

실험적 방법을 통한 Metal slitting saw의 형상 및 절삭 조건의 최적화

정경득*(영남대 대학원 기계공학과), 고태조(영남대 기계공학과), 김희술(영남대 기계공학과)

Optimization of a geometric form and cutting conditions of a metal slitting saw by experimental method

K. D. Jung(Mech. Eng. Dept., YNU), T. J. Ko(Mech. Eng. Dept., YNU),
H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., YNU)

ABSTRACT

Built-up edge affects the surface integrity of the machined surface and tool wear. Tool geometry and cutting conditions are very important factors to remove BUE. In this paper, we optimized the geometry of the metal slitting saw and cutting conditions to remove BUE by the experiment. In general, the metal slitting saw is plain milling cutter with thickness less of a 3/16 inch. This is used for cutting workpiece where high dimensional accuracy and surface finish are necessary. The experiment was planned with Taguchi method that is based on the orthogonal array of design factors(coating, rake angle, number of tooth, cutting speed, feed rate). Response table was made by the value of the surface roughness, the optimized tool geometry and cutting conditions through response table could be determined. In addition, the relative effect of factors were identified by the variance analysis. Finally, coating and cutting speed turned out important factors.

Key Words : Metal slitting saw(메탈 슬리팅 소), Built-up edge(구성인선), Taguchi method(다구찌 방법) Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서론

오늘날 산업이 발전함에 따라 생산성 향상과 부품의 가공 품질을 높이기 위해 많은 노력이 행하여지고 있다. 이 중 절삭가공시 정밀한 가공면을 얻기 위해 표면 거칠기는 매우 중요한 요소이다. 표면 거칠기에 영향을 미치는 원인은 구성인선, 공구의 마모, 채터링, 불연속칩 등을 들 수 있다. 특히, 구성인선은 절삭하는 동안 가공물의 표면 품위, 공구 마모, 칩생성 등에 매우 큰 영향을 미친다.^[1] 이러한 구성인선은 1892년 Hauser, 1908년 F.W.Taylor 이후 꾸준히 연구되고 있으며, 현재는 주로 AE 센서, Force 센서를 이용하여 구성인선을 감시하는 방향으로 연구되고 있다.^{[2][3]}

본 연구에서는 절삭날 폭이 3/16" 이하인 plain milling cutter의 일종인 metal slitting saw에서 구성인선을 고려한 공구 형상과 절삭조건의 최적화에 대해 연구하였다.

일반적으로 metal slitting saw는 치수정밀도가 높고, 가공물의 표면 거칠기가 좋은 절단 또는 홈절삭 가공면을 얻고자할 때 주로 사용된다. 본 연구에서는 Fig.1과 같이 제침(knitting needle)의 홈절삭에 사용하는데, 구성인선의 발생으로 인하여 치수 정밀도와 가공물의 품질이 저하되고, 심할 경우 가공물과 공구가 눌러붙어 공구가 파단하게 된다. 이러한 구성인선을 제거하기 위한 일반적인 방법은 경사각을 크게 하거나, 절삭속도를 크게 하고, chip과 공구 사이의 마찰을 적게 한다. 따라서 마찰계수를 적게 하기 위해서는 공구의 면을 매끄럽게 가공하고, 절삭유와 초경공구와 같이 마찰 계수가 적은 공구 사용하거나, 코팅한 공구를 사용한다.^{[2][4][5]}

본 연구에서는 metal slitting saw로 절삭하는 과정 중에 구성인선을 고려하여 통계적 실험적인 방법인 Taguchi 방법을 통한 최적의 공구 기하학적 형상과 절삭조건의 선정으로 생산성 및 가공품질 향상시키고자 한다.

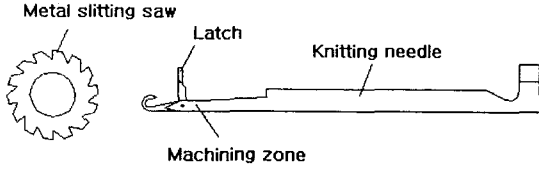


Fig. 1 Metal slitting saw and Knitting needle

2. Taguchi 방법의 적용¹⁸⁾¹⁹⁾

제품 특성의 목표치가 m 이고, 제품의 실질 특성치가 y 인 경우에 손실함수는

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

으로 정의된다. 여기서 k 는 상수이다.

좋은 품질의 제품은 이 손실함수의 작게 해주는 것인데, Taguchi 방법에서는 이 손실함수에 근거하여 만들어진 S/N비(signal to noise ratio)를 특성치로 하여 최적의 인자를 찾아주는 방법으로 사용된다. 본 실험에서는 표면 거칠기 R_a 값이 작을수록 제품이 좋기 때문에 망소 특성 즉, 손실함수에서 목표치 m 이 0이고 y 값이 작을수록 좋으며 S/N비는 다음과 같이 구한다.

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

n : 반복회수 y_i : 반복 데이터

실험은 직교배열에 의하여 하게된다. 이 직교배열은 고려해야 할 인자(Factor) 수와 각 인자에 대해 수준(Level)이 많을 경우에 사용하면 실험의 수를 줄일 수 있고, 또 효과적으로 실험 목적에 영향을 미치는 인자를 추정할 수 있다. 직교배열에 의해 실험을 행한 후, 망소특성에 의해 구해진 각각의 S/N비를 가지고, 응답 테이블을 만들게 되는데, 이것은 각 인자를 변화 시켰을 때, 목적치에 미치는 정도를 표로 나타낸 것이다. 이 경우에 목적치에 큰 영향을 미치는 인자를 선택한 후, 확인 실험을 통해 인자의 영향이 타당한지 확인해야한다.

그리고 마지막으로 서로 다른 인자들이 표면 거칠기에 영향을 주는 정도는 다르다. 이 상대적인 효과는 분산을 분해함으로써 보다 잘 파악 할 수 있는데, 이를 분산 분석이라 한다. 분산 분석의 주요 목적은 다양한 인자의 상대적인 중요성을 결정하기 위한 것이다. 분산 분석에서 분산비가 가지는 의미는 $F < 1$ 일 때 그 인자의 효과가 가법모델의 오차보다 작음을 의미하고, $F > 2$ 면 인자의 효과가 아주 작지 않다는 것을, 반면에 $F > 4$ 면 꽤 큰 것을 의미한다.

분산 분석을 하기 위해서는 다음 식이 필요하다.

$$\text{분산비}(F) = \frac{\text{인자의 평균제곱}}{\text{오차평균제곱}} \quad (3)$$

$$\text{평균제곱} = \frac{\text{어떤 인자에 대한 제곱합}}{\text{어떤 인자의 자유도}} \quad (4)$$

$$\text{총 제곱합} = \sum_{i=1}^n (\eta_i - m)^2 \quad (5)$$

여기서 m : 전체 측정된 S/N 비의 평균

η_i : 각 인자의 S/N 비

$$\text{기여율} = \frac{\text{어떤 인자의 제곱합}}{\text{총제곱합}} \times 100(\%) \quad (6)$$

3. 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 스프링강인 SK5(100× 80× 6) 압연강재를 metal slitting saw로 절삭하였다. 산업 현장에서는 두께 2mm의 압연강재로 제침이 가공된 상태에서 Latch가 들어갈 부분을 전용기로 단속적인 홈절삭을 하지만, 본 실험에서는 머시닝센터(DAEWOO AV45)에서 좀 더 용이하게 실험하기 위해 연속적인 절삭을 하였다. 머시닝센터에 공구를 장착할 수 있도록 arbor를 제작하였으며, 공작물을 공구 동력계 위에 장착할 수 있도록 치구를 제작하였다. 공구의 직경은 20mm이고, 기하학적인 형상은 참고 문헌을 인용하여 KS B 3281에 의해 설계, 제작하였다.

Fig.2는 실험장비와 절삭력 신호의 처리 과정이다. 절삭력을 측정하기 위해 공구 동력계(KISTLER 9257B) 위에 공작물을 장착하고, 증폭기(KISTLER 5019)를 통해 증폭된 신호를 DAT Recorder(TEAC RD-135T)에 저장하였다. 이 아날로그 데이터를 A/D Converter(DT2833 Board)를 통해 5000Hz 샘플링하여 PC에 저장하고 분석하였고, 공구현미경(Mitutoyo TM301)으로 공구의 플랭크 마모와 측면 마모 및 절삭날에 붙은 구성인선을 관찰하였다. 또, 구성인선은 chip 밀면이나 가공물의 표면에 잔해가 남으므로¹⁷⁾, 가공물의 표면의 거칠기를 측정하였다. 표면 거칠기 측정은 표면 조도계(Mitutoyo Surf-301)를 사용하여 cut off 길이 2.4mm로 표면 거칠기 R_a 를 얻었다. 표면 거칠기는 구성인선과 관련있으므로 S/N비를 구하는 데이터로 이용된다.

실험 조건은 먼저 구성인선에 영향을 미치는 인자로서 코팅의 유무, 공구의 기하학적인 형상(경사각, 날수), 절삭속도, 이송속도를 고려하여 인자 수준 변화에 균형이 있도록 구성하였다. 코팅은 일반적으로 공구와 공작물의 마찰력을 감소시켜 마모가 감소하고, 구성인선을 감소시키므로¹⁵⁾¹⁶⁾, TiAlN 다층 코팅을 한 경우와 하지 않은 경우로 하였으며, 공구의 형상은 문헌을 인용하여 경사각, 날수를 일반적으로 사용되는 세 수준으로 나누었으며, 절삭속도와 이송 속도는 상용 절삭조건을 인용하여 커져,

중간, 최고 세 수준으로 하였다.(Table 1) 그리고 절삭깊이는 1.8mm로 고정하였다.

이상과 같은 인자와 수준을 모두 고려하여 실험을 하려면 2×3^4 즉, 162번의 실험이 필요하다. 하지만 직교 배열을 구성하면 인자가 서로 독립적이라는 가정 하에 다른 인자의 영향을 받지 않아 18회만의 실험으로 각 인자의 영향을 평가할 수 있다. 이 실험에서는 표준 직교배열(L_{18})을 이용하여 테이블을 작성하여 실험을 행하였다.(Table 2)

Table 1 Factors and levels

	coating	Rake angle (°)	No. of tooth	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/tooth)
1	non-coating	3	18	94.25(1500rpm)	0.00041
2	coating	6	22	157.1(2500rpm)	0.00071
3		9	24	219.91(3500rpm)	0.00101

Table 2 Orthogonal array (L_{18})

Experiment No.	coating	Rake angle	No. of tooth	Cutting speed	Feed rate
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	1	2
5	1	2	2	2	3
6	1	2	3	3	1
7	1	3	1	2	1
8	1	3	2	3	2
9	1	3	3	1	3
10	2	1	1	3	3
11	2	1	2	1	1
12	2	1	3	2	2
13	2	2	1	2	3
14	2	2	2	3	1
15	2	2	3	1	2
16	2	3	1	3	2
17	2	3	2	1	3
18	2	3	3	2	1

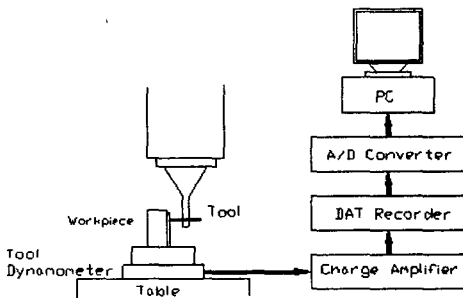


Fig.2 Schematic diagram of experimental setup

4. 실험결과 및 고찰

Table 2의 직교배열에 따라 실험한 후, 공작물에 서 20개의 가공면을 샘플링하여 표면 거칠기를 측정

하였다. Fig. 3은 표면 거칠기 값을 그래프로 나타낸 것이다. 측정된 값을 가지고 표면 거칠기가 양호한 값부터 1에서 10까지 값을 주어 방소특성을 이용하여 Table 3과 같이 S/N비를 구하였다. 다음으로 Table 4와 같이 응답 테이블을 만들어 각 인자의 수준 변화에 따라 큰 인자를 선택할 수 있다. 여기서 응답테이블의 값은 각 인자에 해당하는 모든 값을 합하여 평균을 취한 값이다. 이 테이블에서 해칭한 부분이 각 인자 중 영향이 가장 큰 인자의 수준을 나타낸다. Table 4에서 보면, 절삭속도와 코팅이 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 많이 미치는 것을 볼 수 있다. 이러한 각 인자간의 상대적인 효과는 분산 분석을 함으로써 좀 더 확실히 알 수 있다.

Table 5는 앞의 식(3~6)을 이용하여 분산 분석한 결과이다. 코팅의 경우에 분산비가 4이상으로 인자의 효과가 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 코팅으로 인하여 공구와 피삭재의 마찰계수가 감소함으로써 구성인선이 감소했기 때문에 표면 거칠기에 상당한 영향 미쳤다고 사료된다. Fig. 4는 직교 배열 번호에 따라 공구에 발생한 구성인선의 발생 빈도를 나타낸 그림이다. (a)는 경사면과 측면에 발생한 전체 구성인선의 발생 빈도이고, (b)는 측면 구성인선 발생 빈도만 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보면 코팅 공구에서 구성인선이 발생하는 빈도가 무코팅에 비해 훨씬 적음을 알 수 있으며, 이것은 코팅이 구성인선을 억제하는데 효과적이라고 할

Table 3 S/N ratio(dB)

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/N ratio	-17.05	-11.69	-12.84	-16.15	-10.31	-14.23	-13.62	-11.68	-20
Experiment No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S/N ratio	-10.7	-4.77	-9.16	-3.98	-10.41	-20	-12.24	-12.43	-5.12

Table 4 Response Table(dB)

Level	Coating	Rake angle	No. of tooth	Cutting speed	Feed rate
1	-14.24	-11.14	-12.39	-15.17	-10.97
2	-9.87	-12.52	-10.22	-8.98	-13.49
3		-12.52	-13.56	-12.02	-11.71

Table 5 Variance analysis

	Degree of freedom	Sum of square(dB)	Average of sum of square(dB)	Variance ratio (F)	Percentage contribution (%)
Coating	1	86.12	86.12	5.93	23.6
Rake angle	2	7.6	3.8	0.26	2.08
No. of tooth	2	34.52	17.26	1.19	9.46
Cutting speed	2	114.88	57.44	3.96	31.48
Feed rate	2	20.14	10.07	0.69	5.52
Error	8	101.16	14.52		
Sum	17	364.33			

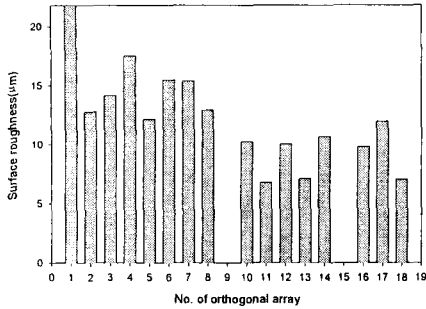


Fig. 3 Graph of surface roughness

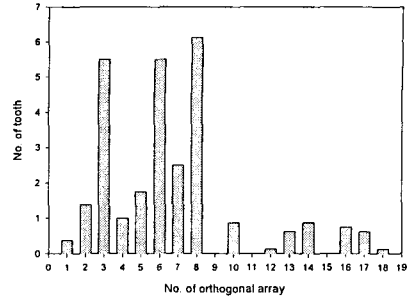
할 수 있다. 그리고 무코팅 공구에서는 전체 구성인선 발생 빈도로는 표면 거칠기에 대한 영향을 비교할 수 없었으나, (b)의 경우에 측면 구성인선 발생 빈도로서 그 영향을 확인 할 수 있었다. 이것으로 보아 이 실험에서는 경사면 보다 측면에 발생한 구성인선의 영향이 더 큼을 확인 할 수 있었다.

Fig. 5는 무코팅 공구(직교배열번호 2, 16m 가공 후)와 코팅공구(직교배열번호 11, 16m 가공 후)의 플랭크 면과 측면을 촬영한 사진이다. 이 사진에서도 보듯이 코팅공구에서는 거의 경사면과 측면 모두 구성인선이 발생하지 않았다.

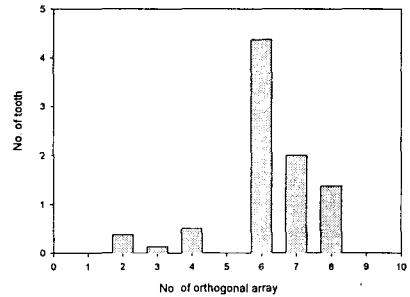
절삭속도 역시, 분산비를 보면 표면거칠기에 적지 않은 영향을 미친다고 할 수 있다. 반면에 경사각과 이송속도는 인자의 수준이 증가하여도 표면 거칠기에 영향을 미치지 못했다. 기여도면에서 볼 때, 절삭속도와 코팅이 31.4, 23.6%로 표면 거칠기에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 공구에 대해 16m 절삭하는 동안 2m 구간으로 플랭크 마모를 측정된 데이터이다. 일반적으로 절삭길이가 길어짐에 따라 마모가 증가하고 있다. 하지만 코팅을 한 공구는 내마모성이 좋은 것에 반하여 마모량이 많음을 볼 수 있다. 이는 불안정한 구성인선은 공구마모를 증가시키는데 반하여, 안정된 구성인선은 공구 수명을 연장하는 보호층의 형성으로¹⁾ 무코팅 공구가 마모량이 적은 것으로 사료된다. Fig. 7은 직교배열 13번, 코팅 공구에 대하여 6m 절삭하는 동안 0.5m간격으로 절삭력을 측정하여 도시한 그래프이다.

일반적으로 절삭 길이가 길어지고 마모량이 커짐에 따라 절삭력은 증가하지만, Fig. 7에서는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 본 실험에서 절삭 깊이가 1.8mm로 고정됨으로 인하여 Fig. 8에서 보는 바와 같이 플랭크 마모와 측면 마모가 커짐에 따라, 절삭면적이 감소하기 때문에 절삭력이 감소된다고 생각된다.



(a) Total (Built-up Edge of a rake face and a side face)



(b) Built-Up Edge of a side face

Fig. 4 The number of Built-Up Edge generated tooth



(a) Non-coating



(b) Coating

Fig. 5 Photograph of flank face and side face

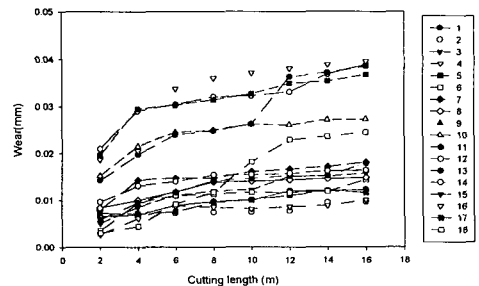


Fig. 6 The relation between flank wear and cutting length

