

버의 최소화를 위한 실험조건 최적화

Optimization of Experimental Parameters for Burr Minimization

이상현*, 이성환**

Sang-Heon Lee, Seoung-Hwan Lee

Abstract

Burrs formed during face milling operations are very hard to characterize like other machining burrs because there are many parameters which 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 complicated combination effects between the parameters. In this paper, Taguchi method, which is a systematic optimization application of design and analysis of experiments, is introduced to acquire optimum cutting parameters for burr minimization. Optimized experimental conditions are provided to show the effectiveness of this approach.

Key words : 버(burr), 정면밀링(face milling), 최적화(optimization), 다구찌 방법(Taguchi method), 직교 배열(orthogonal array), 절삭조건(cutting parameter),

1. 서 론

버는 절삭 가공 후 재료의 끝부분에 생성되는 재료의 원치 않는 돌출부로서 부품의 정밀도를 저하시키며 생산 공정 자동화의 걸림돌이 되어 왔다. 따라서 버는 디버링(Deburring) 공정을 통하여 반드시 제거되어야 할 부분이다. 버에 대한 이론적인 연구가 많이 진행되어 왔지만, 해석¹적인 모델링이 어렵고, 특히 버 생성 과정을 표현하는데 어려움이 많이 따르므로, 공정 계획을

이용하여 버의 발생을 최소화 하거나, 디버링이 가능한 장소에 버를 발생시키는 방식이 많이 사용되어 왔다. 본질적으로 버 제거 작업에 소요되는 비용은 전체 공정 비용 가운데 많은 비중을 차지하기 때문에, 버의 크기를 최소화 시켜 공정의 비용을 최소화하는 것이 가장 이상적인 방법이라 하겠다. 본 논문은 정면 밀링 가공시 버의 최소화를 위한 가공 파라미터의 최적화에 관한 연구이다.

지금까지의 실험적인 연구 사례를 살펴 보면 Chern 은 밀링 공정의 버를 분석하는데 3 차원적인 절삭 모델링이 필요하고 가공 파라미터의 변화에 따라 버의 크기와 종류가 달라진다고 하였다[2]. 특히, Waichiro 등은 알루미늄과 같은 연성 재료는 절삭깊이에 따라 Primary burr 와 Secondary burr 로 구분되어진다고 하였으며[1], 또한 Chern 과 Olvera and Barrow 등은 In-plane exit angle 에 따라서 버의 형상이 좌우된다고 하였다[2-4]. 상기한 결과들을 보면, 가공 파라미터의 적절한 선택으로 버의 최소화가 가능하다는 것을 알 수 있지만[1-4], 가공 파라미터의 구체적인 조합이 제시되지는 못하였다.

따라서 실제적인 버 최소화를 위해서는 다양한 가공 파라미터의 조합을 고려한 최적화 연구가 절실하다. 최근 들어 통계적인 실험계획법 중 하나인 다구찌 방법(Taguchi Method)이 최적화 분야 뿐만 아니라 기계가공 분야에서도 쓰이기 시작하였다[6,7]. 다구찌 방법은 많은 가공 파라미터의 효율적인 최적화를 위해 매우 적절한 방법이며, 적은 실험 횟수를 통하여 체계적인 분석을 할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 버의 최소화를 위해 밀링 공정 파라미터들의 적절한 최적화를 수행하고, 각각의 파라미터들이 버의 크기에 미치는 영향을 손실함수와 분산분석을 통하여 파악하는 방식으로 연구를 수행하였다.

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학부

2. 다구찌 방법을 이용한 파라미터 설계

다구찌 방법에서 파라미터 설계의 목적은 원하는 성능치(Characteristic value)의 값과 원하는 이론적인 목표 값과의 실제적인 차이를 최소화하기 위한 최적의 값을 찾는 것으로 정의할 수 있다. 특히, 파라미터 설계에서 도출된 최적의 파라미터(parameter)는 외부의 환경변화나 다른 잡음 요인에 매우 둔감하므로 다구찌 방법에 있어 파라미터 설계는 최적화의 관건이다. 다구찌 방법의 이론적인 배경을 살펴 보면 다음과 같다.

2.1 인 자

인자는 크게 제어인자와 잡음인자로 분류할 수 있다. 제어인자(설계인자)가 설계자가 그 수준을 결정하고자 하는 인자이며 잡음인자는 다시 오차, 신호, 표시인자 등으로 나누어지며 그 중 오차인자는 내란, 외란, 불완전 제조와 관계된다. 인자는 특성치에 영향을 주리라고 예상되는 인자들을 선택하여 준다. 인자가 선택이 되면 인자의 수준을 결정하게 되는데 수준은 너무 광범위하게 선택하지 말고, 실험이 보편적으로 수행될 수 있는 수준을 선택하는 것이 관건이다.

2.2 직교배열(Orthogonal array)과 강건설계(Robust design)

다구찌 방법에서 사용하는 실험 계획표로서 가장 큰 특징이라고 할 수 있는 직교배열(Orthogonal array)을 언급할 수 있다. 직교배열은 특성치에 영향을 줄 수 있는 많은 인자들을 그 수준의 모든 조합에 대해 실험을 할 수 없을 때에 사용하게 된다. 즉, 적은 실험 횟수로도 각 인자들의 영향을 분석할 수 있게 함으로써, 인자 조합의 높은 재현성에 중점을 두며 배치에 있어서 직교성과 데이터분석에 있어서 분산분석을 통해 데이터의 중요도를 파악할 수 있다.

강건설계(Robust design)란 직교배열 표에서 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 S/N 비를 최대화하는 제어인자를 찾아내는 것이다. 즉, 잡음의 영향 하에서도 특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하는 제어인자의 조건을 찾아내는 것이다. 만일, 제어인자의 설계의 조건을 찾아 낸 후에도 특성치의 산포가 만족스럽지 않을 때에는 허용차 설계를 통하여 산포에 큰 영향을 끼치는 설계변수를 선택하여 그 허용차를 줄일 수 있다.

2.3 손실함수와 S/N Ratio

다구찌는 품질의 정의를 “제품이 출하된 시점으로부터 성능특성치의 변동(variability)과 부작용 등으로 인하여 사회에 끼친 총손실이다”라고 정의 하였다. 여기서 손실함수를 정의하는데 제품의 목표로 하는 목표치가 존재하고 그 목표치에서 멀어질수록 손실의 비중을 더 주자는 의미에서 손실함수가 정의되며, 손실함수를 도입함으로써 좋은 품질을 평가하게 된다. 손실함수는 제품특성의 목표치가 m 이고, 제품의 실질 특성치가 y 인 경우에 손실함수는

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (1)$$

으로 정의된다. 이 손실함수의 값을 작게 하여 주는 것이 좋은 품질이 되며, 이것에 근거하여 S/N ratio(Signal-to-noise ratio)는 제품의 기능을 판단하기 위하여 통계적으로 계산된 수치로서 잡음의 영향 가운데서도 목표치에 얼마나 근접하는가를 판단하는 기준이 된다.

손실함수를 3 가지 범위로 분류하는데 다음과 같은 특성을 바탕으로 분류할 수 있다.

- (1) 특정한 목표가 주어진 경우 : 명목특성 (The nominal-the-better)
- (2) 작을수록 좋은 경우 : 망소특성 (The lower-the-better)
- (3) 클수록 좋은 경우 : 망대특성 (The higher-the-better)

즉, 특성치의 분류에 따라서 손실함수의 정의가 달라지게 되는데 이 연구에서는 버의 최소화를 주제로 설정했기 때문에 망소특성(The lower-the-better)을 이용한다. 망소특성의 경우 손실함수(loss function)와 S/N ratio 는 다음과 같다.

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

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ij}^2 \right) \quad (3)$$

여기서, y_{ij} 는 i 번째 어떤 범위에 상관없이 S/N ratio 가 클수록 좋은 품질이 된다.

3. 실험

밀링 작업에서의 가공 조건은 여러 가지 파라미터가 있다. 그 모든 파라미터들은 각각 버의 크기에 영향을 끼치는 인자들이다. 그러나, 가공이 가능한 영역에서 그 인자들의 수많은 조합에 대해서 버의 크기를 결정짓기 쉽지 않다. 그러나 다

구제 방법에 의한 파라미터 설계를 통하여 다양한 인자들의 영향을 고려할 수 있다.

3.1 실험 장치

실험은 NC 밀링 범용기계를 사용하였다. 재료는 Al606-T6 를 사용하여 시편을 제작하였으며 재료에 대한 물성치는 Table 1 에 나타나 있다. 시편의 형상은 Fig.1 과 같이 직육면체의 형태이며, 측정은 공구 현미경을 사용하였는데, 버가 나타나는 부분을 측정하기 위하여 버가 나타나는 부분의 직각 방향의 면을 고르게 가공한 후 실험을 행하였다. 측정장치의 분해능은 0.005mm 이다.

Table. 1 재료 시편의 물성치

| | |
|------------------|--------------|
| Material | Al 6061 - T6 |
| Tensile strength | 310 MPa |
| Yield stress | 275Mpa |
| Fracture strain | 0.50 |

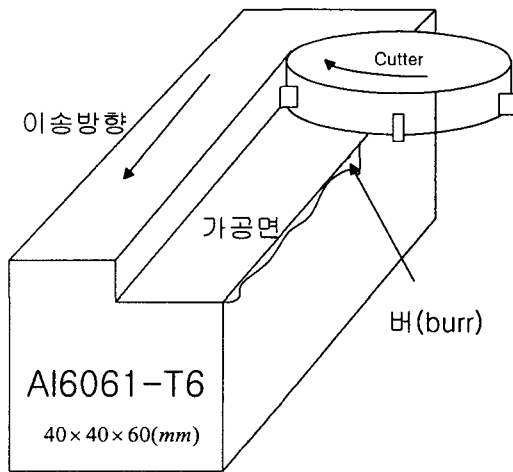


Fig.1 실험 시편의 형상과 생성 과정

3.2 실험인자 설정

지금까지의 연구 결과를 보면 버의 크기에 영향을 주는 인자들 중 절삭깊이와 In-plane exit angle 이 가장 많은 영향을 끼치는 파라미터라는 것을 알 수 있다[1-5]. In-plane exit angle 이란 Fig.2 에 나타나 바와 같이 밀링 cutter 의 속도 벡터와 재료의 이탈부분이 이루는 각으로 정의가 된다. 이 외에도 이송량과 인서트의 개수에 따라서 버의 크기가 달라 질 수 있다.

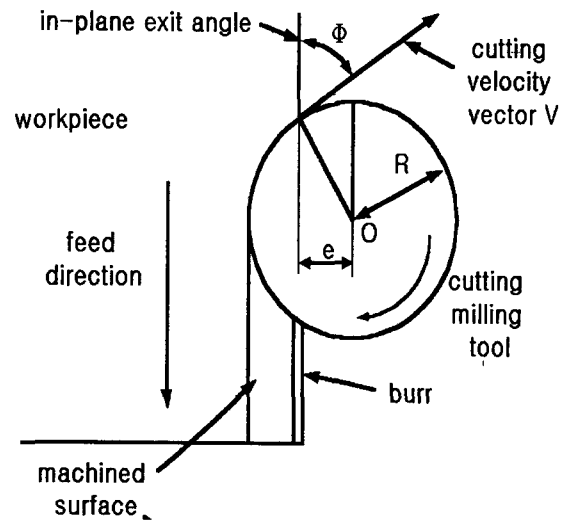


Fig.2 In-plane exit angle 의 정의

따라서 버의 크기에 영향을 주는 인자들을 적절하게 선택하기 위하여 우선적으로 1 차 실험을 행하였다. 제어 인자는 주축회전속도, 이송량, 인서트의 갯수, 절삭깊이, In-plane exit angle 등으로 정하였으며 그 수준은 5 개 수준으로 Table 2 과 같다.

Table 2. 제어인자와 수준

| 기호 | 제어 인자 | 1 수준 | 2 수준 | 3 수준 | 4 수준 | 5 수준 |
|----|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| A | Number of insert | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| B | In-plane exit angle (deg.) | 30. | 60 | 90 | 120 | 150 |
| C | Depth of Cut (mm) | 4.5 | 3.5 | 2.5 | 1.5 | 0.5 |
| D | Feed rate (mm/min) | 342 | 256 | 187 | 127 | 87 |
| E | Cutting speed(rpm) | 1800 | 1600 | 1250 | 1100 | 800 |

인자의 수준은 가공 실험이 가능한 영역에서 버가 충분히 나타날 수 있는 범위에서 일정간격으로 정하였다. 일정간격이 불가능한 인자는 범용 밀링 기계를 사용하므로 미리 정해진 값에서 수준을 택하였다.

3.3 직교 배열표

Table 2 를 바탕으로 Table 3 과 같은 직교 배열표

를 선택하였다. 직교 배열표를 선정할 때, 자유도는 각각의 인자들이 변화할 수 있는 수로서 정의하며 여기서 모든 인자들의 자유도는 4이며, 모든 파라미터들이 가지는 자유도는 20이다. 직교 배열표에서 실험의 횟수는 이 자유도보다 최소한 같거나 커야 한다. 따라서 25 회의 실험횟수를 가지는 직교 배열표를 선정한다.

Table 3. 직교배열표 L25

| No. | 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 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 7 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 8 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| 9 | 2 | 4 | 5 | 1 | 2 |
| 10 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| 11 | 3 | 1 | 3 | 5 | 2 |
| 12 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| 13 | 3 | 3 | 5 | 2 | 4 |
| 14 | 3 | 4 | 1 | 3 | 5 |
| 15 | 3 | 5 | 2 | 4 | 1 |
| 16 | 4 | 1 | 4 | 2 | 5 |
| 17 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 |
| 18 | 4 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| 19 | 4 | 4 | 2 | 5 | 3 |
| 20 | 4 | 5 | 3 | 1 | 4 |
| 21 | 5 | 1 | 5 | 4 | 3 |
| 22 | 5 | 2 | 1 | 5 | 4 |
| 23 | 5 | 3 | 2 | 1 | 5 |
| 24 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 25 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 |

4. 최적의 파라미터 선정

4.1 실험 결과

실험은 각각 실험번호를 2 회의 반복실험을 행하였고, 측정은 시편 하나의 3 곳 이상을 측정하였으며, 같은 시편 내에서 측정치의 차이가 작은 경우는 평균치를 선택하고, 차이가 매우 큰 경우는 가장 큰 값을 택하였다. 실험결과를 다음 Fig.3 과 같다. 1 차 실험과 2 차 실험의 결과가 비슷한 경향을 가지고 나타나기 때문에 판의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

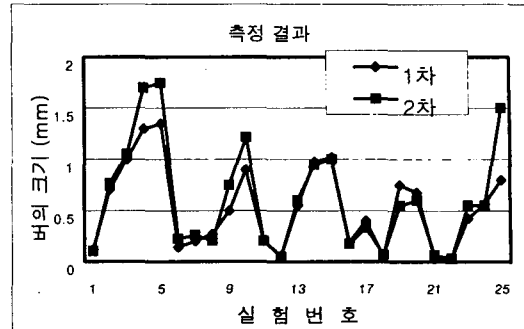


Fig.3 버의 측정 결과.

4.2 Signal-to-Noise ratio 분석

Fig.3 의 결과를 식(2)(3)에 적용하여 S/N ratio를 구한 결과 Fig. 4 와 같다. 대부분의 S/N ratio의 값이 대부분 양의 값을 가지며 이 가운데 커다란 값을 가지는 파라미터의 수준이 최적의 파라미터로서 선정될 수 있다. 전체 평균 S/N ratio는 8.91db 이다.

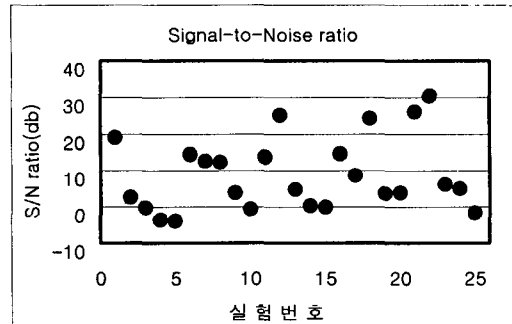


Fig.4. Signal-to-noise ratio

파라미터의 수준별로 S/N ratio를 Table 4. 에 나타내었다. 각각의 파라미터 중에서 가장 커다란 S/N ratio 값을 가지는 수준이 최적의 가공조건이 된다. 따라서 A5, B1, C1, D4, E3 수준이 최적의 수준이 된다. 즉 Number of Insert 는 1 개, In-plane exit angle 은 60 도, Depth of cut 은 2.5mm, Feed rate 는 127mm/min, 주축회전 속도는 1250rpm 이다.

Table. 4 파라미터 수준별 S/N ratio.

| Symbol | Signal-to-Noise Ratio | | | | |
|---------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D | E |
| Level 1 | 2.82 | 17.71 | 14.74 | 11.65 | 9.04 |
| Level 2 | 8.59 | 15.93 | 5.38 | 5.34 | 8.64 |
| Level 3 | 8.82 | 9.49 | 4.34 | 4.34 | 10.82 |
| Level 4 | 11.06 | 2.33 | 9.42 | 11.89 | 10.01 |
| Level 5 | 13.24 | -0.45 | 7.9 | 11.30 | 6.01 |

4.3 분산분석

분산분석을 통하여 어떤 파라미터가 버의 크기에 가장 영향을 끼치는지 자세히 알아 볼 수 있다. 분산분석을 하기 위하여 Table.4 에서 제시한 S/N ratio 를 가지고 계산할 수 있으며 Table .5 와 같다. F 값이 클수록 영향이 버의 크기에 많은 영향을 미치며, 기여도에서 큰 값을 가지게 된다. 따라서 B 인자가 가장 큰값을 가지는 것을 알 수 있고, A,C,D 인자가 고르게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 In-plane exit angle 이 버의 크기에 가장 큰 영향을 끼치며, Number of Insert, Feed rate, Depth of cut 이 골고루 영향을 끼침을 알 수 있다.

Table 5 분산분석표(ANOVA)

| Symbol | D.O.F | Sum of square | Mean square | F | 기여도 (%) |
|--------|-------|---------------|-------------|-------|---------|
| A | 4 | 302.82 | 75.71 | 1.45 | 12.6 |
| B | 4 | 1288.81 | 322.2 | 6.21 | 53.7 |
| C | 4 | 254.79 | 63.69 | 1.23 | 10.6 |
| D | 4 | 278.72 | 69.68 | 1.34 | 11.61 |
| E | 4 | 66.82 | 16.71 | 0.321 | 2.7 |
| Error | 5 | 207.58 | 41.516 | | |
| Total | 25 | 2399.55 | | | 100 |

5. 결 론

본 연구에서는 정면 밀링시 나타나는 버의 크기를 최소화하기 위하여 가공 파라미터의 최적화를 수행하였다. 최적화를 위하여 다구찌 방법의 파라미터 설계를 이용하였으며 최적의 가공 조건과 각각의 파라미터의 영향도 분석하였다. 결과적으로 최적의 파라미터는 알려진 바와 같이 In-plane exit angle 은 60도 부근이며, Depth of cut 은 Secondary burr 가 생기는 2.5mm 부근이다. 이외의 다른 파라미터는 각각 중간정도의 수준으로 최적화 되었다. 분산분석 결과에서는 In-plane exit angle 가 50%이상으로 버의 크기에 미치는 가장 중요한 파라미터이며, Number of Insert, Feed rate 과 Depth of cut 은 10%정도의 복합적으로 영향을 끼치고 있다. 이 논문은 많은 실험이 필요했던 버의 크기 최소화에 다구찌 방법을 적용하여 최적의 가공 파라미터를 정하는데 그 의미를 가지며, 향후 스텐인레스등 다양한 재료 및 세밀화된 실험조건을 설정하여 다양한 실험을 수행할 예정이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] Waichiro, Teruaki, Akihiro, Keiichi and Kensuke., "Study of Burr Formation in Face milling," Bull Japan Soc. Of prec. Engg. Vol 15 NO. 1 1981.
- [2] Gwo-lianq Chern, Ph.D. dissertation, "Analysis of burr formation and Breakout in metal cutting," U.C Berkeley. 1993. pp. 116-149
- [3] O. Olvera and G. Barrow, "An Experimental Study Of Burr Formation In Square Shoulder Face Milling," Int J. Mach Tools Manufact Vol 36 No. 9. pp 1005-1020 .
- [4] O. Olvera and G. Barrow, "Influence of exit angle and tool nose geometry on burr formation in face milling operations," Proc Instn Mech Engrs Vol 212. Part B. pp59-72
- [5] 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. Manufacturing Science and Engineering. 1999 Vol 121 pp13-18
- [6] 김성일, 이위로, 김태영, "단인파 다인 정면 밀링의 가공특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지. 제 12 권. 제 4 호. 1995. 4 pp. 19-27
- [7] 박성현, "응용실험계획법," 영지문화사. 1998.
- [8] C.Y. Nian, W.H. Yang, and Y.S. Tarnq, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics," J. Materials Processing Technology. 1999.