

룰드 곡면으로 된 임펠러의 5 축 황삭 가공에 관한 연구

장동규[#], 임기남^{*}, 양균의^{**}

A Study on Five-Axis Roughing of Impeller with Ruled Surface

Dong Kyu Jang[#], Ki Nam Lim^{*} and Gyun Eui Yang^{**}

ABSTRACT

This paper presents an efficient 5-axis roughing method for centrifugal impeller. The efficient roughing is minimization of cutting time through minimizing tool tilting and rotating motions. To minimized cutting time, machining area is divided into sub-cutting regions using control points on hub curves and shroud curves of blade used to design and analyze centrifugal impeller. For sub-cutting regions, diameters of cutting tools are determined as big as possible. Then, tool paths are generated with the tilting axis and rotating axis of 5-axis machine limited and fixed, which can give more efficient machining speed and machining stability than the conventional methods.

Experimental results show that the proposed method is more efficient than the conventional methods to mill with the only one cutting tool without dividing area and the previous methods to mill with simultaneous 5-axis processing with dividing area.

Key Words : Centrifugal impeller (임펠러), Five-axis roughing (5 축 황삭), Tool path plan (공구 경로 계획), Ruled surface (룰드 곡면), Dividing cutting area (가공 영역 분할)

1. 서론

급변하는 자동차, 항공기 산업 기술에 발맞추어 터보기기의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으며 이에 따라 연료전지 자동차, 제트엔진이나 추진체 등과 같은 터보기기의 핵심부품으로 임펠러가 많이 사용되고 있다. 임펠러는 고속회전을 하면서 유체를 압축하는 회전체로 유체의 흐름을 원활하게 할 수 있도록 설계되며 형상이 복잡하기 때문에 5 축 가공을 이용하여 가공한다.

5 축 가공은 항공기 부품(회전체류), 터빈 블레이드, 프로펠러 등의 방산분야와 타이어 금형, 공구 제작 업체 등에서도 포괄적으로 사용되고 있고, 그 수요 또한 증가함에 따라 5 축 가공 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Hong¹ 과 Morishige² 는 데이터 생성 시 매개변수 곡면을 이용한 간섭제거와 공구부하조절에 관한 연구를 하였고, Kang³ 은 황삭가공의 최적자세와 공구셋을 산출하였으며, Suh⁴ 는 황삭가공을 할 수 있도록 영역을 구분하여 3 축 가공기에 부가축

접수일: 2006 년 7 월 4 일; 게재승인일: 2007 년 4 월 26 일

교신저자: 전북대학교 대학원 기계공학과

E-mail: dkjang@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2322

* 전북대학교 대학원 기계공학과

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

을 부착하여 가공하는 방법을 제시하였다. Cho 와 Jang⁵⁻⁸ 은 간접 확인을 위한 계산식을 줄이기 위해 임펠러의 생성 곡선 위의 특성점을 이용하여 영역을 나누고 공구를 선정하여 황삭 가공하는 방법을 제시하였고, Jang⁹ 은 영역을 나누어 공구의 간섭이 없는 공구 축 방향 벡터를 결정하고 가공 시 공구의 처짐과 떨림에 의해서 발생하는 오차에 대해 연구하였다. Cho¹⁰ 는 임펠러의 형상 특징을 고려하여 블레이드면의 가공 면의 오프셋을 이용하여 경로를 생성하는 방법에 대한 연구를 수행하였고, Robert¹¹ 는 공구가 이동할 수 있는 최대영역을 정의하고 각각의 개별영역으로 나누어 가공하는 방법을 제시하였다. 또한 Young¹² 은 가공 시 공구 마모를 줄일 수 있도록 공구에 일정한 절삭력이 걸리도록 황삭가공을 실시하는 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 5 축 가공기의 기구학적인 동작을 고려하여 NC 데이터를 생성함으로써 실제 가공 시간을 단축하여 생산성을 향상시킬 수 있는 방법에 대해서 제시한다. 그리고 가공 경로 생성을 위해서는 가공영역을 분할하고 분할된 영역에서 동일한 잔삭량이 남으면서 공구의 움직임 최소화 하는 황삭 가공 경로 생성 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제안하는 방법은 가공영역의 분할은 계산 시간을 줄이기 위해 룰링 라인(ruling line)과 가공 공구 자세 벡터(machining tool attitude vector)를 이용하여 영역을 나누어 각 영역별로 가공 축 벡터를 정의한다. 가공할 때는 생성한 가공 경로의 거리보다 테이블의 tilt & rotate 에 의해서 실제 가공 경로의 거리가 더 늘어남으로써 가공 시간이 길어지는 것을 방지하기 위해서 각 영역에 대해서 정의된 가공 축 벡터로 기계의 tilt & rotate 축을 고정시킨 후 X, Y, Z 축의 움직임에 의해 가공을 실시하는 방법을 제시한다. 또한 제시된 방법의 효율성을 검증하기 위해 기존 방법과의 비교 결과를 제시한다.

2. 임펠러의 모델링

Fig. 1 은 룰드 곡면(ruled surface)으로 된 전형적인 임펠러의 형상으로 압축면(pressure surface), 흡입면(suction surface), 리딩에지(leading edge)와 트레일링(tailing edge)로 구성된 블레이드와 허브면(hub surface)을 나타낸다. 그리고 블레이드면(pressure surface, suction surface)은 쉬라우드(tip shroud)와 허브곡선(hub curve) 사이의 룰링 라인으로 형성된 룰

드 곡면이다

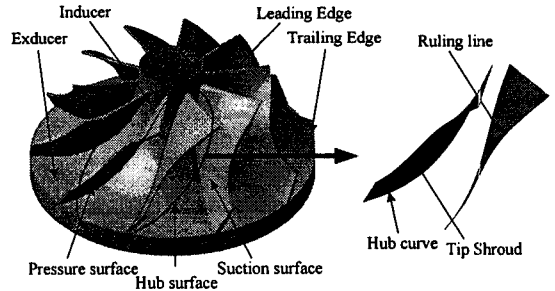


Fig. 1 Components of impeller

3. 황삭 가공 경로 계획

Fig. 2 는 임펠러를 가공하기 위한 절차를 보여주고 있다. 본 논문은 이러한 절차 중에서 황삭가공 경로 생성에 대해서 다룬다.

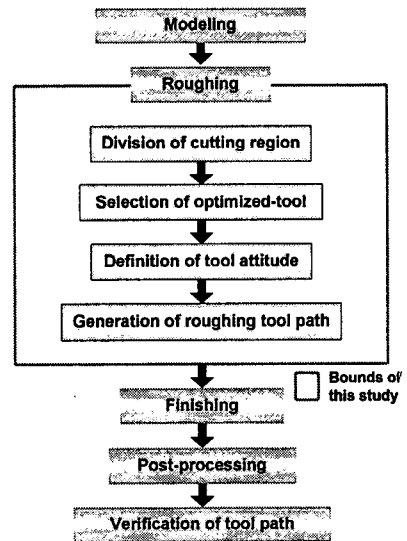


Fig. 2 Machining procedure of impeller

황삭 가공 경로 계획에서는 언더컷이 발생하지 않도록 영역을 분할하고 공구에 일정한 절삭력이 가해질 수 있도록 절삭 깊이와 경로간의 간격을 조절하며 적절한 잔삭량이 남을 수 있는 가공 경로 생성 방법에 대해서 고려하였다.

3.1 영역 정의

Fig. 3 과 같이 압축면과 흡입면에 대해서 롤드 라인이 쉬라우드, 허브 곡선과 만나는 점을 각각 익스듀서(exducer)로부터 인듀서(inducer)까지 n 개의 점으로 정의한다.

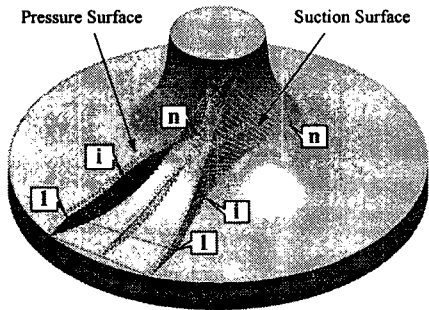


Fig. 3 Definition of point on hub curve and shroud curve

Fig. 4 는 블레이드의 쉬라우드와 허브곡선에 있는 n 개의 점과 그 점들로부터 구한 가공 공구자세 벡터들을 보여준다. 가공 공구자세 벡터는 압축면의 쉬라우드 상의 i 번째 점 Ppsi 와 흡입면의 쉬라우드 상의 i 번째 점 Pssi 와의 중점을 찾고, 허브 곡선 위의 점에 대해서도 같은 방법으로 중점을 찾아서, 허브 곡선상의 중점과 쉬라우드 상의 중점을 연결하여 정의한다. 여기서 P 는 점(point)을 의미하며 V 는 공구자세 벡터를 의미한다. 그리고 첫 번째 첨자 p 는 압축면, s 는 흡입면, m 은 중면(middle surface)를 나타내고 두 번째 첨자 h 는 허브 곡선 그리고 s 는 쉬라우드를 의미한다.

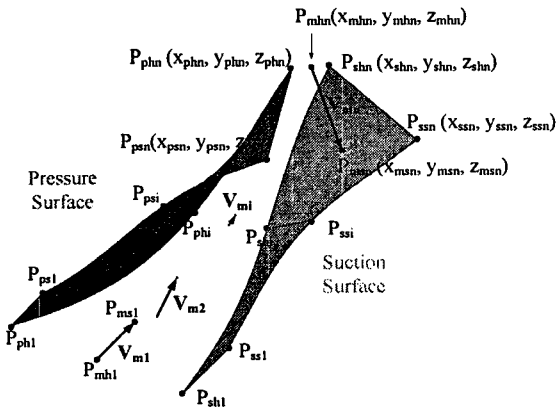


Fig. 4 Determination of the view vectors

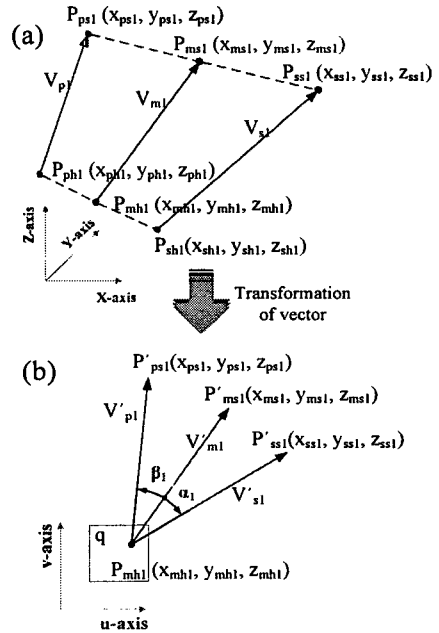


Fig. 5 Analysis of the view vectors at the first point

Fig. 5 는 첫번째 점(i=1)에서, (a)는 3 차원상의 Pphi 과 Psh1 에 의해서 만들어진 Pmhl 그리고 Ppsi 과 Pssi 에 의해서 만들어진 Pms1 을 이용하여 공구자세 벡터 Vm1 을 정의한 것을 나타낸다. (b)는 각각 Vp1 과 V's1 의 시작점 Pphi 과 Psh1 를 Pmhl 으로 이동시켜 V'p1 과 V's1 을 얻고, 생성된 P'ns1 과 P'ss1 및 Pmhl 을 지나는 평면 q1 을 구한 후 이 평면에 Vm1 을 수직으로 투영시켜서 V'm1 을 구한다. 이때 V'm1 으로부터 V'p1 까지 CCW 방향을 기준한 각을 beta1, V'm1 으로부터 V's1 의 CW 방향을 기준한 각을 alpha1 이라고 하면, i 는 1 에서 alpha1 > 0, beta1 > 0 인 것을 알 수 있다. 이것은 공구자세 벡터 Vm1 을 가공 축벡터로 지정하여 이 방향으로 공구가 진입을 하여 가공하면 Vp1 에 해당하는 압축면과 V's1 에 해당하는 흡입면을 언더컷이 발생하지 않고 가공할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 에서 Fig. 5 와 마찬가지로 방법으로 i 번째 점에서 모습을 보여주려고 있다. 먼저, 벡터 Vmi 을 찾은 후 각 벡터들의 시작점(허브 곡선 위의 점)에서 Pmhi 점으로 각 벡터를 공간 이동시키고, 평면 qi 를 구한 후 (b)와 같이 V'ni, V'si, V'mi 을 얻는다. 이때 i 번째 공구자세 벡터 Vmi 에 대해서 V'ni, V'si 과 비교해 보면, 임펠러의 회전방향이 CCW 이므

로 각도 α_i 는 작아지는 경향을 보이고, 각도 β_i 는 커지는 경향을 볼 수 있다. 각도 α_i 가 작아져서 0 이 된 후 (-)의 각도를 가지게 되는데, α_i 가 (-)의 각도가 되면 흡입면에서 언더컷이 발생하여 이 면을 가공할 수 없기 때문에 이 0 이 되는 각도까지의 점에서 I 영역을 정의한다.

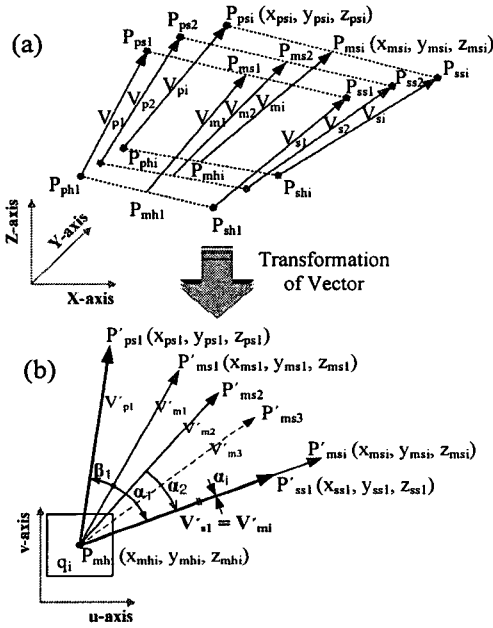


Fig. 6 Analysis of the view vectors

제 I 영역을 결정한 후 그 다음 점부터 위의 과정을 반복하여 II, III 영역에 대해서 정의한다. Fig. 7은 이와 같은 방법으로 구한 제 I 영역을 보여준다.

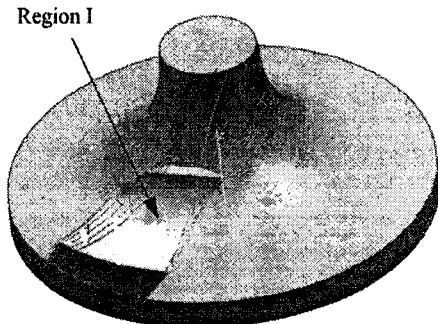


Fig. 7 Division of cutting area (Region I)

3.2 최대크기 공구 선정

황삭 가공은 가공 정밀도 보다는 가공 효율, 즉 가공 시간과 가공비용을 우선적으로 고려하여 많은 양을 최대한 빠른 시간에 가공을 해야 한다. 본 논문에서는 분할된 각각의 영역 안에서 하나의 공구로 가공할 수 있는 최대 공구를 선정하였다.

Fig. 8 에서 압축면과 흡입면 사이의 거리가 가장 가까운 허브면 부분을 기준으로 계산된 공구의 최대 직경은 D_1 이지만 황삭 가공 여유량(C_R)을 적용하여 계산하면 D_2 가 영역 I에서의 최대 직경을 알 수 있다. 따라서, 사용가능한 최대직경은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_1 \leq (D_2/2), D_2 = D_1 - C_R \quad (1)$$

여기서, D_1 은 압축면과 흡입면 사이의 최단거리이고, D_2 는 각 블레이드면으로부터 황삭 여유량만큼 오프셋한 면 사이의 최단거리이다.

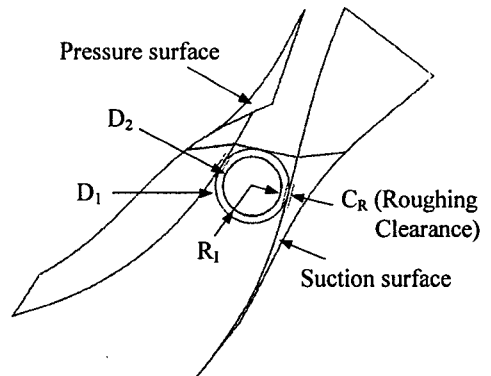


Fig. 8 Tool selection

3.3 가공경로 생성 방법

가공경로 생성 시 고려해야 할 사항은 가공하는 동안 공구에 일정한 절삭 깊이가 될 수 있도록 하는 것과 황삭 가공을 완료한 후의 잔삭량이 각 면에 일정하게 남도록 하는 것이다.

Fig. 9(a)는 n 개의 영역으로 나눈 영역 분포와 각 영역에 대한 최대 크기의 절삭 공구를 선정 한 후 각 공구에 따른 축방향으로의 절삭 깊이를 나타낸다. 임펠러의 블레이드 형상 특성상 I 영역이 II, III 영역에 비해 큰 공구가 들어갈 수 있으므로 절삭 깊이가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있고,

II와 III 영역은 깊이 차이가 거의 없다.

Fig. 9(b)는 가공 축방향에서 보았을 때의 경로로써, 양쪽 블레이드 면에서의 잔삭량을 일정하게 하기 위해 블레이드를 따라가는 경로를 생성하였다. 이때 1 경로는 양쪽의 블레이드 면에서 같은 거리만큼 떨어진 경로이다. 그리고 2, 3 경로는 블레이드 면에 평행하게 가공할 수 있도록 각 면으로부터 절삭 간격만큼 오프셋 된 경로이다. 가공 경로는 1-2-3 순으로 공구가 진입하고, 1 경로에 대해서는 공구 전체에 절삭력이 걸리기 때문에 그림 (a)에서 나타난 절삭 깊이 방향으로도 두 번에 걸쳐서 가공하도록 하여 절삭력을 반으로 줄였고, 2, 3 경로는 한 번에 절삭이 이루어지도록 하였다. 이와 같은 방법을 사용하면 공구의 절삭력이 일정하게 유지하면서 잔삭량이 기존 방법과 동일하게 남은 경로를 생성할 수 있다.

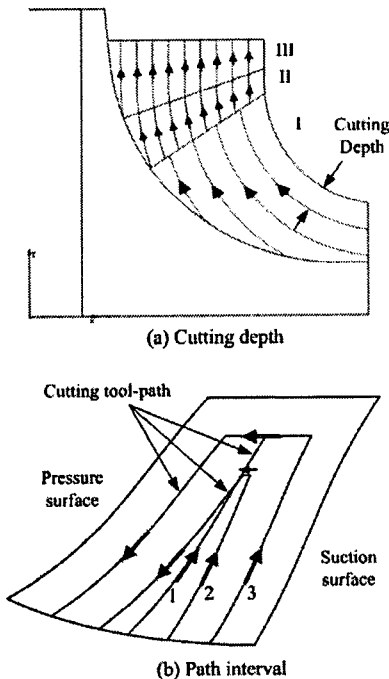


Fig. 9 Tool path strategy

4. 가공경로 생성 및 가공

4.1 가공경로 생성

사용된 임펠러 형상은 10 개의 블레이드가 있는 직경 128mm, 높이 58mm 인 임펠러 모델을 이용하

여 황삭 가공경로를 생성하였다.

가공 영역은 세 개의 영역으로 나뉘어져 I 영역은 Ø10mm 블랜드밀 공구를 사용하였고, II와 III영역에 대해서는 Ø6 mm 블랜드밀 공구를 사용하여 가공경로를 생성하였다. 이 두 공구에 대한 가공 조건은 table 1 에서 보여주고 있다.

Table 1 Machining conditions

Tool	Ø10 mm	Ø6 mm
Feedrate (mm/min)	300	300
Spindle rate (rev/min)	3000	3000
Step-over of tool path (mm)	3	2
Depth of cut (mm)	4	2.5
Residual (mm)	0.2	0.2

Fig. 10 은 생성된 공구경로를 보여주고 있다. Fig. 10(a)는 영역 I, (b)는 영역 II, (c)는 영역 III에 대한 공구경로를 보여준다.

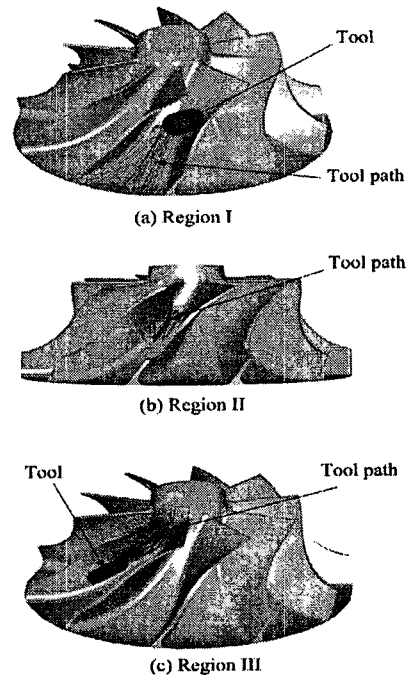


Fig. 10 Tool path generation for cutting regions

4.2 임펠러 가공

임펠러 가공은 먼저 소재를 선반을 이용하여 쉬라우드 형상을 따라서 가공을 한 후에 5 축 가

공기를 이용하여 블레이드 가공을 수행하였다.

Fig. 11 은 임펠러의 쉬라우드 형상을 따라서 윤곽을 보여주는 것으로 선반을 이용하여 가공한 형상을 나타낸다. 소재의 재질은 내식성이 뛰어난 계열인 알루미늄(AL6061-T6)으로 직경 128mm, 높이 58mm 이고, 블레이드의 개수는 10 개로 블레이드의 날개와 날개 사이의 회전각도가 36° 인 임펠러를 가공하였다.

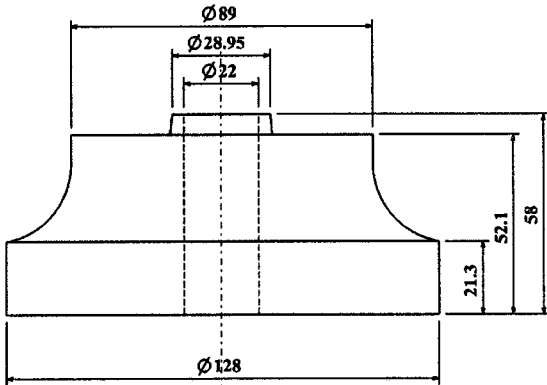


Fig. 11 Drawing of dummy impeller

지그(jig)는 임펠러 5 축가공기의 stroke over 를 고려하여 174.88mm 의 두께를 가질 수 있도록 하였다. 정삭을 위한 여유량은 0.2mm 로 설정하였다.

하나의 날개의 공구경로 데이터만을 생성하여 데이터를 회전시켜 10 개의 날개를 가공할 수 있으므로 하나의 날개의 공구경로 데이터를 5 축 가공기에 입력하였다.

Fig. 12 는 본 논문에서 사용한 수평형 5 축 머시닝센터(Mitsuseiki HU50A)를 보여준다.

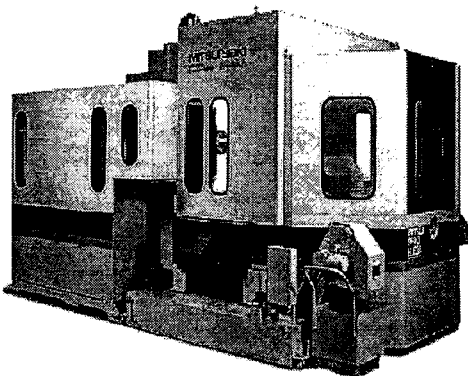


Fig. 12 5-axis machining center

Fig. 13 은 I 영역의 가공된 모습을 보여주고 있다.

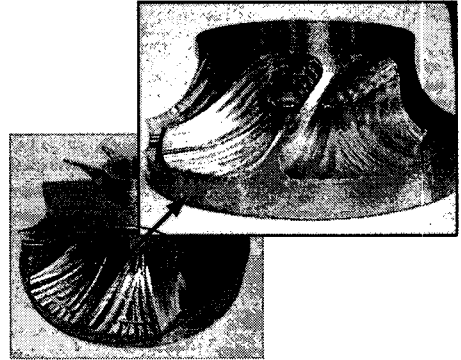


Fig. 13 Roughing of region I

Fig. 14 와 Fig. 15 는 II 영역과 III 영역을 가공한 후의 모습이다.

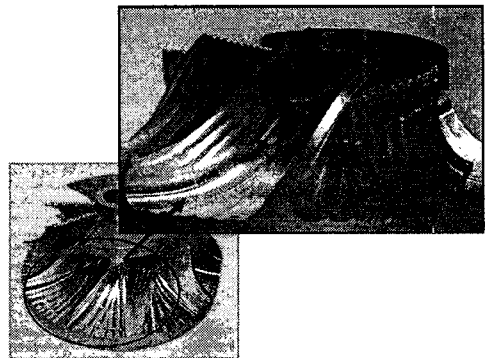


Fig. 14 Roughing of region II

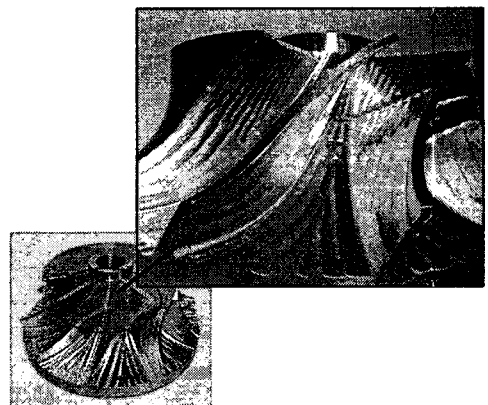


Fig. 15 Roughing of region III

Fig. 16 은 각 영역별로 가공된 모습과 각 영역의 분할부분(화살표)을 관찰할 수 있다.

(1)은 II영역과 III영역의 경계부분을 나타내고, (2)는 I영역과 II영역의 경계부분으로 커슥이 발생한 것을 볼 수 있다. 이 경계는 압축면보다 흡입면에 더 크게 나타나는데, 그 이유는 압축면은 오목한 형태로 면 위의 두 점에서의 면에 대한 법선은 교차하는 반면에, 흡입면은 볼록한 형태로 면 위의 두 점에서의 면에 대한 법선은 교차하지 않기 때문이다.

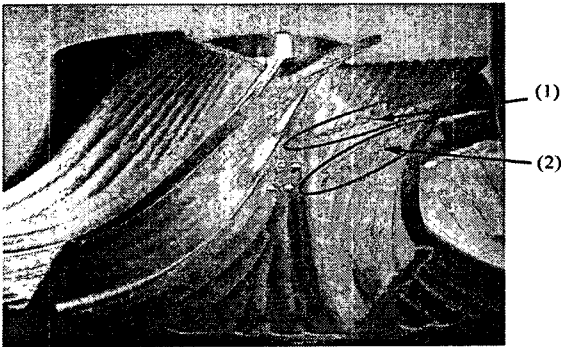


Fig. 16 Overlaps of cutting space of regions

4.3 잔삭량 확인

잔삭량 확인에서는 황삭 가공을 끝낸 임펠러의 황삭 여유량의 두께를 측정한다. 3 차원 측정기를 이용하여 황삭 가공을 한 임펠러의 가공한 부위를 측정하고, 이 측정한 데이터에서 3 차원 점 데이터를 추출하여 가공 전에 설계했던 모델의 면 데이터와 수직거리를 측정하여 잔삭량의 두께를 측정한다. Table 2 은 가공한 임펠러를 측정하기 위하여 사용한 3 차원 측정기의 사양을 보여준다.

Table 2 Specifications of CMM

Model	1076C
Overall Dimensions(mm)	X : 1490, Y : 2340, Z : 2717
Resolution (mm)	0.0005
Accuracy(μm), (L : mm)	U1=3.0+(L/250) U3=3.5+(L/250)
Repeatability (mm)	0.0003
Max. Velocity(mm/sec)	250

Fig. 17 은 임펠러를 측정하고 있는 모습을 보여준다. 측정은 압축면과 흡입면에 대해서 각각 쉬라우드로부터 허브까지 30%와 70% 지점에서 측정기의 프로브를 접촉시켜서 3 차원 점 데이터를 받아들였다.

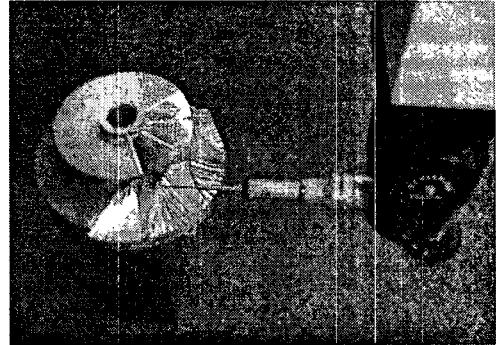


Fig. 17 Measuring of impeller

Fig. 18 은 측정을 통하여 얻은 데이터를 임펠러 모델과 비교하기 위하여 3 차원 상의 모델에 측정한 점 데이터를 비교해 놓은 그림이다.



Fig. 18 Comparison CAD model with measuring points

임펠러는 회전체이므로 바닥면과 임펠러의 외경을 기준으로 모델링 데이터와 측정 데이터의 Z 좌표축을 일치시킬 수 있다. 그리고 X 와 Y 좌표축에 대해서는 측정할 때 하나의 블레이드와 그 양 옆의 블레이드에 대해서도 측정하여 Z 축을 기준으로 회전시켜서 X 와 Y 좌표축에 대해서 모델 데이터와 3 차원 측정기에 의한 측정데이터의 좌

표축을 일치시켜서 블레이드면과 측정점과의 수직 거리를 분석한다. Table 3 는 측정된 점과 모델링면의 수직거리, 그리고 면 위의 점을 나타낸다.

Table 3 Analysis of the measured points

No.	Measured Point			Model Point			Distance
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	46.97694	-40.01750	20.25898	47.74802	-39.17041	19.46670	0.39278
2	43.55829	-35.46343	22.05415	44.33482	-34.55928	21.34070	0.38907
3	41.70050	-32.65521	23.61759	42.46325	-31.75046	22.96059	0.35351
4	39.89219	-29.64352	25.63555	40.63989	-28.75737	25.01783	0.31374
5	38.97412	-26.30705	29.25271	39.72380	-25.43749	28.61846	0.31165
...
8	35.73821	-19.57688	35.45858	36.68292	-18.27678	34.32895	0.96438
...
41	40.14327	-14.58048	36.33668	39.56689	-15.33278	37.05774	0.19084
...
62	27.12535	-1.89090	44.77397	26.95635	-2.98375	45.57156	0.36346
63	27.47850	-0.71484	46.49039	27.36369	-1.75163	47.28828	0.31330
64	28.60705	1.35832	48.93553	28.56658	0.26351	49.87763	0.44492
Average							0.41354

블레이드에서 측정점까지의 거리는 0.19084mm ~ 0.96438mm 사이의 값을 나타내고 있고 평균치는 0.41354mm 이다. 이것은 가공 경로를 생성할 때 고려한 정삭 여유량(0.2mm)와 볼엔드밀의 사용으로 인한 경로간의 커슴량(0.8mm)으로서 정삭여유량과 커슴량의 합 1.0mm 보다 작음을 알 수 있다.

4.4 실험 고찰

본 논문에서 제시한 황삭 영역을 분할하여 각 영역별로 tilt & rotate 축을 고정하고 최적 공구를 선정하여 가공을 하는 방식의 효율성 검증을 위해서 두 가지 방식의 가공경로와 비교하였다. 첫째, 전체영역을 단일공구로 동시 5 축 가공방식의 가공경로와 비교 검토하였고, 둘째로는 황삭 영역을 분할하고 각 영역별로 최적 공구를 선정하는 동시 5 축 가공방식의 가공경로와 비교 검토하였다.

Table 4 는 영역을 분할하지 않고 하나의 공구를 가지고 전체 영역을 동시 5 축 가공방식으로 가공한 일반적인 방법과 비교하였다. 단, 단일공구의 경로는 데이터 산출을 통해 수치적으로만 제시하여 결과를 비교하였다. 하나의 날개에 대한 가공 데이터를 36° 씩 회전하여 임펠러 모델을 가공할

수 있으므로 하나의 날개에 대한 가공 시간을 비교하였다. 이것은 영역 분할과 가공 시에 기계의 tilt & rotate 움직임을 억제하여 얻을 수 있는 시간적인 감소에 대해서 살펴볼 수 있다.

Table 4 Comparison of conventional and proposed method

Path	Proposed method		Conventional method
	Ø6 BEM	Ø10 BEM	Tool diameter(mm)
Tool diameter(mm)	Ø6 BEM	Ø10 BEM	Tool diameter(mm)
Step-over(mm)	2	3	Step-over(mm)
Depth of cut(mm)	2.5	4	Depth of cut(mm)
Feedrate(mm/min)	300		300
Cutting time(min)	17.50		31.11

기존의 단일 공구를 이용하는 방법에 의한 가공시간은 31.11 min 인 반면에 본 논문에서 제시한 방법에 의한 가공시간은 17.50 min 으로 43.75% 절감되는 것을 볼 수 있다. 여기서 BEM 은 ball end mill 공구를 나타낸다.

Table 5 는 황삭 영역을 분할하여 각 영역별로 최적 공구를 선택하여 동시 5 축 가공을 한 기존에 제시한 논문(Ref. 6)을 참조하여 가공경로의 거리, 가공시간 그리고 잔삭량을 살펴봄으로써 기계의 기구학적 움직임을 제한한 조건이 미치는 영향을 검토하였다.

Table 5 Comparison of previous method and proposed method

Tool	Machining parameter	Proposed method	Previous method
Ø10 BEM	Cutting distance (mm)	4123.46 mm	28596.47 mm
	Cutting time (min)	6.02 min	8.03 min
Ø6 BEM	Cutting distance (mm)	9810.79 mm	41890.37 mm
	Cutting time (min)	11.48 min	16.70 min
Total time (min)		17.5 min	24.78 min
Residue (mm)		0.964 mm	1.0 mm

Ø10mm 와 Ø6mm 인 공구를 이용하여 같은 조건하에서 가공한 결과를 분석해 보면, 가공 시간

이 기존의 방식은 24.78 min 인 반면에 본 논문에서 제시하는 방법은 가공시간은 17.5 min 으로 29.4% 절감되는 것을 알 수 있다. 또한 잔삭량에 대해서는 분석한 결과 1.0mm 이내에 같은 분포로 형성되는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 룰드 곡면으로 이루어지고 스플리터가 없는 경우의 임펠러의 황삭 가공시간의 감소를 위한 방안을 제시하였다.

허브 곡선과 쉬라우드가 곡면 위의 룰드 라인과 만나는 교차점을 이용하여 축벡터를 정의하고, 영역을 나누어 각 영역에서 5 축 가공기의 동시 5 축(simultaneous tilting and rotating motions) 테이블을 축벡터로 고정시키고, 최대크기의 공구를 정의하여 가공 경로를 생성한 방법 즉, 각 영역별로 고정된 최적의 자세로 가공을 실시하는 방법으로 5 축가공기의 기구학적 동작의 최적화를 통해 가공의 물리적 안정과 함께 가공 시간을 상당히 줄일 수 있었다.

실험 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제시하는 영역별 고정된 5 축가공 방식은 잔삭량을 기존의 방법과 비슷하게 남기면서 가공시간을 단축할 수 있었다.

참고 문헌

- Hong, S. H. and Lee, K. W., "Automatic tool selection and path generation for NC rough cutting of sculptured surface," Journal of the Korean Society for Precision Engineer, Vol. 11, No. 6, pp. 28-41, 1994.
- Morishige, K. and Takeuchi, Y., "5-axis control rough cutting of an impeller with efficiency and accuracy," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1241-1246, 1997.
- Kang, J. H., Suh, S. H. and Lee, J. J., "Rough cut tool path planning in fewer-axis CNC machining," Journal of the Korean Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 2, No. 1, pp. 19-27, 1997.
- Suh, S. H., Lee, J. J. and Kim, S. K., "Multiaxis machining with additional-axis NC system : theory and development," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 14, No.12, pp. 865-875, 1998.
- Jang, D. K., Cho, H. Y., Lee, H. K., Kong, Y. S. and Yang, G. E., "A Study on Tool path Generation for Machining Impeller with 5-axis NC Machine," Asia Pacific Forum on PSFDT, pp. 211-218, 2002.
- Cho, H. Y., Jang, D. K., Lee, H. K. and Yang, G. E., "A study on efficient roughing of impeller with 5-axis NC," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 27, No. 11, pp. 1917-1924, 2003.
- Jang, D. K., Shin, J. K., Lee, H. K., Ro, S. H. and Yang, G. E., "A Study on Tool path Generation for Machining Impeller with 5-axis NC Machine," Asia Pacific Forum on PSFDT, pp. 253-261, 2003.
- Jang, D. K., Cho, H. Y., Lee, H. K., Kong, Y. S. and Yang, G. E., "A study on tool path generation for machining splitter type impellers with 5-axis Machining Center," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 83-90, 2004.
- Jang, D. K., Shin, J. K., Hong, S. K., Lee, H. K. and Yang, G. E., "A Study on Reverse Engineering and 5-axis NC Machining of Impeller," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 60-68, 2004.
- Cho, H. D., Jung, D. I., Yoon, M. C., Choi, D. S., Shin, B. S., Lee, E. S. and Dong, Y. G., "The development of exclusive CAD/CAM system for impeller blades formed by ruled surface II (A study on the 5-axis machining)," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 1-7, 2002.
- Gian, R., Lim, T. W. and Lin, A. C., "Planning of tool orientation for five-axis cavity machining," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 22, No.1-2, pp. 150-160, 2003.
- Young, H. T., Chung, L. C., Gerschwiler, K. and Kamps, S., "A five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 23, No.3-4, pp.233-239, 2004.