 2개의 부가 축 A와 B-축이 부착된 인덱스 작업 테이블과 동시 5-축 제어가 가능한 MCU(machine control unit)를 부착한 5-축 머시닝 센터를 사용하였다.

그리고 가공원점 코드의 G54(TCH-45의 경우 G54~G59 가능)는 항상 인덱스 테이블의 회전중심이 되도록 하는 것이 좋는데 이는 좌표변환을 편리하게 하기 위한 것이며 공작물 및 공구의 세팅 시에는 반드시 인덱스 테이블의 회전중심으로부터 일정거리에 있는 측정 용이한 기준 점을 설정하면 편리하다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어는 가공

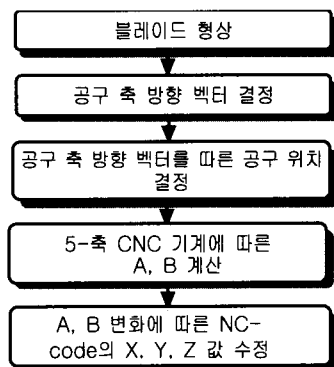


Fig. 1 The 5-axis NC-code generation process for impeller machining

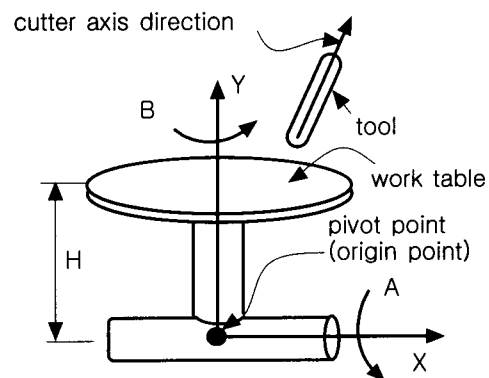


Fig. 2 Cutter axis direction and work table movement

원점을 인덱스 테이블의 회전중심으로 하였으며 구성은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서 사용하는 실제 5-축 기계의 공구 방향은 Z-축으로 고정되어 있으므로 Fig. 2의 공구 축 방향이 Z-축과 일치하도록 인덱스 테이블을 회전시켜서 가공을 실현하여야 한다. 따라서, Fig. 3과 같이 임의의 공구 축 방향 벡터를 표시된 회전 방향으로 회전하여야 한다. 여기서 B의 작동이 A기능의 회전 테이블 상에서 작동하므로 Fig. 3과 같이 B의 표현은 경사면의 각도가 되고 방향은 테이블이 Z-축을 향하여 회전운동을 하지만 프로그램상의 방향 기준은 공구가 움직이는 방향을 기준으로 오른손 법칙을 따르므로 Fig. 3과 같은 방향이 되어 A는 음의 방향이 되고 B는 양의 방향으로 되며 (1)식과 (2)식으로 A, B를 표현할 수 있다.

$$A = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{(i)jy}}{T_{(i)jz}}\right) \quad (1)$$

$$B = \tan^{-1}\left(\frac{T_{(i)jx}}{\sqrt{T_{(i)jy}^2 + T_{(i)jz}^2}}\right) \quad (2)$$

5-축 가공에서 NC-code 생성에 필요한 부가 축 좌표는 (1)식과 (2)식의 결과 값을 기록하면 된다. 여기서 $T_{(i)j}$ 는 i 번째 블레이드의 공구경로 데이터 j 번째 가공 위치에서의 공구 축 방향 벡터를 의미한다.

고정 좌표계에 대하여 임의의 공구 축 방향 벡터 $T_{(i)j}$ 를 결정하였다면, Fig.4와 같이 공구 축 방향 벡터 $T_{(i)j}$ 와 실제 기계의 고정된 공구 축 방향인 Z-축이 서로 일치하도록 Fig.2의 인덱스가 회전하여야 원하는 가공을 할 수가 있다. 이러한 인덱스의 회전이 발생하면 고정 좌표계에 대한 가공

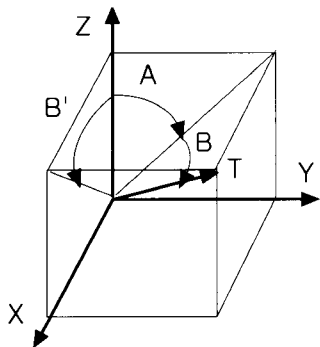


Fig. 3 The relation of cutter axis direction vector and A & B

위치 점이 변환되게 되므로 이를 보상하여야 한다. 따라서, 인덱스 테이블의 회전은 X, Y, Z-좌표 값과는 독립적으로 작용하므로 부호에 무관하게 작용하므로, 공구 축 방향 벡터의 모든 성분이 양의 방향이라고 하면 실제 회전은 Fig. 3의 -B'와 -A로의 회전이 이루어 질 것이며, X-축에 대한 회전을 θ , Y-축에 대한 회전을 ψ 라고 하면 θ 와 ψ 는 (3)식과 (4)식으로 표현된다. 그리고, 초기 공구 좌표 계는 회전에 의한 좌표변환을 적용하여 (5)식과 같이 된다. 즉, (x_c, y_c, z_c) 는 초기 모델링 좌표(본 연구에서 좌표 원점은 인덱스 테이블의 회전중심)에 대한 좌표 값이며 (x, y, z) 는 공구 축 방향 벡터와 실제 공구 축과 일치시키기 위해 인덱스 테이블의 회전 운동이 이루어진 후의 새로운 좌표 값이다. 여기서, (6)식은 X-축, (7)식은 Y-축에 대한 회전변환 행렬이다.

$$\theta = -A = \tan^{-1}\left(\frac{T_{(i)jy}}{T_{(i)jz}}\right) \quad (3)$$

$$\psi = -B' = -\tan^{-1}\left(\frac{T_{(i)jx}}{T_{(i)jz}}\right) \quad (4)$$

$$(x, y, z, 1) = (x_c, y_c, z_c, 1)M(\theta)M(\psi) \quad (5)$$

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$M(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

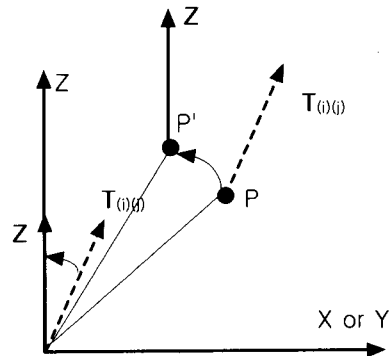


Fig. 4 The relation of rotational movement and cutter axis direction vector

따라서 어떤 위치 점까지의 5-축 가공을 위한 NC-code는 다음과 같은 형태로 표현된다. 여기서 a는 (1)식의 결과이고 b는 (2)식의 결과 값이며 x, y 및 z는 (5)식의 결과이다.

$$G01 Xx Yy Zz Aa Bb ; \quad (8)$$

3. 블레이드 가공

본 연구에서 사용된 임펠러 블레이드의 형상을 표현하기 위한 곡선 및 곡면의 기호는 Fig. 5와 같이 지정되었는데, P는 점(point)을 의미하며 C는 곡선(curve)를 의미한다. 그리고 첫 번째 첨자 p는 압력(pressure) 부이고 s는 흡입(suction) 부를 의미하고 두 번째 첨자 h는 허브(hub) 부이고 s는 쉬라우드(shroud) 부를 의미한다. 그리고, i는 i번째 블레이드를 의미하며 j는 커브 내에서 j번째의 점 데이터를 의미한다.

Fig. 5의 양끝에 있는 공구 경로는 블레이드를 가공하는 경로이며 중간에 있는 경로들은 몸체부를 가공하기 위한 경로이다. Fig. 5에서 $d_{p(i)(j)}$ 는 압력부의 i번째 블레이드의 j번째 커브 포인트에서의 ruled-surface의 직선 벡터이다. ruled-surface의 직선과 허브와 쉬라우드 곡선이 각각 만나는 점에서의 법선 벡터(normal vector) 방향으로 공구 반지름 R 만큼 떨어진 두 점을 잇는 벡터를 $d'_{p(i)(j)}$ 와 $d'_{s(i+1)(j)}$ 라 하면 다음과 같다.

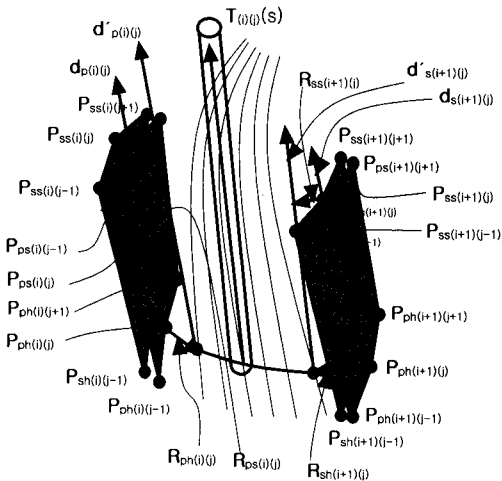


Fig. 5 Direction position of cutter axis for the machining of blade and boss surfaces

$$d'_{p(i)(j)} = d_{p(i)(j)} + R_{ps(i)(j)} - R_{ph(i)(j)} \quad (9)$$

$$d'_{s(i+1)(j)} = d_{s(i+1)(j)} + R_{ss(i+1)(j)} - R_{sh(i+1)(j)} \quad (10)$$

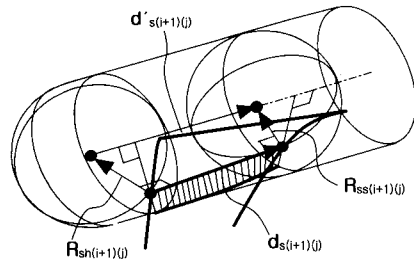
그런데, (9)식과 (10)식을 공구 축 방향 벡터로 할 경우의 가공 형상은 Fig. 6(a)의 A 타입과 같이 해칭 영역에서 과 절삭(over cut)을 동반하게 된다. 그리고 허브 곡선에서의 $R_{ph(i)(j)}$ 및 $R_{sh(i+1)(j)}$ 벡터와 쉬라우드 곡선에서의 $R_{ps(i)(j)}$ 및 $R_{ss(i+1)(j)}$ 벡터를 서로 합하여 공구반경 R만큼 각각의 곡선에서 떨어져 있는 위치에 공구 중심 축을 놓으면 Fig. 6(b)의 B 타입과 같은 가공 상태가 되며 공구 축 방향 벡터는 $d_{p(i)(j)}$ 와 $d_{s(i)(j)}$ 가 된다. 여기서 압력부의 벡터를 $R_{p(i)(j)}$ 라고 하고 흡입부의 벡터를 $R_{s(i+1)(j)}$ 라 하면 다음과 같이 된다.

$$R_{p(i)(j)} = \frac{R(R_{ps(i)(j)} + R_{ph(i)(j)})}{|R_{ps(i)(j)} + R_{ph(i)(j)}|} \quad (11)$$

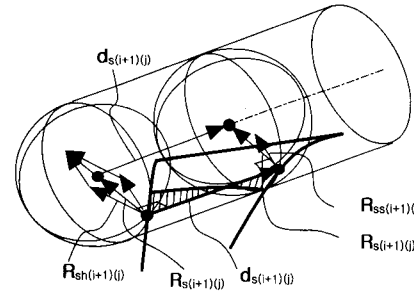
$$R_{s(i+1)(j)} = \frac{R(R_{ss(i+1)(j)} + R_{sh(i+1)(j)})}{|R_{ss(i+1)(j)} + R_{sh(i+1)(j)}|} \quad (12)$$

$$d'_{p(i)(j)} = d_{p(i)(j)} \quad (13)$$

$$d'_{s(i+1)(j)} = d_{s(i+1)(j)} \quad (14)$$



(a) A type



(b) B type

Fig. 6 The relations between cutter axis direction vector and machining error

4. 몸체 가공

몸체 가공은 볼 엔드밀의 노즈(nose) 부분이 가공에 참여하는 것을 피하기 위하여 아래에서 위로의 bottom-up 가공 방식을 사용하였으며, 가공경로는 두 개의 블레이드 사이에 존재하는 허브 곡선을 경계로 일정하게 가공이 이루어지도록 가공 경로를 생성할 수 있다. 그리고 양쪽의 블레이드에 간섭이 일어나지 않도록 공구 축의 자세(방향 벡터)를 결정해야 하는데, Fig. 5에서와 같이 몸체면 양단에 있는 블레이드의 공구 축 방향 벡터가 $\mathbf{d}'_{p(i)(i)}$ 와 $\mathbf{d}'_{s(i+1)(i)}$ 이므로 몸체를 가공하기 위한 공구 축 방향 벡터 $\mathbf{T}_{(i)(j)}(s)$ 는 (11)식으로 표현할 수 있다. 여기서 $t=s/s_0$ 이고, s_0 는 $\mathbf{P}_{ph(i)(i)}$ 와 $\mathbf{P}_{sh(i+1)(i)}$ 사이의 curve length이다.

$$\mathbf{T}_{(i)(j)}(s) = (1-t) \mathbf{d}'_{p(i)(i)} + t \mathbf{d}'_{s(i+1)(i)} \quad (11)$$

(9), (10), (13), (14)식은 단지 공구 축의 방향 벡터이지 공구의 위치를 지정하지는 않는다. 완전한 공구의 자세를 구하기 위해서는 공구 축의 방향 벡터 위에서 최저 위치 점을 구하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 공구 축의 방향 벡터상의 공구 위치 점을 몸체에 간섭이 생기지 않는 최 근접 위치 점으로 구하였다. 본 연구에서 5-축 가공은 공구가 기울어지는 원점이 볼 엔드밀 공구의 볼 중심이므로 공구 위치 점(CL-point: cutter location point)을 3-축 가공과 달리 볼의 중심으로 정의하였으며, 공구 위치 점은 Fig. 7과 같이 공구 축 방향 벡터를 따라 볼을 움직이면서 간섭을 체크함으로써 구할 수 있다. 여기서 k는 간섭 체크를 위해 미소하게 변화시키는 위치 점을 나타내는 첨자이다.

Fig. 7(a)에서 공구 축 방향 벡터 $\mathbf{d}'_{p(i)(i)}$ 는 공간상의 임의의 방향이고, 볼 중심 위치를 $\mathbf{P}_{CL(k)}$ 라고 했을 때 $\mathbf{P}_{CL(k)}$ 는 $\mathbf{d}'_{p(i)(i)}$ 상에 있다. 그리고 z-축과 위치 점 $\mathbf{P}_{CL(k)}$ 가 이루는 평면을 $S_{p(k)}$ 라고 하면 $S_{p(k)}$ 평면과 몸체가 만나는 곡선 C_b 는 몸체부가 z-축을 중심으로 한 회전체이기 때문에 볼의 중심이 $\mathbf{d}'_{p(i)(i)}$ 상에서 어디에 존재하더라도 $S_{p(k)}$ 와 만나는 곡선은 C_b 로 동일하게 되고 구의 최저 점 역시 $S_{p(k)}$ 평면 내에 존재하기 때문에 주어진 k위치에서의 간섭 체크는 Fig. 7(b)와 같이 $S_{p(k)}$ 내에서만 계산하면 된다. 만일 임의 k에서 간섭이 발생하면 Fig. 7(a)에서와 같이 공구 축 방향을 따라 이동하여 새로운 평면 $S_{p(k+1)}$ 을 Fig. 7(b)와 같이 첨자 k만 k+1로 수정하여 계산하고, 이러한 절차에 의하여 간섭 체크가 완료되었다면 공구의 CL-point $\mathbf{P}_{CL(k)}$ 는 좌표 값 (x_c, y_c, z_c)

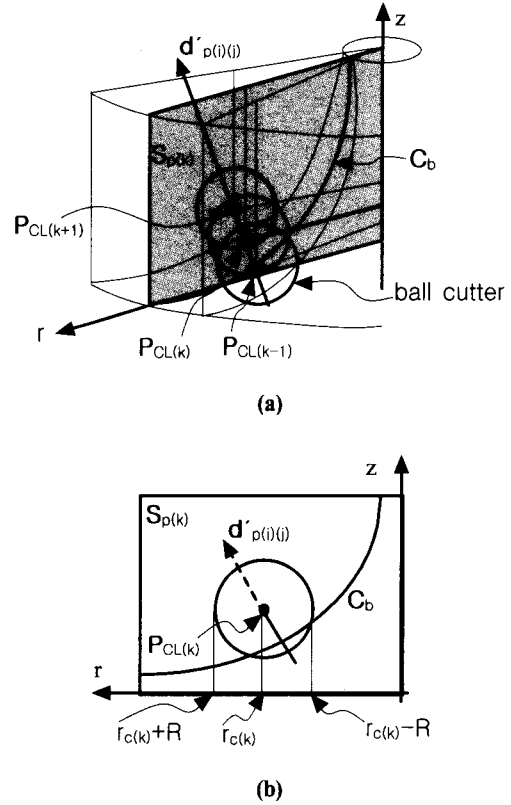


Fig. 7 The relation for interference check between cutter ball and boss part

로 되어 (5)식에 적용하여 최종적인 5-축 NC-code를 계산할 수 있다.

5. 포스트 프로세싱 및 결과

본 연구의 ruled-surface로 구성되는 블레이드 가공을 위한 계산 절차는 Fig. 1과 같이, (9)와 (10)식이나 (13)과 (14)식에서 주어진 공구 축 방향 벡터 $\mathbf{d}'_{p(i)(i)}$ 와 $\mathbf{d}'_{s(i+1)(i)}$ 를 이용하여 Fig. 7의 원리를 이용한 간섭 체크를 수행한 후 공구의 몸체 면에 최 근접하는 위치 점 (x_c, y_c, z_c) 을 구하고, (1)과 (2)식으로 A와 B를 구하고 (3)식과 (4)식의 회전 각을 이용하여 (5)식으로 (8)식의 NC-code에 적용될 좌표 값 (x, y, z) 을 구할 수 있다.

본 연구에서는 공구 축 방향 벡터의 지정을 Fig. 6의 A타입과 B타입에 대하여 각각 적용한 결과 Fig. 8과 같이 되었



(a) A type

(b) B type

Fig. 8 Machining results along to cutter axis direction vectors

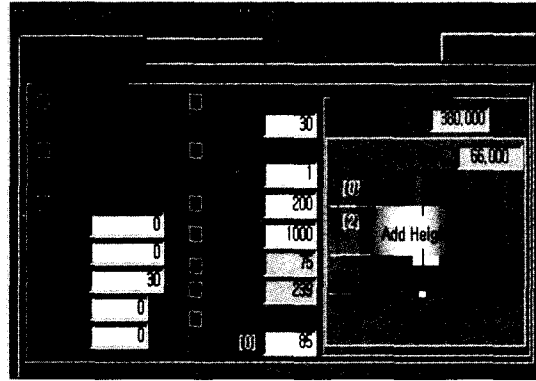


Fig. 9 Input data for workpiece setting

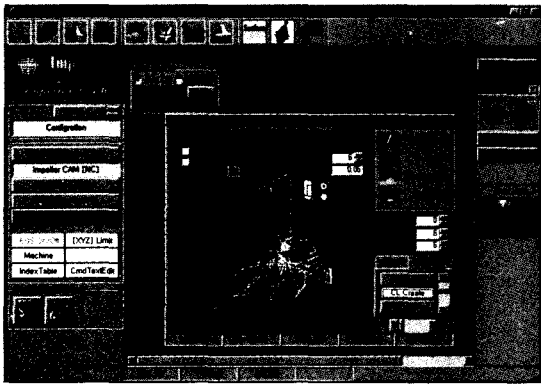


Fig. 10 Tool paths for impeller machining

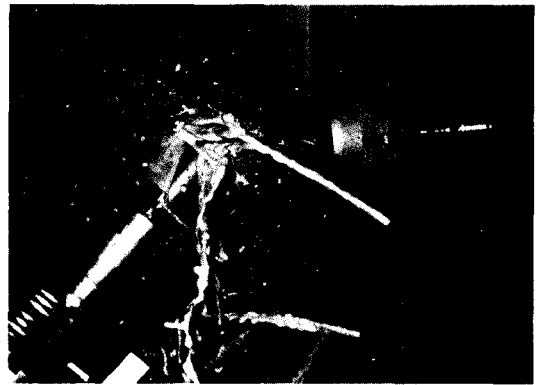


Fig. 11 5-axis impeller machining

는데, Fig. 8(a)는 (9)와 (10)식을 이용하는 A타입의 결과이고 Fig. 8(b)는 (13)와 (14)식을 사용하는 B타입의 결과이다. Fig. 8의 결과로 보면 A타입의 경우 양 곡선에서의 법선 벡터의 각변위 차가 적은 하부에서는 과절삭이 작게 발생하였고 각변위 차가 큰 상부에서는 과절삭이 크게 발생하여 블레이드의 형성에 문제점이 많음을 알 수 있었고, B타입의 경우에는 A타입과 유사한 현상이 발생하나 상부에서도 블레이드가 형성되어 과절삭이 A타입에 비하여 훨씬 작음을 알 수 있었다. 따라서 유체 공학적인 측면의 블레이드 설계 결과를 완전히 충족하는 가공을 할 수는 없지만 B타입의 공구 축 방향 벡터 결정이 A타입에 비하여 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있으나 ruled-surface를 형성하는 하나의 직선과 만나는 양 곡선에서의 법선 벡터의 각변위 차가 클 경우 가공오차를 많이 동반함을 알 수 있다.

Fig.9는 B타입에 대한 초기 세팅을 위한 데이터 입력 창



Fig. 12 Machined impeller

을 보여 주며, Fig. 10은 공구경로를 보여주고 Fig. 11은 가공 모습이며 Fig. 12는 B타입에 의한 전체적인 가공 결과를 보여 준다.

6. 결론

본 연구에서는 ruled-surface로 형성된 블레이드를 갖는 임펠러 가공을 위해 공구 축 방향 벡터를 구하는 두 가지 방법을 제시하였고 가공 결과를 비교하였다. 그리고 가공된 제품을 측정하여 가공오차를 분석하지는 않았지만 본 연구에서 제시된 B타입의 공구축 방향 벡터에 대한 가공 결과가 심미적 측면에서는 제품으로서의 응용 가능성을 발견할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 조현덕 외 6인, "Ruled-Surface로 형성된 임펠러 블레이드 전용 CAD/CAM 시스템 개발 I(모델링에 관한 연구)", 한국공작기계학회, 제10권, 제6호.
- (2) 조현덕 외, "Ruled-Surface로 형성된 임펠러 블레이드의 5-축 가공에 관한 연구", 한국공작기계학회 추계 학술대회, 2000.
- (3) 조현덕 외 5, "임펠러 5-축 CNC 가공에 관한 연구", 한국공작기계학회, 제6권, 제4호, 1997.
- (4) 전용태, 박세형, "Impeller 가공용 전용 CAM 시스템 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1994.
- (5) Gershon Elber, "Accessibility in 5-Axis milling environment" Computer-Aided Design, Vol. 26, No. 11, 1994.
- (6) Idemura, "Machining and Grinding By 5-Axis control machining center - for the workpiece with convex sculptured surface" JSPE, Vol. 57, No. 11, 1991.
- (7) Cho H.D., "A Study on 5-Axis Precision Machining for Sculptured Surfaces", Ph.D thesis, KAIST, 1993.
- (8) Suk-Hwan Suh, Jung-Jae Lee, and Sung-Ku Kim, "Flank Milling of Ruled Surfaces by the Additional-Axis Machining Method", J. of Manufacturing Systems, Vol. 18, No. 1, 1999.