

< 논문 >

반응표면법을 이용한 5축 임펠러 정삭 가공의 최적화

임 표[†] · 양 균 의*

(2007년 4월 3일 접수, 2007년 7월 20일 심사완료)

Optimization of Finish Cutting Condition of Impeller with Five-Axis Machine by Response Surface Method

Pyo Lim and GyunEui Yang

Key Words: Impeller(임펠러), Five-axis Machining(5축가공), Finish Cutting(정삭가공), Optimal Cutting Condition(최적절삭조건), Response Surface Method(반응표면법)

Abstract

An impeller is a important part of turbo-machinery. It has a set of twisted surfaces because it consists of many blades. Five-axis machining is required to produce a impeller because of interference between tool and workpiece. It can obtain good surface integrity and high productivity. This paper proposes finish cutting method for machining impeller with 5-axis machining center and optimization of cutting condition by response surface method. Firstly, cutting methods are selected by consideration of operation characteristics. Secondly, response factors are determined as cutting time and cutting error for prediction of productivity. Experiments are projected by central composite design with axis point. Thirdly, regression linear models are estimated as single surface in the leading edge and as dual surface in the hub surface cutting. Finally, cutting conditions are optimized.

1. 서 론

기호설명

- S : 제곱합(sum of squares)
- ϕ : 자유도(degree of freedom)
- V : 평균제곱(means squares)
- F_0 : 분산비(variance ratio)
- t : t 검정값
- P : P 검정값
- R^2 : 결정계수(coefficient of determination)

터보차저, 가스터빈 등의 시스템에서 사용되는 터보기기의 핵심 부품 중의 하나인 압축기는 유체의 압력을 상승시키는 나선 펌프의 회전 관련 부품을 통칭한다. 크게 원심형, 혼합형, 축류형 등으로 구분하는데, 원심형이 압축비가 크고 소형 경량화 및 구조의 단순화가 가능하기 때문에 많이 사용된다.⁽¹⁾ 임펠러는 원심형 압축기의 핵심 부품으로 유체역학적인 곡면 특징을 가지며, 매우 복잡한 3차원 형상이기 때문에 가공하기가 쉽지 않다.⁽²⁾ 또한 연속적으로 배열된 꼬인 형태의 블레이드의 집합으로 이루어져 있어 공구 축방향이 고정된 3축 가공에 의해서는 미가공 영역이 발생하여 대부분 5축 가공으로 가공하게 된다.⁽³⁾ 5축 가공은 이와 같은 언더컷(undercut)으로 인한

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 공업기술 연구소
E-mail : satanr@lycos.co.kr
TEL : (063)270-2322 FAX : (063)270-2315
* 전북대학교 기계항공시스템 공학과

문제점을 해결할 수 있고, 곡면가공에 있어서 다양한 공구 자세의 선택으로 면 품질을 향상시킬 수 있다는 장점도 있다. 하지만, 절삭공정의 복잡성으로 인하여 재료(stock)와 공구 간의 충돌 등의 문제가 발생할 수 있는데,⁽⁴⁾ 후처리 공정(post processing)으로 얻은 공구 경로를 시뮬레이션을 통하여 검증하는 방법으로 해결하고 있다. 그렇지만, 5축 가공방법은 복잡한 절삭 환경으로 인한 가공경로 및 가공조건 선정 등에 있어서 어려움이 많으며, 이에 공구선정 및 가공경로 생성에 대한 연구가 많이 수행되고 있으며,^(5,6) 원심 압축기용 임펠러에 적용되기도 하였다.⁽⁷⁾ 가공공정에서 생산성에 영향을 끼치는 조건 등을 선정하는 것은 공정 특성에 따라 다르기 때문에 많은 어려움이 존재하며, 이를 최적화하는 연구는 주로 3축 가공에서 진행되었다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

그러므로, 임펠러의 가공시에 주요 공정인 '정삭'의 생산성에 미치는 특징을 명확하게 인지하고, 가공조건 등을 최적화하여 조건변화에 따른 생산성을 예측할 수 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 통계적 분석 방법인 반응표면법을 채용하여 축차 방식에 의한 중심합성 계획에 의한 실험을 설계하였고, 생산성 예측과 최적 가공조건 등을 선정하고자 생산성을 나타내는 반응변수를 결정하고 독립변수인 가공조건 간의 관계를 나타내는 선형모델을 추정하여 최적 가공조건을 선정하는 방법을 제시하였다.^(11,12)

2. 효율적인 임펠러 가공

임펠러 가공은 크게 금속 제거량이 가장 많은 황삭 가공과 면품질을 좌우하는 정삭 가공으로 나눌 수 있다. 전자는 절삭시간당 금속 제거율을 높일 수 있는 방향으로 가공계획을 세우며, 후자는 가공시간 및 가공정밀도를 모두 고려해야 한다. 정삭가공은 다시 리딩에지(leading edge) 가공, 허브면(hub surface) 가공, 블레이드 곡면(blade surface) 가공으로 나누며, 각 공정의 특성을 고려하여 제품의 성능에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 가공되어야 한다. 또한, 가공계획에서 가공 전략, 가공방법 또는 공구의 접근(approach) 및 후퇴(retract) 등은 양적 변수가 아닌 질적 변수이기 때문에, 반응표면법에 의하여 요구하는 생산성에 영향을 끼치는 수학적 변수가 될 수가 없다. 이

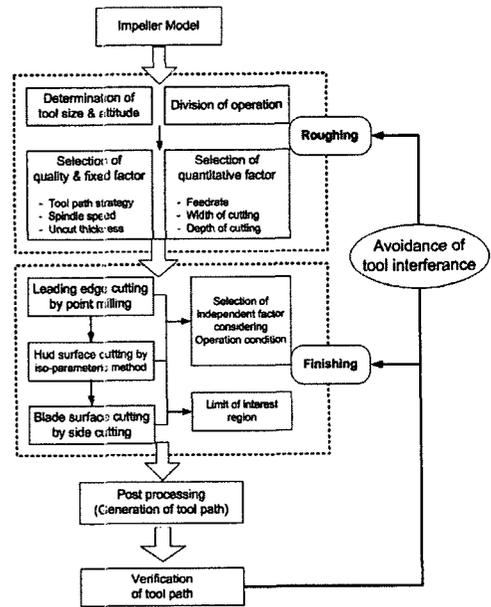


Fig. 1 Procedure of machining operation for impeller parts

에, 공정 특성에 맞게 가공방법을 선택하고, 이를 바탕으로 양적변수인 가공조건을 주 관심영역에서 최적화하여 임펠러 가공의 효율성을 도모할 수 있는 방법론을 제시하였다. Fig. 1은 임펠러 5축 가공을 효율적으로 수행하기 위한 세분화한 공정 순서도를 보여준다.

단계를 설명하면, 효율적인 임펠러 가공 공정을 확립하기 위해 먼저 공정의 특징을 고려하여 적절한 가공방식과 공구선택이 이루어진다. 그리고 공정특성에 따른 생산성을 나타내는 반응 변수를 결정하여 선택된 가공전략에 따라 반응변수에 영향을 끼치는 인자들을 독립변수로 선정하였다. 이때, 정삭가공에 이러한 반응 변수들을 적용할 때에는 공정 특성에 따라 세부적인 변수 선정에 있어서 차이를 고려하였다. 독립변수의 수준을 정함에 있어서 현장의 특성을 고려하여 변수의 영역을 제한하는 흥미영역(interest region)을 탐색하고 조절하는 작업이 이루어졌다.

모든 실험이 완료된 후 모델에 대한 분산분석과 계수 추정의 유의성을 검증하여 반응변수와 독립 변수들 간의 적합한 선형모델을 추정하였고, 결정계수를 통하여 모델의 적합도를 검사하여 생산성 예측모델을 결정하였다.

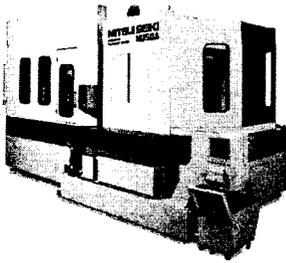


Fig. 2 Five axis machining center

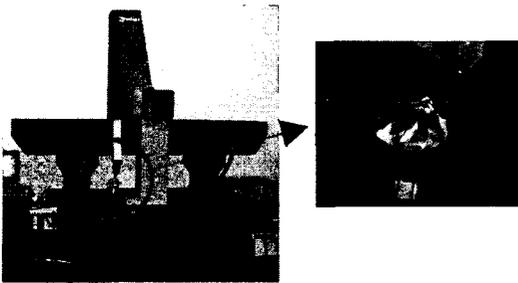


Fig. 3 Coordinate Measuring Machine

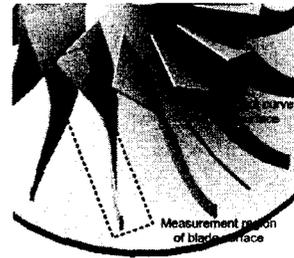


Fig. 4 Measurement region for cutting error

3. 실험장치

3.1 5축 머시닝센터

Fig. 2는 임펠러 정삭가공을 수행하기 위한 5축 가공기인 Mitsubiseki Hu50A를 보여준다. 이 장비는 최고 주축회전속도가 12,000이며, 이송속도는 36,000mm/min(x,y,z)과 3,600deg/min(B)이다.

3.2 가공오차 검사

임펠러 정삭 가공 후 가공오차를 검사하기 위하여 3차원 측정기를 이용하였다. Fig. 3은 점 데이터를 얻기 위하여 사용되어진 CMM(Coordinate Measuring Machine)인 Duck-in 1076C를 보여준다.

가공오차는 획득된 점 데이터(cloud data)와 특성곡선에 의한 모델 데이터를 비교하여 정의되었는데, 허브면에 존재하는 곡선을 따라 11번 반복 측정을 한 후 평균값을 취하였다. 블레이드의 압축면과 흡입면에서 팁 슈라우드쪽에서 허브면으로 2mm 떨어진 곳에서 측정되었다. Fig. 4는 특성곡선을 이용하여 모델링된 9개의 블레이드를 가진 임펠러 형상 부분에서 정삭 가공의 허브면과 블레이드면의 가공오차를 결정하기 위한 측정 영역을 보여주고 있다.

Table 1 Primary finish cutting conditions

Cutting part	Type of tool	Feedrate (mm/min)	Spindle (RPM)
Leading edge	Tapered ball Ø3	150	2700
Hub surface	Tapered ball Ø3	350	4000
Blade surface	Tapered ball Ø3	250	2700

리딩에지 면은 라운드된 면의 특징상 CMM 장비로 데이터를 얻기가 어려워 가공면의 라운드가 R-게이지를 통한 오차범위 내에 존재하는지를 파악하였다.

4. 반응표면법에 의한 실험설계

4.1 정삭가공 전략 및 반응변수 선정

정삭가공은 남아있는 미가공 부분을 제거하여 허용한도 내의 가공정밀도를 얻기 위한 공정으로 현장에서 요구하는 허용오차 내에서 수행되어야 하며, 가공시간은 적을수록 좋다 이처럼 정삭가공에서 생산성을 나타내는 변수로는 가공시간만큼 가공정밀도가 중요하다. 이에 정삭가공의 생산성을 파악하기 위하여 적용된 반응표면법에서 반응변수로 가공시간과 가공오차를 선정하였다. 정삭가공은 리딩에지 가공, 허브면 가공, 블레이드면 가공 순으로 수행되는데, 두 반응변수는 각 세부공정별 특징에 맞게 채용되었고, 임펠러 특성을 고려하여 현장에서 일반적으로 사용되는 가공방식을 채택하였다. Table 1은 각 단계에서 선택된 공구와 기초 가공조건을 보여주고 있다.

리딩에지의 가공경로는 에지(edge)면을 부드럽게 유지하기 위한 포인트 밀링(point milling) 방식을 선택하여 공구가 에지면의 바깥인 슈라우드에

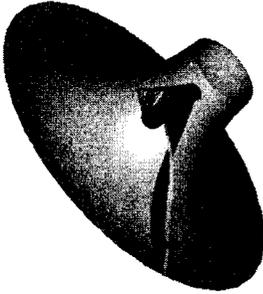


Fig. 5 Tool path in the leading edge

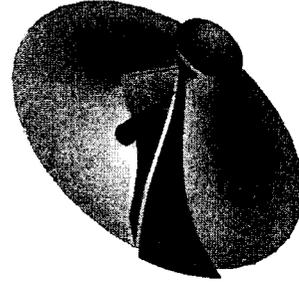


Fig. 6 Tool path in the hub surface

서 안쪽인 허브면으로 연속하여 경로를 생성 (crossing flow-point milling)하도록 하였다. 허브면은 유체역학적인 면 특징을 살려 공구가 리드 쪽의 중심부로 삽입(center slot, in at lead method) 되어 곡면 방향을 따라 가공(longitudinal method)하도록 하였다. 블레이드 곡면의 경로는 트레일링 에지에서 리딩 에지를 따라 이동하는 방식(a-and b-side method)을 채택하여 블레이드면을 따라 사이드커팅(side cutting)을 수행함으로써 면의 품질을 향상시키도록 하였다. 또한, 이 모든 방식은 상향 절삭(climb milling)으로 수행되었다.

4.2 독립변수 및 고정변수 선정

정삭가공에서 반응변수에 영향을 가지는 독립변수는 많이 있지만, 효과적인 실험의 설계를 위하여 독립변수의 수를 3개 이하로 제한하였다. 또한, 독립변수는 리딩에지 가공, 허브면 가공, 블레이드면 가공의 특징을 고려하여 선정되었다. 이는 세부적인 가공방식의 차이와 같은 변수라도 공정별 흥미영역이 다르기 때문이다. 독립변수를 선정하기에 앞서서 수학적인 변수로 변환되기 힘든 질적 변수와 실험의 제한에 따른 인자들은 고정하였다. 공구는 기초조건에서 사용된 것과 같이 모두 Ø3인 테이퍼공구를 사용하였고, 이송속도와 함께 절삭속도를 결정하는 주축회전수는 가공시간에 영향을 가지지 않기 때문에 고정하였다.

공구간섭(tool interference)를 검증하기 위하여 p3max를 이용하였다. Fig. 5는 리딩에지의 가공을, Fig. 6는 허브 정삭 가공을, Fig. 7은 블레이드면의 사이드 가공을 수행한 모습을 보여주고 있다. Fig. 8은 Vericut(version 5.4)을 이용하여 공구 경로 검증한 후 최종 형상을 보여준다.

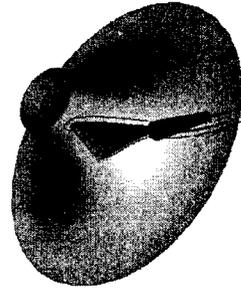


Fig. 7 Tool path in the blade surface

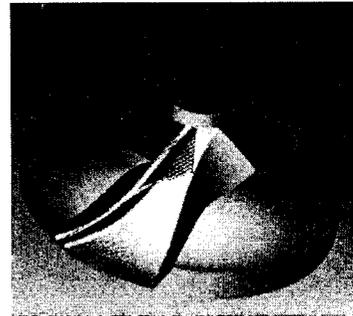


Fig. 8 Verification of tool interference and uncut region for finish cutting

직교 중심 합성계획에 의하여 변수를 흥미영역으로 변환해야 하는데, 이 때 a 값은 a=2로 정하였다. 리딩 에지 가공의 경우에는 독립변수를 분당이송속도(x_1), 리딩 에지의 가공경로수(x_2)로 정하였으며, 식 (1)과 (2)를 이용하여 변환하였다.

$$x_1 = \frac{\text{Feedrate (mm/min)} - 150}{25} \tag{1}$$

$$x_2 = \frac{\text{Nmbor of path} - 22}{3} \tag{2}$$

Table 2 Parameter level for leading edge cutting

Parameter	Level				
	-2	-1	0	1	2
Feedrate(x_1) (mm/min)	100	125	150	175	200
No of tool path (x_2)	16	19	22	25	28

Table 3 Parameter level for hub surface cutting

Parameter	Level				
	-2	-1	0	1	2
Feedrate (x_3) (mm/min)	200	275	350	425	500
Tilting angle (x_4) (°)	-5	-2.5	0	2.5	5
Stepover (x_5) (%)	20	30	40	50	60

Table 2는 리딩에지 가공에서 5수준으로 표현된 흥미영역에서의 독립변수를 보여준다.

허브면 가공의 경우에는 독립변수가 분당이송속도(x_3), 틸팅각(x_4), 절삭폭(x_5)이며, 식 (3), (4), (5)를 이용하여 변환하였다.

$$x_3 = \frac{\text{Feedrate (mm/min)} - 350}{75} \quad (3)$$

$$x_4 = \frac{\text{Tilting angle (°)}}{2.5} \quad (4)$$

$$x_5 = \frac{\text{Stepover(\%)} - 20}{5} \quad (5)$$

Table 3은 허브면 가공에서 5수준으로 표현된 흥미영역에서의 독립변수를 보여준다.

블레이드면 가공의 경우에는 사이드 커팅의 특성상 변수가 많지 않기 때문에 기초 가공조건으로 수행되었다.

5. 가공시간 및 가공오차의 예측모델

5.1 리딩에지 가공

반응변수를 가공시간만으로 선택한 리딩에지 가공의 경우에는 단일 반응모델(single regression model)을 추정하였는데, Table 3은 중심점에 축차를 가진 중심합성 계획에 의하여 얻은 리딩에지면의 가공시간이다. 가공시간은 기계적 특성의 영향을 받아 얻어진 실제값이므로, 기계적 오차로 인한 변동이 존재한다. 그러므로, 중심점에 축차를 반복시켜 실험수를 증가시켰다. 실험의 제한으로 얻어진 가공시간들은 모두 한 개의 블레이드를 가공하는데 걸린 시간을 나타내었다.

Table 3 Cutting time in the leading edge

No	x_1	x_2	Leading edge (min)	
			Simulation time	Real cutting time
1	1	1	5.7	4.87
2	-1	1	7.8	6.25
3	0	0	5.9	4.88
4	0	0	5.9	4.88
5	0	0	5.9	4.87
6	1	-1	4.4	3.60
7	-2	0	8.5	6.85
8	2	0	4.5	3.88
9	0	0	5.9	4.96
10	0	2	7.4	5.90
11	0	0	5.9	4.85
12	0	-2	4.3	3.85
13	-1	-1	6.0	5.18
14	0	0	5.9	4.88

Table 4 ANOVA for regression model of the leading edge cutting time after pooling

	S	ϕ	V	F_0	P
Model	10.4352	4	2.60880	987.63	0.000
Linear	10.0570	2	5.02848	2000.00	0.000
Square	0.3682	1	0.36823	139.40	0.000
Interaction	0.0100	1	0.01000	3.79	0.084
Residual	0.0238	9	0.00264		
Total	10.4590	13			

Table 5 ANOVA on coefficient of model of the leading edge cutting time after pooling

	Coefficient	T	P
Constant	4.8760	300.013	0.000
x_1	-0.7417	-49.989	0.000
x_2	0.5367	36.172	0.000
x_1^2	0.1187	11.807	0.000
x_1x_2	0.0500	1.946	0.084

일반적인 예상과는 달리 시뮬레이션 시간보다 실제 가공시간이 적은데, 이것은 리딩에지 가공이 틸팅에 의한 가공경로간의 미절삭 공구 이동시간이 상대적으로 크고, 실제 가공에서 공구경로가 검증되어 공구충돌 위험이 없어 공구 이동속도를 50%정도 증가시켜 가공하였기 때문이다.

Table 4는 블레이드 가공에서 리딩에지 가공시간을 반응값으로 하는 2차 회귀모형의 유의성을 검증하기 위하여 분산분석을 실시한 결과이며, Table 5는 t-검정을 통하여 추정된 모델에 대한

회귀계수의 유의성을 검정한 것이다. 유의하지 않은 계수인 x_2^2 을 오차항으로 풀링한 후에 분산 분석 및 계수를 t-검정하였다. 1, 2차 모델은 모두 유의하며, 교호작용항도 무시할 수 없다는 결과를 얻었다. 추정된 회귀모델이 리딩에지의 가공 시간에 대한 표현정도를 나타내는 결정계수 R^2 은 풀링 전후에 모두 99.8%이었는데, 이것은 추정 모델이 적절하다는 것을 의미한다. 이에 Table 5를 이용하여 리딩에지 가공시간을 예측하기 위한 2차 회귀방정식을 식 (6)과 같이 추정할 수 있었다.

$$T_{LE} = 4.8800 - 0.7417x_1 + 0.5367x_2 + 0.1187x_2^2 - 0.0500x_1x_2 \quad (6)$$

리딩에지면의 가공오차는 R-게이지를 이용하여 판단되었다. 이 장비는 0.25mm 단위로 측정이 가능하며, 중심조건의 값과 흥미영역 내의 다른 조건값을 비교하였을 때 범위 내에 존재하였다.

5.2 허브면 가공

허브면 가공의 경우에는 가공시간과 가공오차를 모두 반응변수로 하는 복합 반응모델(dual regression model)을 추정하였다. Table 6은 허브면 가공의 가공시간을 보여주며, 실험은 중심점에 3

Table 6 Cutting time in the hub surface cutting

No	x_3	x_4	x_5	Hub surface cutting time(min)	
				Simulation time	Real cutting time
1	-1	-1	-1	15.8	32.56
2	1	-1	-1	11.8	26.95
3	-1	1	-1	15.8	34.45
4	1	1	-1	10.6	25.37
5	-1	-1	1	10.0	22.42
6	1	-1	1	6.6	13.65
7	-1	1	1	9.8	25.50
8	1	1	1	6.6	15.87
9	-2	0	0	16.4	28.23
10	2	0	0	7.2	9.32
11	0	-2	0	9.1	22.18
12	0	2	0	9.1	24.42
13	0	0	-2	18.8	27.50
14	0	0	2	6.6	12.17
15	0	0	0	9.8	14.37
16	0	0	0	9.8	14.20
17	0	0	0	9.8	14.68
18	0	0	0	9.8	14.22

개의 측차를 주어 모델의 변동을 파악하였다.

Table 7은 하나의 블레이드를 가공하는데 있어서 허브면의 가공시간을 반응변수로 하는 2차 회귀모델의 유의성을 검정하기 위하여 분산분석한 결과이다. Table 8은 추정모델에 대한 t-검정을 통하여 회귀계수의 유의성을 검정한 것이다.

분산분석 결과 추정된 모델은 95% 내에서 유의하였다. 1차 모델은 95%내에서, 2차 모델도 무시할 수 없는 수준이나 교호작용항은 유의하지 않다. 추정된 회귀모델의 계수를 살펴보면, 1,2차 모델의 계수 중에서 유의하지 않은 계수도 있지만, 추정모델의 1,2차 곡면이 유의하거나 무시할 수 없어 모두 사용하였다. 이때의 추정된 회귀방정식의 결정계수 R^2 은 85.5%로 이 모델이 가공시간을 추정하는데 적합하다고 할 수 있다. 이에 식 (7)과 같이 2차 회귀방정식을 추정하였다.

$$T_{HS} = 15.841 - 4.432x_3 + 0.631x_4 - 4.534x_5 + 1.47x_3^2 + 2.602x_4^2 + 1.735x_5^2 - 0.541x_3x_4 - 0.464x_4x_5 + 0.624x_3x_5 \quad (7)$$

Table 7 ANOVA for regression model of the hub cutting time

	S	ϕ	V	F_0	P
Model	829.0621	9	92.118	5.24	0.015
Linear	649.596	3	216.532	12.31	0.002
Square	172.289	3	57.430	3.27	0.080
Interaction	7.177	3	2.392	0.14	0.936
Residual	140.690	8	17.586		
Total	969.752	17			

Table 8 ANOVA on coefficient of model of the hub cutting time

	Coefficient	T	P
Constant	15.841	7.820	0.000
x_3	-4.432	-4.227	0.003
x_4	0.631	0.602	0.564
x_5	-4.534	-4.325	0.003
x_3^2	1.470	1.638	0.140
x_4^2	2.602	2.898	0.020
x_5^2	1.735	1.933	0.089
x_3x_4	-0.541	-0.365	0.725
x_4x_5	-0.464	-0.313	0.762
x_3x_5	0.624	0.421	0.685

Table 9 Cutting error in the hub surface

No	x_3	x_4	x_5	Average cutting error(mm)
1	-1	-1	-1	0.0761
2	1	-1	-1	0.0581
3	-1	1	-1	0.0634
4	1	1	-1	0.0668
5	-1	-1	1	0.0697
6	1	-1	1	0.0949
7	-1	1	1	0.0921
8	1	1	1	0.0894
9	-2	0	0	0.0829
10	2	0	0	0.0881
11	0	-2	0	0.0777
12	0	2	0	0.0768
13	0	0	-2	0.0658
14	0	0	2	0.1416
15	0	0	0	0.1116
16	0	0	0	0.1092
17	0	0	0	0.1216
18	0	0	0	0.0892

Table 10 ANOVA for regression model of cutting error after pooling

	S	ϕ	V	F_0	P
Model	0.005684	8	0.000711	2.50	0.097
Linear	0.003423	3	0.001141	4.02	0.046
Square	0.002028	2	0.001014	3.57	0.072
Interaction	0.000233	3	0.000078	0.27	0.843
Residual	0.002556	9	0.000284		
Total	0.008241	17			

Table 9는 허브면 가공을 수행한 후의 평균 가공오차를 보여주고 있다. Table 10은 허브면에서 얻어진 평균가공 오차를 반응값으로 가공오차에 대한 회귀모델의 유의성에 대한 분산분석을 실시한 결과이며, Table 11은 t-검정을 통하여 회귀 계수의 유의성을 검정한 것이다. 이 결과들은 2차 계수 중에서 가장 유의하지 않은 x_5^2 을 오차항으로 풀링하여 얻어졌다.

허브면에서의 가공오차를 예측하기 위하여 추정된 모델은 90%내에서 유의하다는 결과를 얻었다. 1차 모델은 95%내에서 유의하였으며, 2차 모델은 90%내에 들어 무시할 수 없었다. 교호작용항은 유의하지 않다는 결과를 얻었지만, 2차 모

Table 11 ANOVA on coefficient of model of cutting error after pooling

	Coefficient	T	P
Constant	0.100083	16.081	0.000
x_3	0.001139	0.270	0.793
x_4	0.000689	0.164	0.874
x_5	0.014566	3.457	0.007
x_3^2	-0.006045	-1.767	0.111
x_4^2	-0.008113	-2.372	0.042
x_3x_4	-0.000816	-0.137	0.894
x_4x_5	0.004647	0.780	0.456
x_3x_5	0.002620	0.440	0.671

델이 유의하여 그대로 사용하였다. 추정된 계수 중에서 x_3^2 는 유의하지 않지만, 이를 풀링하면 모델의 유의성이 90% 범위 밖으로 벗어나고 결정계수도 크게 감소하여 그대로 사용하였다. 이때 추정된 회귀모델의 결정계수 R^2 는 69.0%로 기존의 모델이 70.3%인 것에 비하여 약간 감소하였지만, 회귀 모델이 90%내의 유의성 범위 내에 들어왔기 때문에 이 모델을 적용하였다.

이에 식 (8)과 같이 2차 회귀방정식을 추정하였다.

$$E_{HS} = 0.100083 + 0.001139x_3 + 0.000689x_4 + 0.014566x_5 - 0.006045x_3^2 - 0.008113x_4^2 - 0.000816x_3x_4 + 0.004647x_4x_5 + 0.002620x_3x_5 \quad (8)$$

5.3 블레이드 가공

사이드 커팅 방식에 의한 블레이드 가공은 조건을 고정하였기 때문에, 가공오차를 구하기 위하여 4개의 블레이드면을 임의로 선정하여 블레이드의 압축면과 흡입면에서 팁 쉬라우드쪽에서 허브면으로 2mm 지점을 측정하였다. 현장에서 임펠러의 재질로 STS가 사용되는 경우에는 허용오차를 0.05mm로 잡으며, 알루미늄 재질은 가공중에 발생하는 휨 등의 영향이 있기 때문에 일반적으로 0.1mm정도를 허용오차로 잡는다. Table 12는 임의로 선택된 4개의 블레이드의 압축면과 흡입면에서의 20회 반복 측정된 데이터로 얻은 평균오차와 최대오차를 보여준다. 이에, 0.1mm 범위 내에서 가공되어 유의하다고 판단하였다.

Table 12 Average and maximum error pressure in the surface and suction surface

		Pressure surface	Suction surface
1	Average error	0.04112	0.01838
	Maximum error	0.05921	0.07412
2	Average error	0.04463	0.02129
	Maximum error	0.05721	0.08525
3	Average error	0.05138	0.02023
	Maximum error	0.07369	0.06597
4	Average error	0.05662	0.01630
	Maximum error	0.07712	0.07111

Table 13 Estimated optimum cutting condition in the leading edge cutting(Target value : 3min)

	Estimates	Cutting condition
Feedrate (mm/min)	2.00000	200
No of tool path	-2.00000	16
Cutting time (min)	2.598	
Desirability	1	

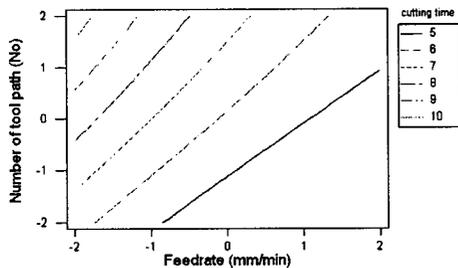
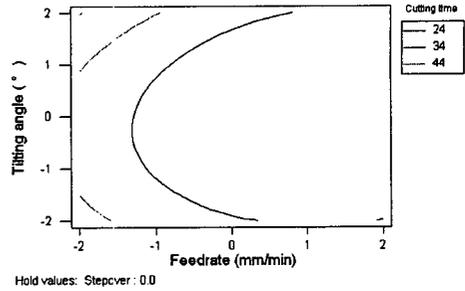


Fig. 9 Contour plot on response surface of cutting time in the leading edge cutting

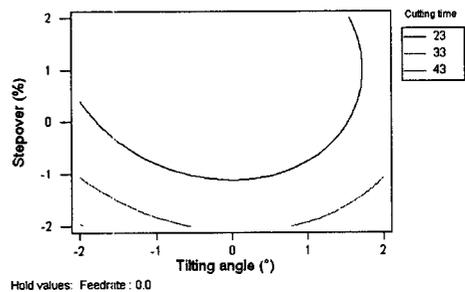
6. 가공조건 최적화

6.1 리딩에지 가공

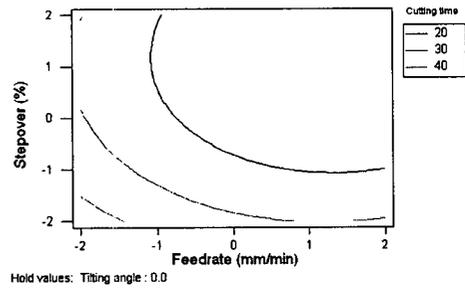
리딩에지 가공은 가공오차는 R-게이지를 이용하여 유의성을 검증하였기 때문에, 가공시간만을 반응표면으로 하는 단일모델을 추정되었다. Fig. 9는 반응변수인 가공시간과 독립변수인 가공조건들과의 관계를 2차원 반응표면으로 나타낸 그래프이다.



(a) Feedrate-Tilting angle



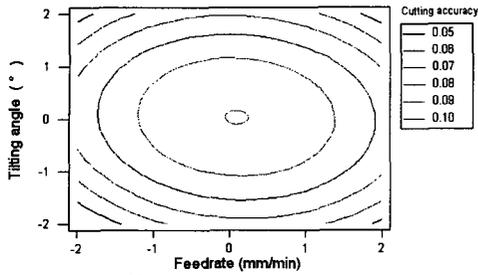
(b) Tilting angle-Stepover



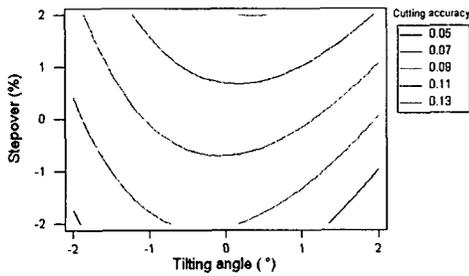
(c) Feedrate-Stepover

Fig. 10 Contour plot on response surface of cutting time in hub surface cutting

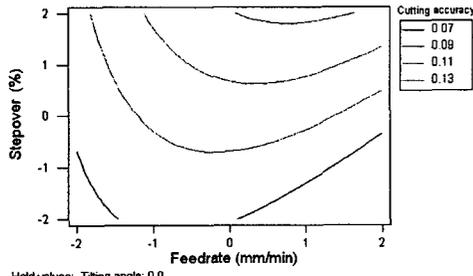
Table 13은 이 때 추정된 독립변수 값과 추정된 반응값을 보여주고 있다. 위 결과는 실험결과에서 얻은 최소 가공시간이 3.6분임을 고려하여 목표값(Target value)를 3분으로 잡았을 때 얻어진 값이다. 이와 같은 결과로부터 리딩에지 가공에서의 최적 가공조건은 분당이송속도는 200mm/min이었고, 공구경로의 수는 16개였다. 두 독립변수가 거의 1차 선형으로 감소하므로 가공시간은 목표값으로 정한 3분보다 더 적게 얻어졌고, 만족도가 1이므로 신뢰할 수 있다고 생각된다.



(a) Feedrate-Tilting angle



(b) Tilting angle-Stepover



(c) Feedrate-Stepover

Fig. 11 Contour plot on response surface of cutting error in hub surface cutting

6.2 허브면 가공

허브면 가공에서는 반응변수가 가공시간과 가공오차로 2개이며, 이에 따른 회귀모델이 각각 추정되었기 때문에 복합 표면곡면을 고려하여 최적화 과정을 거쳐야 한다. 먼저 가공조건과 가공시간과의 관계를 2차원 반응표면 그래프로 나타낸 것이 Fig. 10이고, Fig. 11은 가공조건과 가공오차와의 관계를 나타낸 것이다.

리딩에지 가공은 가공시간과 가공오차를 반응표면으로 하는 복합 표면반응 모델을 기초로 하

Table 14 Estimated optimum cutting condition in the leading edge cutting(Target value :8min, 0.1mm)

	Estimates	Cutting condition
Feedrate (mm/min)	1.61561	471.17
Tilting angle (°)	-0.06947	-0.174
Stepover (%)	0.63948	23.20
Cutting time (min)	9.85166	
Cutting error (mm)	0.10000	
Desirability1	0.93142	
Desirability2	1.00000	
Total desirability	0.96510	

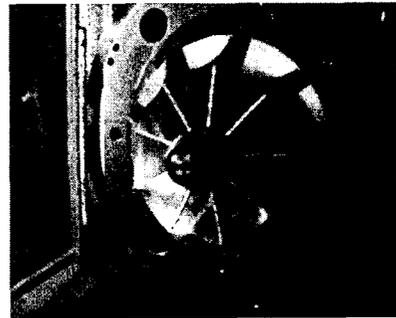


Fig. 12 Final impeller after finish cutting

여 최적화되었는데, 이에 따라 국부적인 곡면에서의 최적화된 조건을 구하였다. Table 14는 이때 추정된 독립변수값과 반응값을 보여준다.

위 결과는 Table 6에서 얻어진 최소 가공시간인 9.32분과 알루미늄을 재질로 사용하였을 때 현장에서 허용오차로 잡는 0.1mm를 기준으로 하여 목표값을 가공시간은 8M으로 정하고 가공오차는 0.1mm로 정하였을 때 얻어진 값이다. 이때 허브면의 최적 가공조건은 분당이송속도는 470 mm/min, 틸팅각도는 -0.2°, 절삭폭은 25% 정도가 적당하였다. 얻어진 가공시간은 대략 9.9분이었으며 가공오차는 0.1mm를 얻었다. 종합 만족도가 0.965이었으므로 신뢰할 수 있다고 생각된다.

Fig. 12는 정삭을 위한 세부 공정을 모두 수행한 후의 임펠러 최종 형상을 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 임펠러의 효과적인 5축 정삭 가공을 수행하기 위하여 생산성을 예측하고 최적의 가공조건 등을 선정할 수 있는 방법을 제시하였

다. 축차를 둔 반응 표면법을 이용하여 가공시간과 가공오차에 영향을 주는 가공조건을 최적화하였다. 이를 위하여 분산분석과 결정계수를 이용하여 모델을 추정하였고 유의성을 검증하였다. 이에 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 블레이드 하나를 가공하는데 실제 가공시간을 비교하여 보면, 리딩에지 가공의 경우에 중심조건에서 4.88분일 걸린 것에 비하여 최적화된 가공조건에서 추정된 시간은 2.60분이었다. 이는 블레이드 하나당 2.28분만큼 가공시간을 줄여 1.88배만큼 생산성을 향상시킨다는 것을 의미하며, 블레이드가 9개인 임펠러인 본 실험에서는 20.5분을 감소시킬 수 있었다.

(2) 허브면 가공의 경우에는 반응변수가 가공시간과 가공오차로 2개인 관계로 복합모형을 이용하였는데, 기존의 중심조건에서는 가공오차가 0.1079mm로 오차범위를 거의 만족하였고, 블레이드당 가공시간이 14.37분이 걸렸다. 제안된 최적화 방법은 가공오차를 허용오차 범위인 0.1mm로 제안한 채 가공조건을 최적화하여 블레이드 하나당 9.85분이 걸려 4.52분만큼 가공시간을 감소시켜 생산성을 1.46배만큼 향상시킬 수 있었다. 이는 전체 허브면 가공에서 40.68분을 감소시켰다는 것을 의미한다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 “신진연구인력 연구장려금지원사업”의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nelik, Lev, 1999, “Centrifugal and Rotary Pumps : Fundamentals with Applications,” *CRC Press*.
- (2) Johanna, S., Frédéric, M., Jean, Max Redonnet and Walter, R., 2005, “Analysis of Improved Positioning in Five-Axis Ruled Surface Milling Using Envelope Surface,” *Computer-Aided Design*, Vol. 37, Issue 10, pp. 989~998.
- (3) Lauwers, B., Dejonghe, P. and Kruth J. P., 2003, “Optimal and Collision Free Tool Posture in Five-Axis Machining Through the Tight Integration of Tool Path Generation and Machine Simulation,” *Computer-Aided Design*, Vol. 35, Issue 5, pp. 421~432.
- (4) Choi, B. K., Park, J. W. and Jun, C. S., 1993, “Cutter-location Data Optimization in 5-Axis Surface Machining,” *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 377~386.
- (5) Li, S. X. and Jerard, R. B., 1994, “5-axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-end Cutter,” *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 165~178.
- (6) Jensen, C. G., Red, W. E. and Pi, J., 2002, “Tool Selection for Five-axis Curvature Matched Machining,” *Computer Aided Design*, Vol. 34, pp. 251~266.
- (7) Chen, S. L., Wang, W. T., 2001, “Computer Aided Manufacturing Technologies for Centrifugal Compressor Impellers,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, pp. 284~293.
- (8) Suresh, P. V. S., Venkateswara, Rao P. and Deshmukh S. G., 2002, “A Genetic Algorithmic Approach for: Optimization of Surface Roughness Prediction Model,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, Issue 6, pp. 675~680.
- (9) Lim, P., Lee, H. K. and Yang, G. E., 2005, “High Speed Machining of the Thin Surface Parts Using Liquid Metal and Selection of Machining Condition by Latin Square Method,” *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 99~106.
- (10) Wang, M.Y. and Chang, H. Y., 2004, “Experimental Study of Surface Roughness in Slot End Milling AL2014-T6,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 51~57.
- (11) Park, S. H., 2001, “Morden Design of Experiments,” *Minyongsa*, pp. 305~329.
- (12) Park, S. H., 2003, “Regression Analysis,” *Minyongsa*, pp. 175~318.