

임펠러 5-축 CNC 가공에 관한 연구

조현덕*, 박종봉*, 윤문철**, 최두선***, 신보성***, 이상철****

A Study on the 5-Axis CNC Machining of Impeller

Hyun-Deog Cho*, Jung-Bong Park*, Moon-Chul Yoon**, Du-Seon Choi***,
Boo-Seong Shin***, Sang-Cheol Lee****

Abstract

The manufacture of an impeller typically requires the 5-axis CNC machining, since the impeller is usually under working conditions such as high speed, high temperature, and high pressure. Thus, this study contributes to development of an exclusive CAM system for effective 5-axis CNC machining of a ruled surface type impeller. In this study, the sampled impeller is made of blades and a body and the blade consists of ruled surfaces between hub curve and shroud curve. In the post processing for 5-axis NC part program, the cutter axis direction vector is the straighten vector on ruled surface. The position of ball center in ball end mill cutter is decided on the interference check between the cutter and body surface of impeller using with the modified z-map method that z-axis is the same of cutter axis direction vector. The exclusive CAM system for an impeller developed in this study was very effective for design and 5-axis machining of a ruled surface type impeller.

Keywords : Impeller(임펠러), 5-Axis Machining(5-축 가공), Cutter Axis Direction Vector(공구축 방향 벡터)

1. 서 론

임펠러(impeller)는 원심압축기 등에 사용되며, 고속으로 회전하며 유체의 압력을 높여 주거나 유체의 유동을 이용하며 회전 에너지를 발생시키는 역할을 한다⁽¹⁾. 임펠러의 운전조건은 고속·고온·고압인 경우가 많으며 고속

에서 질량중심이나 블레이드의 불균형이 존재하게 되면 심한 진동이나 파손등의 염려가 있고, 또한 고온에서 열팽창 불균형 등이 존재하면 크랙(crack)이 생길 가능성이 많다⁽²⁾. 따라서, 임펠러는 5-축 NC 기계가공에 의한 일체형으로 만드는 것이 가일층 효과적인데, 본 연구에서는 5-축 가공이 가능한 임펠러의 설계, 5-축 가공을 위한 포스트프로

* 경일대학교 기계공학과
** 부경대학교 정밀기계공학과
*** 한국기계연구원 CAD/CAM Lab.
**** 경산시청

세싱 방법 및 임펠러 전용 CAM 시스템 개발에 대하여 다루었다. 본 연구에서 개발된 임펠러 전용 CAM 시스템은 블레이드의 갯수를 다양하게 설계할 수 있으며 MAKINO 5-축 NC 기계로 가공할 수 있는 NC-code의 작성이 동시에 이루어진다.

임펠러는 몸체면에 블레이드(blade)가 둘레에 대하여 대칭으로 붙어 있는데, 블레이드의 양 끝단에는 허브 커브(hub curve)와 쉬라우드 커브(shroud curve)가 있으며 이 두 커브간에 곡면이 형성되어 블레이드가 만들어진다^[2]. 임펠러의 설계방법에는 Lamé Oval식을 이용하는 방법과 임의의 커브(curve)를 이용하는 방법 등 두 가지 방법이 있다^[1,2,3]. Lamé Oval식 이용법은 수식화가 가능하여 프로그램이 간단하게 되어 현장적용이 용이한 장점이 있는 반면 경험에 의한 곡선의 지정으로 유동 효율적 면에서 뒤떨어진다고 볼 수 있다. 그리고 임의의 커브 이용법은 일반화가 가능하여 복잡한 유체유동적인 결과 데이터를 바로 이용할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 후자인 커브 핏팅(curve fitting)된 두 개의 곡선에 대하여 ruled surface로 얻어진 곡면을 블레이드면으로 하는 일반적인 방법을 취하였다. 블레이드의 곡면가공은 볼 엔드밀의 측면으로 가공하는데, 공구축 방향 벡터는 ruled surface를 구성하는 직선의 방향 벡터의 양끝에서 공구반경 만큼 떨어진 법선 벡터의 끝단을 연결하는 벡터가 되며, 공구의 위치 벡터는 수정된 z-map 방법을 사용하여 임펠러 몸체면에 간섭이 발생하지 않도록 함으로써 결정하였다.

5-축 CNC 기계의 운동은 3개의 직선운동과 2개의 회전운동으로 구성된다. 5-축 기계는 2개의 회전운동을 어떻게 구성하는가에 따라 크게 다음과 같이 3가지 타입으로 분류되는데, 타입 A)는 주축두를 두 방향으로 기울 수 있는 5-축 기계이고, 타입 B)는 주축두를 한 방향으로 기울 수 있고, 작업 테이블을 한 방향으로 회전할 수 있는 것이며, 타입 C)는 작업 테이블을 두 방향으로 기울 수 있는 5-축 기계이다. 일반적으로 모든 5-축 기계는 위의 세가지 타입 중의 하나에 속하게 되는데, 포스트 프로세싱 부분에서 세 타입은 서로 다른 기하학적 특성을 갖고 있다^[4]. 본 연구에서는 타입 C)에 속하는 MAKINO 5-축 기계에 대하여 포스트 프로세싱^[5]을 수행하였다.

2. 임펠러 설계

임펠러는 고압부(pressure part)와 저압부(suction

part)의 두 개의 곡면으로 이루어져 있고 각각의 곡면은 허브 커브(hub curve)와 쉬라우드 커브(shroud curve)로 이루어져 있는데, Fig.1은 임펠러의 형상도면을 보여준다.

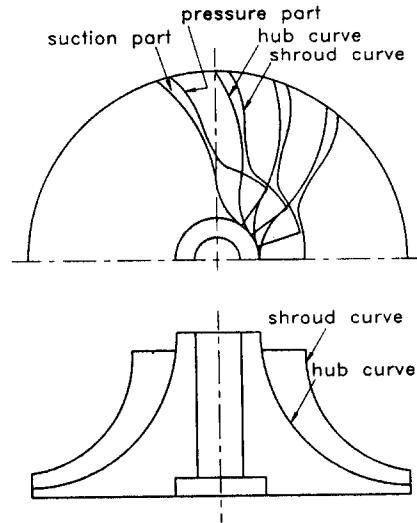


Fig.1 Shape of impeller

임펠러의 고압부와 저압부의 곡면은 허브 커브와 쉬라우드 커브에 대하여 직선으로 연결된 ruled surface로 주로 모델링 하는데, 이는 현장설계 및 최적설계에 있어서 계산을 단순화하고 5-축 가공시 볼 엔드밀 공구(ball end mill cutter)의 측면으로 이끄는 블레이드에 간섭을 일으키지 않으면서 매끄럽게 가공하기 위함이다.

2-1 Lamé Oval식을 이용한 설계

Lamé Oval식을 이용한 설계 방식은 투영(projection)영역에서의 타원(ellipse)들을 이용하여 블레이드를 구성하는 경험적 방법으로써, 임펠러 블레이드는 경험 데이터와 실험 데이터를 이용한 특성식으로 표현할 수 있다. 임펠러 블레이드는 Fig.2에서와 같이 두 단면에 대한 타원이 합쳐져 구성되는데, Z-R 평면에서의 타원식은 식(1)로 표현할 수 있고, X-Y 평면에서는 식(2)로 표현할 수 있다.

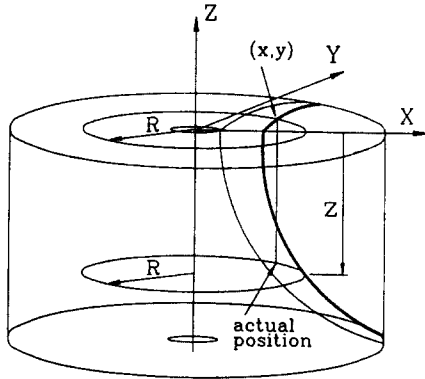


Fig.2 Design of impeller by Lamé Oval equation

$$\left(\frac{z-a}{b}\right)^p + \left(\frac{r-c}{d}\right)^q = 1 \quad (1)$$

$$\left(\frac{x-a}{b}\right)^p + \left(\frac{y-c}{d}\right)^q = 1 \quad (2)$$

식(1)과 식(2)에서 p, q는 유동해석 및 경험으로 결정되고, a, b, c, d는 허브 곡선과 쉬라우드 곡선의 경계조건으로 결정된다. 여기서, 상수 p, q, a, b, c, d는 서로 다른 값을 갖는 것으로 $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}, p_{ijk}, q_{ijk}$ 로 표기할 수 있는데, 첨자 i는 허브 및 쉬라우드의 첫 자 h와 s로 표현하고, 첨자 j는 X-Y 및 Z-R 평면을 구분하는 첨자 1과 2로 표현하며, k는 고압부와 저압부의 첨자 p와 s로 표현할 수 있다. 임펠러 블레이드의 묘사에 있어서 (x, y)위치값은 임의의 x에 대하여 식(2)로 y를 구하고, z값은 $r=(x^2 + y^2)^{1/2}$ 를 (1)식에 대입하면 구할 수 있다.

2-2 임의의 곡선을 이용한 설계

임의의 곡선을 이용한 설계 방법에서 주어진 조건은 허브와 쉬라우드 커브에 대한 임의의 위치 값인데, 이러한 허브 및 쉬라우드를 정의하는 점 데이터들을 먼저 커브 핏팅(curve fitting)하고 핏팅된 곡선에 대하여 ruled surface를 묘사함으로써 임펠러 블레이드를 모델링할 수 있다. 물론, 이러한 절차는 고압부와 저압부에서 각각 이루어져야 한다. 본 연구에서의 커브 핏팅은 Ferguson 커브 핏팅 방법을 사용하였는데, 이를 본 연구에서 구현하고자 하는 임펠러에 적용하기 위해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_i^{jk}(u) = UCS_i^{jk} \quad (3)$$

$$= [1 \ u \ u^2 \ u^3] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i^{jk} \\ P_{i+1}^{jk} \\ t_i^{jk} \\ t_{i+1}^{jk} \end{bmatrix}$$

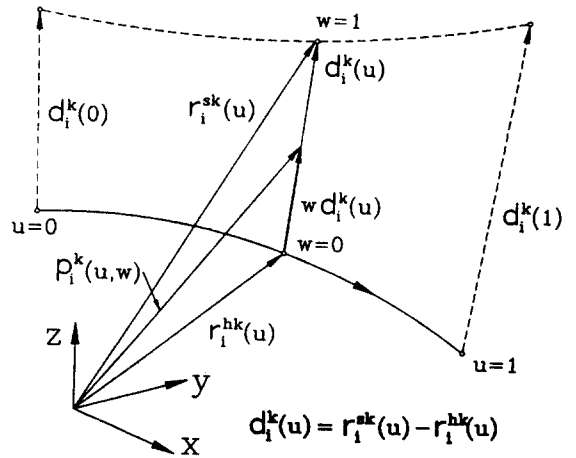


Fig.3 The blade surface represented by ruled surface

여기서 첨자 j는 허브 커브측과 쉬라우드 커브측을 의미하는 첨자로 h와 s가 있고, 첨자 k는 고압부측과 저압부측을 의미하는 첨자로 p와 s가 있다. 그리고 첨자 i는 커브내에 있는 점 데이터를 의미하는 것으로 0부터 n까지이며, u는 매개변수로 [0, 1]의 범위에 있다. 여기서 복합 Ferguson 커브 핏팅 조건으로 모든 위치 점에서 접선 벡터(tangent vector)를 구하고 식(3)을 이용하여 모든 커브의 미러한 곡선에 대한 위치 벡터를 연속적으로 구할 수 있다.

위에서 묘사된 커브들에 대하여 임펠러의 고압부나 저압부중 한 면에 대하여 ruled surface 모델을 사용하여 임펠러의 곡면을 묘사할 수 있다. Fig.3은 ruled surface 모델을 사용하여 블레이드 곡면을 표현하는 방법을 묘사하고 있는데, 본 연구에서의 블레이드를 모델링하는데 초기조건으로 각 커브에 대한 정보는 유체역학적 측면에서 최적의 임펠러 설계가 이루어져서 점 데이터가 주어졌다

고 한다. 만일 주어진 점 데이터가 ruled surface를 묘사하는데 적합하지 않을 경우에는 전체 복합 커브에 대하여 동일한 갯수로 다시 분리하여 ruled surface 모델을 적용시켜야 한다. 즉, 식(3)의 $r_i^k(0)$ 와 $r_i^k(1)$ 이 재정의 되어야 한다. Fig.3의 ruled surface로 묘사되는 블레이드면(blade surface)의 임의의 위치벡터 $p_i^k(u, w)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_i^k(u, w) = r_i^{hk}(u) + w(r_i^{sk}(u) - r_i^{hk}(u)) \quad (4)$$

여기서, $r_i^{hk}(u)$ 는 허브 커브이며 $r_i^{sk}(u)$ 는 슈라우드 커브를 의미하며, w 는 $r_i^{hk}(u)$ 에서 점 $p_i^k(u, w)$ 까지의 길이비(length rate)이다.

따라서 식(3)과 식(4)를 고압부와 저압부에 대하여 적용하면 한 개의 블레이드 곡면이 정의되고, 블레이드의 갯수만큼 몸체면의 중심축에 대하여 몸체면 둘레에 회전 배열을 시키면 임펠러를 모델링할 수 있다.

3. 5-축 가공을 위한 포스트 프로세싱

3-1 공구 크기 선정

볼 엔드밀 공구(ball end mill cutter) 크기 선정은 블레이드와 몸체면이 만나는 블렌딩 면(blending surface)의 곡률 반경과 동일한 크기를 선택해야 한다. 그런데 곡률 반경이 너무 작은 경우 블레이드 곡면가공에서 공구의 처짐이 크게 발생하여 가공이 어렵거나 가공성이 아주 떨어질 수 있는 단점이 있다. 그래서 라운딩 반경보다 큰 공구를 사용하여 선가공한 후 작은 직경의 공구를 사용하여 블렌딩 면만 재가공하는 방법을 선택할 수도 있다. 곡률 반경보다 큰 공구를 사용하더라도 블레이드면 사이의 공간에서 공구축과 블레이드 곡면과의 간섭이 발생하지 않는 공구직경으로 제한해야 한다.

3-2 임펠러 블레이드의 곡면 가공

3-2-1 공구축 방향 벡터

임펠러 블레이드 곡면의 가공은 볼 엔드밀의 측면으로 가공하는데, 공구축 방향 벡터는 Fig.4에서와 같이 ruled surface를 구성하는 직선의 방향벡터 $d_i^k(u)$ 의 양 끝에서 공구반경 R만큼 떨어진 법선 벡터의 끝단을 연결하

는 벡터 $d_i^k(u)$ 가 된다. 여기서 $d_i^k(u)$ 벡터와 $d_i^k(u)$ 벡터는 동일한 벡터이므로 공구축 방향 벡터 $T_i^k(u)$ 는 다음 식과 같다.

$$T_i^k(u) = r_i^{sk}(u) - r_i^{hk}(u) \quad (5)$$

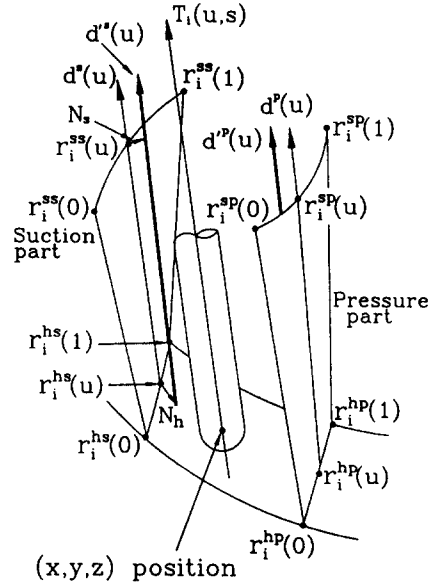


Fig.4 The cutter axis direction vector for impeller machining

3-2-2 공구의 위치 벡터

일반적으로 3-축 가공의 볼 엔드 밀링에서는 NC-code를 위한 공구의 위치 벡터를 주로 볼 엔드밀 공구의 볼 끝점(nose point)으로 CL-data를 묘사하지만 5-축 가공에서의 CL-data는 기준 설정을 달리할 필요가 있다. 이는 5-축 기체의 회전 운동인 A와 B에 의하여 정확한 위치 파악이 어렵고 심지어 공구의 셋팅 길이에 따라서도 가공형상이 달라지고, NC-code의 위치 벡터가 공구의 nose 점이 아니라 pivot point⁽⁴⁾이기 때문이다. 그래서 본 연구에서 임펠러 5-축 가공을 위하여 볼 엔드 밀 공구의 구 중심을 기준으로 회전하는 것으로 볼 수 있으므로 공구의 위치 벡터인 CL-position을 볼의 중심점으로 지정한다. 따라서 가공중 임펠러의 몸체면과 간섭이 발생하지 않도록 볼 엔드밀 공구의 CL-position의 설정은 공구

의 볼 부분과 임펠러 몸체면의 간섭 체크로 결정할 수 있다. 본 연구에서 간섭 체크 알고리즘으로 z-map 방법을 수정하여 적용할 수 있는데, 이 때, z값은 공구축 방향 $T_i^k(u)$ 방향으로의 위치값이므로 몸체면의 좌표변환이 필요하다.

3-3 임펠러 몸체면 가공

표면조도를 좋게 하고 공구마모를 줄이기 위하여, 임펠러의 몸체면 가공은 볼 엔드밀 공구의 노즈(nose) 부분에서의 가공을 피하기 위하여 아래에서 위로 up-ward 가공을 한다. 그리고 임펠러의 몸체면은 상부와 하부에서의 폭의 차이가 있기 때문에 공구경로의 설정에 대하여 Gershon Elber등은 커셉 높이(cusp height)에 따라 공구경로를 결정하는 3가지 방법을 제안하였는데⁽⁶⁾, Fig.5의 (a)는 isocurve인 원통 중심에 대하여 일정 각도로 결정하는 기존 공구경로 결정 방식이며, (b)는 볼 엔드밀의 특성상 동일 공구경로 폭에 대해서 커셉 높이가 비슷하다는 원리에 의하여 가공면 중앙을 기준으로 하여 동일한 공구경로 폭을 유지하는 공구경로를 결정한 것이며, (c)는 가공면의 양끝을 기준으로하여 커셉이 일정한 가공면이 생성되도록 공구경로 폭을 최적 계산하여 결정한 것이다. (a)는 가공의 비능률성이 있으며 커셉 또한 균일하지 못하여 폴리싱에 문제점이 남는다. (b)는 (a)에 비해 가공의 비능률적 측면에서 양호한 가공이라고 볼 수 있으나 블레이드와 만나는 블렌딩 표면에서 볼 자국이 남기 때문에 여전히 폴리싱에 어려움이 있다. 그러나 (c)는 두 결점을 제거하는 최적의 공구경로 결정 방법으로 평가할 수 있다. 본 연구에서의 CAM 소프트웨어에는 우선 적용하기가 가장 쉬운 (a)방법을 선택 하였지만, 앞으로 계속 연구가 이루어 진다면 세 가지 방법을 모두 적용시켜 사용자의 선택에 맡기고자 한다.

그리고, 양쪽의 블레이드에 간섭이 일어나지 않도록 공구축 방향 벡터를 결정해야 한다. Fig.4에서 $d_i^s(u)$ 와 $d_i^p(u)$ 는 몸체면 양단에 있는 블레이드의 ruled surface에서의 직선방향 벡터이므로 블레이드 면의 가공에서도 공구축 방향 벡터가 ruled surface의 직선 벡터와 바로 일치하지는 않고, 직선 벡터와 블레이드면의 두 곡선과 만나는 두 위치에서의 두 법선 벡터상에서 공구 반경만큼 떨어진 두 위치점의 연결로 결정된다. 따라서 이 때 결정된 양 끝단의 블레이드면 가공을 위한 공구축 방향 벡터

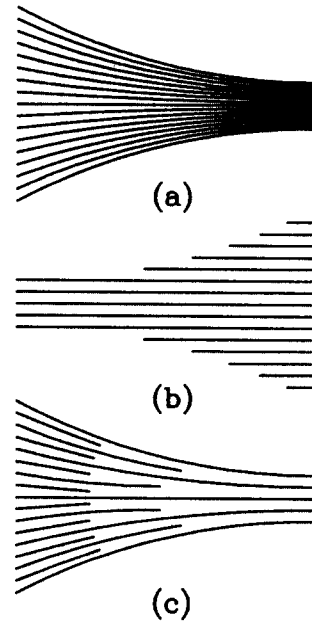


Fig.5 Cutter path for the machining of impeller body

를 $d_i^s(u)$ 와 $d_i^p(u)$ 라고 하면, $d_i^s(u)$ 와 $d_i^p(u)$ 사이에서의 공구축 방향 벡터 $T_i(u,s)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_i(u,s) = (1-t)d_i^s(u) + td_i^p(u) \quad (6)$$

여기서 $t = \frac{s}{s_0}$: curve length ratio

s_0 : $r_i^{hp}(u)$ 와 $r_i^{hs}(u)$ 사이의 curve length

s : $r_i^{hp}(u)$ 로부터 공구위치까지의 curve length

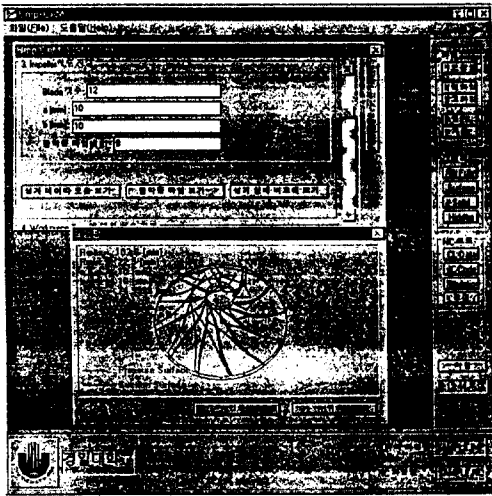
3. 결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 임펠러 전용 CAM 소프트웨어의 입력 항목은 크게 9가지로 분리하였는데, 다음과 같다.

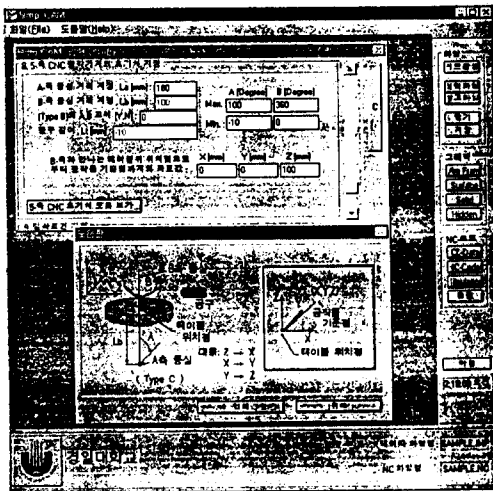
- (1) blade 측정 data의 filename 지정
- (2) blade의 curve fitting method 지정
- (3) impeller 치수 지정
- (4) workpiece type에 대한 치수 지정
- (5) 공작물 type에 따른 공작물 좌표 기준점 지정

- (6) 가공원점(G92) 지정
- (7) 5-축 CNC 공작기계의 Type 지정
- (8) 5-축 CNC 공작기계의 초기치 지정
- (9) 절삭조건 지정

Fig.6(a)는 위 (3)의 임펠러 치수 지정을 나타내고, Fig.6(b)는 (8)의 MAKINO 5-축 CNC 공작기계(Type C)의 초기치 지정을 보여 주고 있다. 본 연구의 임의의 곡선을 이용한 설계방법이 적용된 개발된 임펠러 전용 CAM 소프트웨어를 사용하면 Fig.6(a)와 같이 블레이드 갯수에 따라 다양한 설계를 쉽게 할 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig.6 Input forms of the exclusive CAM system for an impeller

Table 1 Design and cutting conditions

항 목		지정 값
측정 포인터 데이터 갯수		5개
curve fitting 방법		Ferguson
블레이드의 갯수		12개
임펠러 상돌출부(a)		10 mm
임펠러 하돌출부(b)		10 mm
공작물	Type	원통형(B)
	직경	210 mm
	높이	100 mm
	기준위치	하부중심
가공원점에서 공작물 기준위치 값		(0, 0, 0)
공작물 기준위치로부터 초기공구위치		(0, 0, 200)
공작기계 Type		C
A-axis 중심거리		180
A-axis 최대각도		100°
A-axis 최소각도		-10°
B-axis 최대각도		100°
B-axis 최소각도		-10°
B-축과 만나는 테이블 위 위치점으로부터 공작물 기준점까지의 좌표값		(0, 0, 100)
공구의 절삭속도		500 rpm
공구의 이송속도		100mm/min
공구반경		4 mm
공구경로 횟수		20회

개발된 임펠러 전용 CAM 소프트웨어에 Table 1의 설계 및 가공조건을 지정하여 볼 엔드 밀의 볼 중심점의 위치 데이터를 나타내면 Fig.7과 Fig.8이 된다. Table 1의 측정 포인터는 편의상 5개를 지정하였는데, 허브와 쉬라우드의 양 끝단과 중간에 3개를 지정하였다. 본 연구의 5-축 가공에 대해서는 CL-position을 5-축의 특성을 고려하여 공구 위치 및 가공 형태의 묘사에 최근접시킬 수 있는 볼 엔드 밀의 볼 중심을 지정하도록 하였는데, Fig.7과 Fig.8은 CL-data를 의미하며 Fig.7은 X-Z 평면에 대한 표현이고 Fig.8은 X-Y 평면에 대한 표현이다. Fig.7에서 표현된 점들이 임펠러를 가공하는데 필요한 CL-point를 의미하며 점이 있는 부분이 임펠러의 몸체면을 나타내고 CL-point가 없는 부분이 블레이드를 나타내는데, 이는 블레이드는 볼 엔드밀 공구의 측면으로 가공되

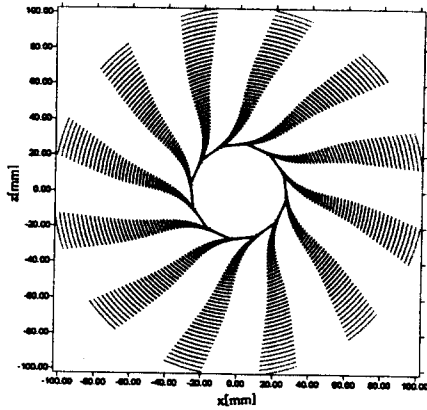


Fig.7 The representation of CL-data on X-Z plane

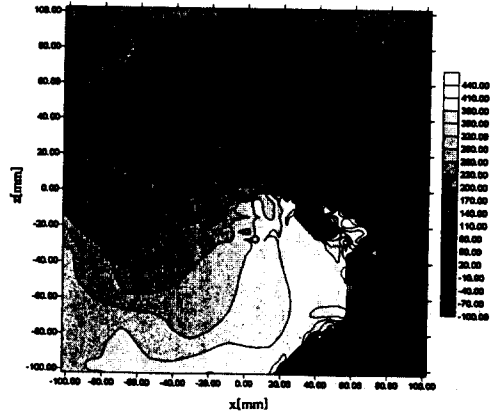


Fig.10 The representation of rotation angle B on X-Y plane

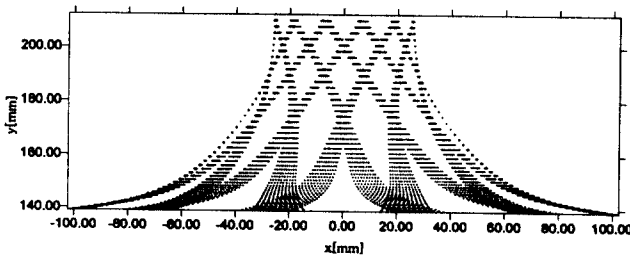


Fig.8 The representation of CL-data on X-Y plane

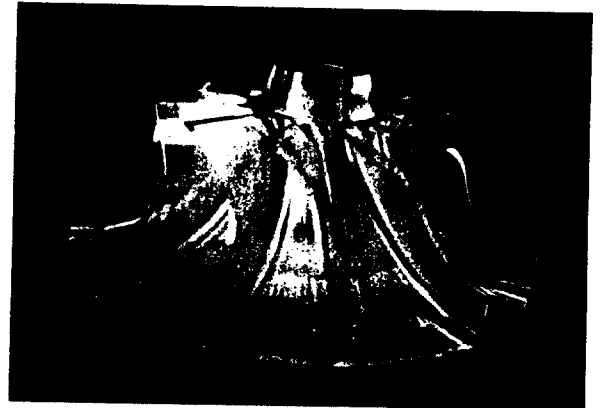


Fig.11 The result of a 5-axis NC machined impeller

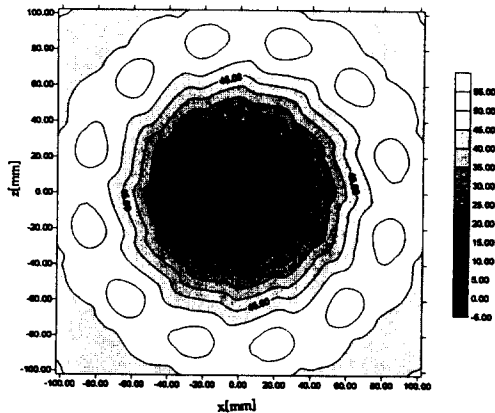


Fig.9 The representation of tilting angle A on X-Z plane

고 공구의 반경이 4mm이므로 넓게 표현되어 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig.9와 Fig.10은 MAKINO 5-축 NC 공작기계의 축의 기울기 A와 B를 의미하는 것으로 Table1로 부터 블레이드의 갯수가 12개이므로 대칭이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있고, Fig.10의 기울기 B는 360° 부근과 0° 부근에서 표현상의 큰 각도 차이로 그리드(grid)의 분할이 미세하게 많이 이루어졌으나 실제 각도 차이를 음수화 하면 차이가 연속적임을 알 수 있다. Fig.11은 가공된 임펠러의 결과물을 보여 주는 것으로 본 연구에서 개발된 임펠러 전용 CAM S/W가 산업현장에 바로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

가공의 어려움으로 단순한 임펠러만 설계하는 제약조건을 탈피하여 일반화된 임펠러를 가공 할 수 있었고, CAM 소프트웨어화 함으로써 본 연구의 알고리즘을 바로 현장에 적용할 수 있다. 그리고 본 연구에서 채택한 압축기용 임펠러 뿐만 아니라 ruled surface로 설계되고 공구의 측면으로 가공할 수 있는 모든 형태의 임펠러 가공에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발된 임펠러 전용 CAM S/W를 다른 5-축 기계에서도 적용될 수 있도록 할 필요성이 있고, 역시 다양한 형태의 임펠러 가공이 가능하도록 기능확장이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 전용태, 박세형, "Impeller 가공용 전용 CAM시스템 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp 217-220, 1994
2. 한국기계연구원, "임펠러 5-축 가공을 위한 CAM 시스템 개발에 관한 연구", 연구보고서, 1994
3. 이상철, "5-축 CNC 머시인을 이용한 임펠러 가공", 경일대학교 산업대학원 석사학위논문, 1996
4. H.D.Cho, Y.T.Jun and M.Y.Yang, "Five-axis CNC milling for effective machining of sculptured surfaces", Int. J. of Prod. Res., Vol.31, No.11, pp 2559-2573, 1993
5. Makino, "Programming Manual for Makino 5-Axis MC", 1991.
6. Gershon Elber and Elaine Cohen, "Tool path Generation for Freeform Surface Models", 2nd ACM Solid Modeling '93-5 / Montreal, Canada, 1993
7. Vickers, G W et al, " Ball-Mills Versus End-mills for Curved surface Machining" Journal of Engineering for Industry(Trans. of the ASME) Vol.111, February, pp 22-26, 1989
8. Park, J.W., " Optimal CL Data for 5-Axis NC Machining of Sculptured Surface", M.E. Thesis, KAIST, 1991