

# 버의 최소화를 위한 밀링 가공 파라미터의 최적화

이상헌\* , 이성환\*\*

## Optimization of Cutting Parameters for Burr Minimization

Sang-Heon Lee\* , Seoung-Hwan Lee\*\*

### ABSTRACT

Burrs formed during face milling operations are very hard to characterize because there are many parameters that affect the cutting process. Many researchers have tried to predict burr characteristics including burr size and shapes with various experimental conditions such as cutting speed, feed rate, in-plane exit angle, number of inserts, etc., but it still remains as a challenging problem for the complex combined effects between the parameters. In this paper, the Taguchi method, which is a systematic optimization application in design and analysis of experiments, is introduced to acquire optimum cutting parameters for burr minimization in face milling. Also, analysis of variance (ANOVA) is employed to study the performance characteristics in more detail. Experimental verifications are provided to show the effectiveness of this approach.

**Key Words :** Burr (버), Face milling (정면 밀링), Optimization (최적화), Cutting parameter (가공파라미터), Taguchi method (다구찌 방법), Orthogonal Array (직교 배열), ANOVA (분산분석)

### 1. 서론

버는 절삭 가공 후 재료의 끝부분에 생성되는 재료의 원치 않는 돌출부로서, 부품의 정밀도를 저하시키며 생산 공정 자동화의 걸림돌이 되어 왔다<sup>(1)</sup>. 따라서 버는 디버링(Deburring) 공정을 통하여 반드시 제거되어야 한다. 버에 대한 이론적인 연구가 많이 진행되어 왔지만, 해석적인 모델링이 어렵고, 특히 버 생성 과정을 표현하는데 많은 어려움이 따르므로, 공정 계획(Process plan)을 이용하여 버의 발생을 최소화 하거나, 디버링이 가능한 장소에 버를 발생시키는 방식이 많이 사용되어 왔다. 본질적으로 디버링 공정에 소요되는 비용은 전체 공정 비용가운데 많은 비중을 차지하기 때문

에, 버의 높이를 최소화하여 공정 비용을 감소시키는 것이 가장 이상적인 방법이라 하겠다. 본 논문은 정면 밀링 가공시 버의 최소화를 위한 가공 파라미터의 최적화에 관한 연구이다. 정면 밀링시 버에 대한 연구 사례를 보면, Waichiro 등은 알루미늄의 경우 절삭깊이에 따라서 버의 상대적인 높이가 달라져 Primary burr 와 Secondary burr 로 구분될 수 있다고 하였다<sup>(2)</sup>. 일반적으로 Secondary burr 는 발생하는 버의 높이가 비교적 일정하고 작은 관계로, 부품의 형상 및 기능에 미치는 악영향이 미미하다고 알려져 있다. Chem 은 정면 밀링 공정의 버를 분석하기 위하여 3 차원적인 절삭 모델링이 필요하고, 적절한 가공 파라미터의 선택에 따라 버의 높이와 종류가 달라진다고 하였으며<sup>(3)</sup>, 특

2001년 3월 6일 접수

\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

히 Olvera 와 Barrow 등은 In-plain exit angle 에 따라서 버의 형상이 좌우된다고 하였다<sup>(4,5)</sup>. 상기한 연구 결과들을 보면, 가공 파라미터의 적절한 선택으로 버의 최소화가 가능하다는 것을 알 수 있지만<sup>(1-5)</sup>, 많은 실험이 필요하고 각 파라미터간의 복합적 영향 등으로 인하여 버를 최소화할 수 있는 가공 파라미터의 구체적인 조합이 제시되지 못하였다. 따라서, 실제적인 버 최소화를 위해서는 다양한 가공 파라미터의 조합을 고려한 최적화 연구가 절실하다. 최근 들어 실험계획법 가운데 하나인 다구찌 방법이 최적화 분야 뿐만 아니라 기계가공 분야에서도 그 효용성이 입증되기 시작하였다<sup>(7,8)</sup>. 다구찌 방법은 많은 가공 파라미터의 효율적인 최적화를 위해 매우 적절한 방법이며, 직교배열(orthogonal array)을 이용하여 적은 실험 횟수로도 체계적인 분석을 할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는, 다구찌 방법을 이용하여 버의 최소화를 위한 밀링 가공 파라미터의 최적화를 수행하고, 각각의 파라미터가 지니는 유의성을 파악하기 위하여 분산분석을 이용하였다<sup>(9-10)</sup>. 최적화된 가공 파라미터의 확인 실험을 통하여 다구찌 방법의 유용성을 검토하였다.

## 2. 다구찌 방법과 파라미터 설계

다구찌 방법을 이용한 최적화에서 파라미터 설계의 목적은 원하는 특성치의 값과 원하는 이론적인 목표 값과의 실제적인 차이를 최소화하기 위한 최적의 값을 찾는 것으로 정의할 수 있다. 특히, 파라미터 설계시 손실함수와 SN 비를 사용하여 도출된 최적의 파라미터는 외부의 환경변화나 다른 잡음 요인에 매우 둔감한 특성을 가지므로 다구찌 방법에 있어 파라미터 설계는 최적화의 성공 여부를 결정짓는 관건이라 할 수 있다. 다구찌 방법의 이론적인 배경을 살펴 보면 다음과 같다.

### 2.1 인자(Parameter)와 직교배열(Orthogonal array)

인자는 크게 설계자가 제어할 수 있는 제어인자와 제어할 수 없는 잡음인자로 분류할 수 있다. 제어인자는 특성치에 영향을 주리라고 예상되는 파라미터로 선택하며, 일단 제어인자가 선택이 되면 파라미터의 수준을 결정하게 되는데, 이때 보편적으로 수행될 수 있는 가급적 넓은 범위의 수

준을 선택한다. 직교배열을 사용하여 실험을 수행하는 것은 다구찌 방법의 가장 큰 특징 중 하나라 할 수 있다. 직교배열은 특성치에 영향을 줄 수 있는 많은 파라미터를 그 수준의 모든 조합에 대해 실험을 할 수 없을 때에 사용하게 된다. 즉, 적은 실험 횟수로도 각 파라미터들의 영향을 분석할 수 있게 함으로써, 파라미터 조합의 높은 재현성에 중점을 두며 이에 보완하여 분산분석을 통해 데이터의 중요도를 파악할 수 있다.

### 2.2 손실함수(loss function)와 SN 비

다구찌 방법에서는 설계자가 어떠한 특성치의 목표값과 그 목표값에서 멀어질수록 손실의 비중을 더 주자는 의미를 가지는 손실함수를 사용한다. 이 손실함수의 값을 작게 하여 주는 것이 좋은 특성치가 되며, 이것에 근거한 SN 비(Signal to noise ratio)는 특성치의 기능을 판단하기 위하여 통계적으로 계산된 수치로서 SN 비의 값이 크면 클수록 그에 해당하는 특성치는 목표치에 근접하는 특성을 나타나게 되며, 잡음의 영향 가운데서도 특성치가 목표치에 얼마나 근접하는가를 판단하는 기준이 된다. 손실함수는 크게 망목(The nominal the better), 망소(The lower the better), 망대(The higher the better)특성의 3 가지로 분류되며, 본 연구는 버의 최소화에 관한 연구이므로 망소특성을 적용하였다. 이 경우 손실함수와 SN 비는 아래와 같이 정의된다.

$$\text{Loss funtion} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ij}^2 \quad (1)$$

$$\text{SN Ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (2)$$

여기서,  $y_{ij}$  는  $i$  번째 실험에서  $j$  번째 실험값을 나타내며,  $n$  은 실험횟수를 말한다.

### 2.3 분산분석(ANOVA)

분산분석(Analysis of Variance : ANOVA)은 어떤 파라미터가 특성치에 크게 영향을 미치는 가를 알기 위한 방법으로, 다구찌 방법의 파라미터 설계에 보완하여 각각의 파라미터의 유의성을 파악하는데 매우 유용하다. 우선, 편차의 제곱의 총합  $S_T$  는 다음과 같이 표시된다.

$$S_T = \sum_{j=1}^n (\eta_j - \eta_m)^2 \quad (3)$$

여기서  $j$  는 직교배열표의 실험번호,  $n$  은 전체 실험횟수,  $\eta_j$  는  $j$  번째 SN 비,  $\eta_m$  은 평균 SN 비를 나타낸다.  $S_T$  는 각 파라미터 편차의 제곱합 성분과 에러에 의한 제곱합( $S_e$ ) 성분으로 나눌 수 있는데,  $S_T$  에 대한 각 파라미터 제곱합 성분의 백분율( $\rho$ )로 해당 파라미터의 이산 기여도를 표시한다. 또한 각 파라미터의 평균 제곱합과 오차제곱합의 비인  $F$  값을 계산하여 각 파라미터의 오차에 비한 중요도를 수치로 표시할 수 있다. 분산 분석에서  $F$  값과  $\rho$  의 값이 매우 작은 파라미터는 특성치(본 연구에서는 버의 높이)에 대한 유의성이 없으므로 경제성과 작업성을 고려하여 설계시 취사 선택하여 주어도 무방하다. 지금까지 서술한 다구찌 방법의 절차를 요약하여 도식화 하면 Fig 1.과 같다.

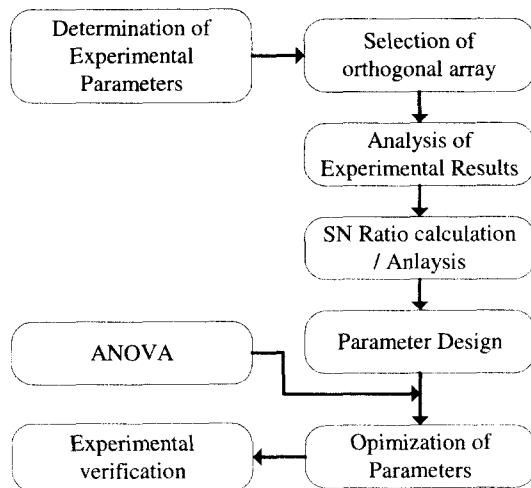


Fig. 1 Optimization using the Taguchi method

### 3. 실험

#### 3.1 실험 재료 및 측정방법

실험 재료는 버의 연구에 주로 사용되어 왔으며 가공성이 높은 Al6061-T6 와 난삭재로서 열전도가 매우 낮은 SUS304 를 선택하였다. 두 재료에 대한 기계적 성질은 Table.1 에 제시되었다.

시편은 Fig.2 와 같이 40×40×60mm 크기의 버가

없는 직육면체로 가공 하였다. 측정 기구는 분해능이 0.005mm 인 공구현미경을 사용하였으며, 측정치는 시편의 양끝단을 제외한 부분의 버의 평균 크기를 산출하는 방식으로 측정하였다.

Table 1 Mechanical properties of Al6061-T6 and SUS304

Material	Al6061-T6	SUS 304
Tensile strength	310 Mpa	580Mpa
Yield stress	275 Mpa	265MPa
Fracture strain	0.50	0.55
Thermal conductivity	222 W/m°K	17-50 W/m°K

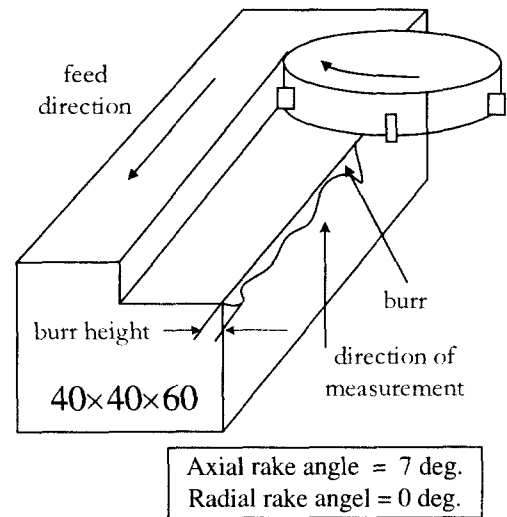


Fig. 2 Schematic diagram of experiment

#### 3.2 가공 변수 설정

본 논문에서 최적화할 가공 파라미터를 결정하기 위하여 과거 연구 결과<sup>(1-5)</sup>와 예비실험을 통하여, 버의 생성과 높이에 영향을 주는 5 개의 가공 파라미터를 Table 2 와 같이 선정하였다. 이 중 In-plane exit angle 이란 커터가 이루는 속도 벡터와 커터가 재료를 이탈 하는 부분에서 속도 벡터가 이루는 각으로서 정의되며(Fig. 3). 정면 밀링 작업에서 버의 높이를 결정짓는데 있어 가장 중요한 파라미터로 인식되어져 왔다<sup>(1-5)</sup>. 파라미터 수준은 가공 핸드북 및 예비실험시의 결과를 근거하여 결

정하였다. Al6061-T6 는 가공성이 매우 우수하기 때문에 상대적으로 넓은 범위에서 5 개 수준으로 결정하였으며, SUS304 는 가공 가능 범위가 좁은 이유로 4 개 수준으로 선정하였다.

Table 2 Cutting parameters

Symbol	Cutting variable	Unit
A	Number of insert	number
B	In-plane exit angle	degree
C	Depth of cut	mm
D	Feed rate	mm/min
E	Cutting speed	RPM

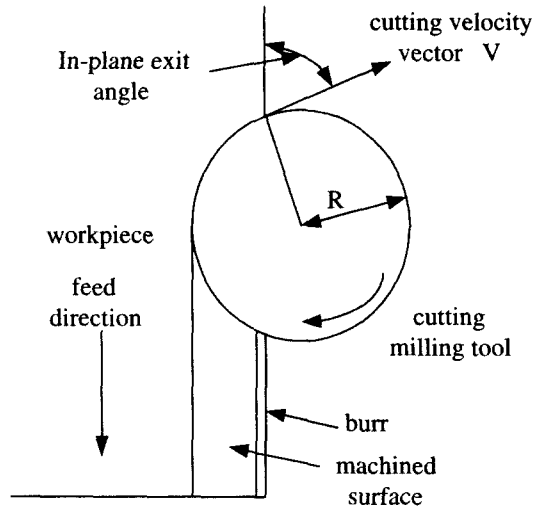


Fig. 3 Definition of In-plane exit angle

Table 3 Parameters and their levels

(( ) : SUS304)

level	1	2	3	4	5
A	5 (6)	4 (5)	3 (4)	2 (3)	1
B	30 (36)	60 (72)	90 (108)	120 (144)	150
C	4.5 (3.5)	3.5 (2.5)	2.5 (1.5)	1.5 (0.5)	0.5
D	342 (127)	256 (87)	187 (61)	127 (41)	87
E	1800 (1250)	1600 (1100)	1250 (800)	1100 (550)	800

Table 4 Orthogonal array for SUS304 ( $L_{16}(4^5)$ )

No	Factor				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

### 3.3 직교 배열표 선정

Al6061-T6 는 5 개의 가공 파라미터와 5 개의 수준이므로 표준형 직교배열표 가운데  $L_{25}(5^5)$ 를 선택하였으며, SUS304 는 5 개의 가공 파라미터와 4 개의 수준을 설정하였으므로  $L_{16}(4^5)$ 의 선택하는 것이 바람직하다. Table 4 는 SUS304 이 적용될 직교 배열표로써 특정한 파라미터에 치중되지 않고, 직교배열된 16 회의 실험횟수를 나타낸다. 각각의 실험결과에 대한 신뢰성을 기하기 위해서 4 회의 반복 실험을 수행하였다

## 4. 최적의 가공 파라미터 선정

### 4.1 실험결과와 SN비 분석

실험 결과, 대체로 버높이(Fig.2 참조)가 0.1mm 이상의 Primary burr 가 많이 발생하였으며, Al6061-T6 의 경우 전체 평균 버 높이가 0.44mm 로

SUS304 의 0.91mm(table 5 참조)보다는 전반적으로 높이가 작고, 특히 Secondary burr 의 경향이 상대적으로 두드러졌다. 또한 식(1)(2)를 이용하여 SN 비를 계산한 결과 평균 SN 비( $\eta_m$ )는 각각 10.25 와 4.72 로 산출되었다

Table 5 Experimental results for SUS304

No	Burr height				Ave.
	1th	2nd	3rd	4th	
1	0.82	0.85	0.80	0.76	0.81
2	0.10	0.08	0.13	0.09	0.1
3	0.05	0.05	0.13	0.23	0.11
4	0.59	0.52	0.33	0.51	0.48
5	0.49	0.40	0.58	0.70	0.54
6	0.61	0.50	0.68	0.71	0.62
7	0.72	0.62	0.82	0.73	0.72
8	2.00	2.25	2.20	2.00	2.11
9	0.63	0.65	0.56	0.62	0.61
10	0.93	0.80	0.35	0.73	0.71
11	0.13	0.15	0.19	0.09	0.14
12	2.80	3.00	3.20	3.50	3.12
13	0.73	0.85	0.50	0.48	0.64
14	0.69	0.65	0.68	0.60	0.65
15	2.50	2.70	2.90	4.00	3.02
16	0.02	0.25	0.30	0.15	0.18

파라미터 설계 절차에 따라 계산된 SN 비를 파라미터의 수준별로 각각 합산하여 정리하였다. Table 6 은 Al6061-T6 와 SUS304 의 SN 비 평균 계산값을 보여주고 있으며, 각각의 파라미터 별로 가장 큰 값을 선택하여 최적의 가공조건(밀출 친 값)으로 선정할 수 있다. 경제성, 작업성을 고려한 보다 세밀한 최적 조건을 선정하기 위해서 분산분석을 이용한 방법이 다음절에 수록되었다.

4.2 분산분석(ANOVA)

Table 6 에서 계산된 SN 비를 이용하여 분산 분석을 실시한 결과는 다음과 같다. 먼저 Table 7 은 Al6061-T6 의 경우로서 In-plain exit angle 의 F 값이 13.6 이고,  $\rho$  값이 69.3%로서 가장 중요한 파라미터임을 나타낸다. 다른 파라미터들은 10%미만의 기여도로서 유의성이 적다고 할 수 있다. 특히 Number of insert 는 F 값이 매우 작기 때문에 오차항에 포함시켜 분석을 수행하였다

Table 8 은 SUS304 의 경우로서 기여율이 높은 파라미터는 feed rate 와 주축의 회전속도로서 각각 30%정도의 기여도를 가진다. 이러한 결과는 난삭 재인 스테인레스강의 경우 feed rate 와 주축의 회전속도의 적절한 조합에 의해 가공시 발생하는 열을 줄이는 것이 버의 높이를 최소화하는 관건이기 때문이라고 생각된다. 특히 Al6061-T6 와 달리 In-plane exit angle 이 버의 높이에 미치는 영향이 미미하기 때문에 오차항으로 간주하여 분산분석을 수행하였다.

Table 6 Average SN Ratios for each parameter level

SN Ratio (db)					
level	A	B	C	D	E
1	8.73	<b>18.74</b>	<b>14.38</b>	10.89	9.94
2	9.33	16.45	6.87	7.43	10.03
3	9.80	11.47	10.81	8.66	<b>13.17</b>
4	<b>12.44</b>	4.25	10.22	<b>13.82</b>	10.93
5	10.96	0.37	8.99	10.47	7.21

(a) Al6061-T6

SN Ratio (db)					
level	A	B	C	D	E
1	<b>11.27</b>	3.71	<b>9.08</b>	-0.41	-2.94
2	1.36	<b>7.55</b>	1.33	8.46	<b>10.11</b>
3	3.46	6.78	4.65	<b>9.67</b>	3.74
4	2.77	0.81	3.79	1.14	7.95

(b) SUS304

Table 7 ANOVA results for Al6061-T6

	DOF	Sum of square	Mean Square	F	$\rho$ (%)
	$\phi_i - 1$	$S_i$	$\bar{S}_i = \frac{S_i}{s_{(\phi_i - 1)}}$	$\frac{\bar{S}_i}{S_e}$	$\frac{S_i}{S_T} \times 100$
B	4	1228.4	307.1	13.6	69.3
C	4	151.9	37.9	1.7	8.5
D	4	118.5	29.6	1.3	6.6
E	4	92.2	23.1	1.1	5.2
$\epsilon$	8	180.8	22.6		10.2
Total	24	1771.8			100

\*  $i$  : Parameter symbol,  $\epsilon$  : Error symbol  
 $\Phi_i$  : Level of parameter.

Table 8 ANOVA results for SUS304

	DOF	Sum of square	Mean Square	F	$\rho$ (%)
A	3	125.9	41.9	1.6	12.5
C	3	184.4	61.5	2.4	18.4
D	3	297.4	99.0	3.8	29.6
E	3	321.0	107.0	4.1	31.9
$\varepsilon$	3	75.5	26.2		7.6
Total	15	1004.0			100

결론적으로, 본 연구에서 선정된 파라미터 가운데 최적의 가공조건은 Table 9 와 같다.

Table 9 Optimal Parameters

Optimal parameter		
Parameter/ material	Al6061-T6	SUS304
Number of inserts	2	6
In-plane exit angle	30 deg.	72 deg.
Depth of cut	4.5 mm	3.5 mm
Feed rate	127 mm/min	61 mm/min
Rotational speed	1250 rpm	1100 rpm

### 4.3 예측 및 확인실험

다구찌 방법의 최종 단계로서 최적화 된 가공 조건에 대한 SN 비를 예측하고, 이 값을 실제 가공 테스트를 거쳐서 산출한 모평균과 일치하는가를 확인하였다. SN 비의 추정치  $\hat{\eta}$  은 다음 식으로 구할 수 있다.

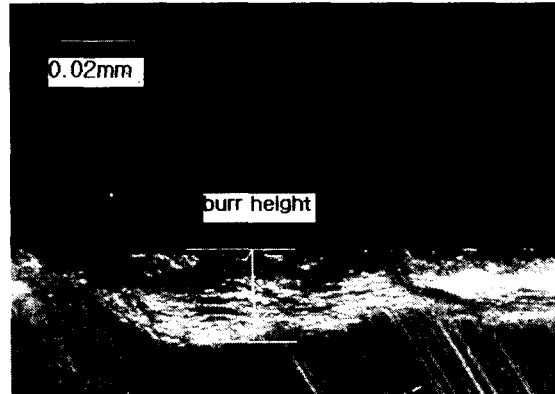
$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\eta_i - \eta_m) \quad (4)$$

여기서  $\eta_m$  은 평균 SN 비,  $\eta_i$  는 최적화된 파라미터 SN 비,  $q$  는 파라미터의 수를 나타낸다.

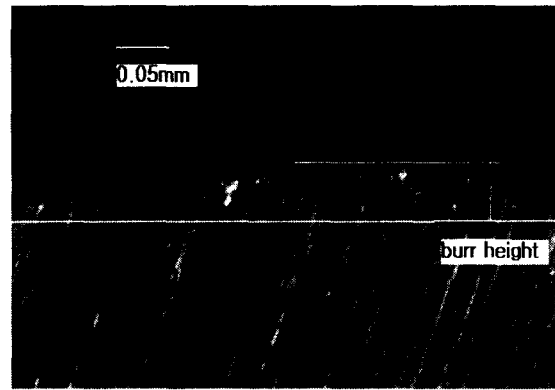
확인실험을 4 회 이상 실시한 모평균( $\bar{\eta}_m$ ), 예측치( $\hat{\eta}$ )와 평균 SN 비( $\eta_m$ )의 비교 결과가 Table 10 과 같다.  $\bar{\eta}_m$  이  $\eta_m$  에 비하여 각각 20.7db, 21.48db 씩 향상되었으며,  $\bar{\eta}_m$  과  $\hat{\eta}$  의 오차는 특성치의 성격상 만족할만한 수준이다. 확인 실험의 버의 높이가 전체 평균 버높이에 비하여 향상되었음을 보여주고 있다.

Table 10 Prediction of SN ratios and experimental verifications

work piece	Burr height (mm)	$\bar{\eta}_m$ (db)	$\hat{\eta}$ (db)	$\varepsilon$ (%)	$\eta_m$ (db)	Burr Height Ave.
Al 6061-T6	0.028	30.9	31.5	0.8	10.2	0.44
	0.031					
	0.022					
	0.035					
SUS 304	0.035	26.2	25.9	1.2	4.72	0.91
	0.048					
	0.054					
	0.062					



(a) Al6061-T6



(b) SUS304

Fig. 4 Experimental verifications

Fig.4 는 광학 현미경으로 촬영한 확인 실험 결과이다. 가공 실험시 발생하는 평균 버높이에 비하여 버의 높이가 각각 0.02mm, 0.05mm 정로로 미소버(secondary burr)로 발생하였음을 볼 수 있다. 상기한 결과에서 선정된 실험조건에 의한 확인 실험시 버의 높이가 최소화 되었음을 보였다. 따라서 선정된 최적 가공 파라미터의 타당성이 입증 되었으며, 파라미터 설계의 재현성이 확인되었다.

### 5. 결론

정면 밀링시 나타나는 버의 높이를 최소화하기 위하여 제시된 가공 파라미터의 최적화를 수행하였다. 최적화를 위하여 적은 실험 횟수로 신뢰성 있는 분석이 가능한 다구찌 방법을 이용하였으며, 가공성이 서로 다른 A16061-T6 와 SUS304 에 대하여 실험을 수행하여 최적의 가공 조건을 산출하였고 각각의 파라미터의 영향도 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

(1) 재료의 성질에 따라 전반적인 버의 높이가 다르며, 최적화된 조건과 버의 최소화에 중요한 영향을 주는 파라미터가 상이함이 확인되었다.

(2) 특히 난삭재인 SUS304 의 경우, 일반적으로 버 발생에 가장 영향을 미친다고 알려진 In-plane exit angle 은 상대적으로 작은 중요도를 나타내어, 재료의 가공성에 따라 파라미터가 특성치에 미치는 영향이 변화함을 알수 있었다.

다구찌 방법 및 분산분석을 이용하여 제시된 가공 조건으로 실험한 결과, 최소화된 높이의 버가 재현되어 제안된 최적화 방법의 유용성이 입증 되었다.

### 참고문헌

1. 고대철, 김병민, 고성림, "2 차원 절삭에서 공구 이탈시 발생하는 버에 관한 강소성 유한요소 해석," 한국정밀공학회지, 제 15 권 4 호, pp.

125~133, 1998.  
 2. Waichiro., Terudki., Akihiro., Keiichi. and Kensuke., "Study Burr Formation in Face Milling," Bull Japen Soc. of Prec. Engg, Vol 15, No. 1, 1981.  
 3. Gwo-lianq, Chern., Ph.D dissertation., "Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting," U.C Berkeley., pp.116-149, 1993.  
 4. O. Olvera., G. Barrow., "An Experimental Study of Burr formation in Square Shoulder Face Milling," Int J. Mech Tools Manufact, Vol 36, No. 9, pp. 1005-1020, 1996.  
 5. O. Olvera., G. Barrow., "Influence of Exit Angle and Tool Nose Geometry on Burr Formation in Face Milling Operation," Pro. Inst. Mech. Eng. Vol, 212, Part B, pp. 59-72, 1998.  
 6. M. Hashimura., J. Hassamontr., and D.A. Dornfeld., "Effect of In-plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation," J. Man. Sci. & Eng., Vol 121, pp.13-18, 1999.  
 7. 김성일, 이위로, 김태영, "단인과 다인 정면 밀링의 가공특성에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 12 권, 제 4 호, pp. 19-27, 1995.  
 8. 박성현, "응용실험계획법," 영지문화사, pp. 93-225, 1998.  
 9. C.Y. Nian., W.H. Yang., and Y.S. Tarnq., "Optimization of Turning Operations with Multiple Performance Characteristics," J. Materials Processing Technology., 1999.  
 10. 박성현, "현대실험계획법," 민영사. pp. 631-646, 1984.