

구성인선을 고려한 소형 박판 밀링공구의 설계

정경득*, 고태조**, 김희술**

Design of A Small Thin Milling Cutter Considering Built-up Edge

Kyoung Deuk Jung*, Tae Jo Ko**, and Hee Sool Kim**

ABSTRACT

Generally, a metal slitting saw is plain milling cutter with thickness less than 3/16 inch. This is used for cutting a workpiece that high dimensional accuracy and surface finish is necessary. A small thin milling cutter like a metal slitting saw is useful for machining a narrow groove. In this case, built up edge (BUE) is severe at each tooth and affects the surface integrity of the machined surface and tool wear. It is well known that tool geometry and cutting conditions are decisive factors to remove BUE. In this paper, we optimized the geometry of the milling cutter and selected cutting conditions to remove BUE by the experimental investigation. The experiment was planned with Taguchi method based on the orthogonal array of design factors such as coating, rake angle, number of tooth, cutting speed, feed rate. Response table was obtained from the number of built-up edge generated at tooth. The optimized tool geometry and cutting conditions could be determined through response table. In addition, the relative effect of factors was identified by the analysis of variance (ANOVA). Finally, coating and cutting speed turned out important factors for BUE.

Key Words : Milling cutter(밀링공구), Design(설계), Built-up edge(구성인선), Taguchi method(다구찌 방법)

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 인자는 절삭조건, 구성인선, 공구 마모, 채터진동, 불연속칩 등을 들 수 있다. 특히, 구성인선은 절삭하는 동안 가공물의 표면 품질, 공구 마모, 칩생성 등에 큰 영향을 미친다.^[1]

이러한 구성인선은 오래전부터 연구가 되었으

며, 최근에는 구성인선이 선삭작업에 있어서 절삭력을 변동시키는 원인이 되기 때문에 이를 이용하여 구성인선을 검출하려는 연구가 Inasaki 등에 의해 이루어졌다.^[2] 그리고 Mathew 등은 인선반지름을 갖는 경사절삭에서 절삭력과 함께 구성인선을 검출하기 위한 모델을 개발하였다.^[3] 한편, Oishi는 경화강의 정밀가공에 영향을 미치는 구성인선의 제거에 관한 연구를 하였다.^[4] 또한 Lin은 구성인선에 의해 치핑이 발생하고, 이로 인한 정면밀링공구의 파단과 신뢰성에 관해 발표를 하였다.^[5] 이러한 구성인선은 표면에 TiN을 코팅시키거나 공구형상

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 영남대학교 기계공학부

을 바꿈에 의해서 상당히 감소시킬 수가 있음이 밝혀졌다.^[6-7]

이러한 연구들은 선삭 공구에 대한 연구이지만, 구성인선은 선삭 공구뿐만 아니라 밀링 공구에서도 중요하다. 특히 금속의 절단에 사용되는 metal slitting saw는 치수정밀도가 높고, 가공물의 표면 거칠기가 좋은 절단 또는 홈 절삭 가공면을 얻고자할 때 주로 사용된다. 작은 홈을 가공할 목적으로 소형 박판 밀링 공구를 사용할 때는 구성인선이 가공면의 표면품위를 결정하는 중요한 변수가 된다.

본 연구에서는 소형 박판 밀링공구를 이용하여 Fig.1과 같은 제침(knitting needle)의 홈을 절삭할 때 발생하는 구성인선을 최소화하여 가공면의 치수 정밀도와 표면조도를 향상하고자 공구를 최적으로 설계함을 목적으로 한다. 이러한 구성인선을 제거하기 위한 일반적인 방법은 경사각을 크게 하거나, 절삭속도를 크게 하고, chip과 공구 사이의 마찰을 적게 하는 것이다. 즉, 공구의 면을 매끄럽게 가공하고, 절삭유, 초경공구, 코팅한 공구를 사용하고 있다. 이러한 개념을 바탕으로 본 연구에서는 소형 박판 밀링공구로서 절삭하는 과정 중에 구성인선을 고려하여 통계적 실험적인 방법인 Taguchi 방법을 통하여 최적의 공구 기하학적 형상과 절삭조건을 선정하고자 한다.^[8-11]

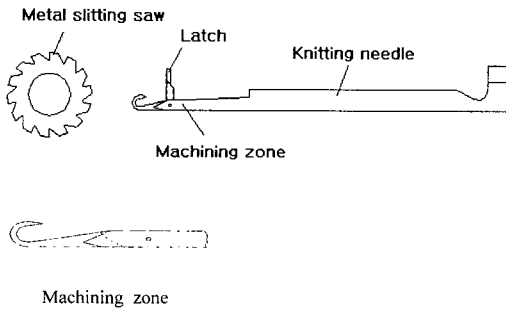


Fig. 1 Metal slitting saw and knitting needle

2. 실험 장치 및 방법

실제 제침의 가공은 두께 2 mm의 스프링강 (SK5) 압연강재로 외곽형상이 가공된 후 래치 (latch)가 들어갈 부분을 전용기로 단속적인 홈절삭을 한다. 그러나 본 실험에서는 절삭실험의 효율성

을 위해서 Fig. 2와 같이 스프링강(SK5: 100× 80× 6 mm) 압연강재를 위에서부터 아래로 머시닝센터를 이용하여 연속적으로 홈 절삭하였다. 박판공구를 머시닝센터에 장착하기 위해서는 별도의 아버를 제작하였으며, 공작물을 공구 동력계 위에 장착할 수 있도록 치구를 제작하였다. 공구의 직경은 20 mm이고, 기하학적인 형상은 KS B 3281에 의해 설계, 제작하였으며, 재료는 초경이고, 그 치수는 Fig. 3과 같다.

Fig. 2는 실험장비와 절삭력 신호의 처리 과정의 개략도이다. 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 5000Hz로 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 남아 가공물의 표면 품위를 나쁘게 하기 때문에, 가공물의 표면의 거칠기도 측정하였다. 표면 거칠기 측정은 표면 조도계(Mitutoyo Surf-301)를 사용하여 cut off 길이 2.4 mm로 표면 거칠기 Ra를 얻었다.

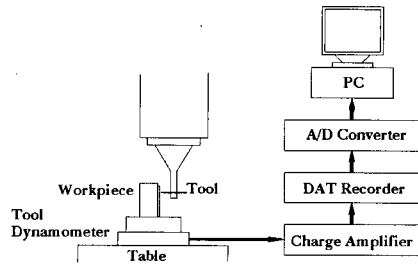


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

3. 실험계획

실험은 2단계로 진행되는데, 첫 번째는 공구의 최적형상을 결정하기 위한 것이고, 두 번째는 절삭조건을 선정함이 목적이다. 공구의 형상은 경사각, 여유각, Land, 절삭날수를 설계인자로 하여 Table 1과 같이 레벨을 세 가지로 나누어 Table A-1

(Appendix A)과 같이 표준 직교 배열표(L9)를 작성하여 공구를 설계, 제작하여 실험을 행하였다. 이때 절삭조건은 절삭깊이는 1.8 mm, 주축 회전수는 3500 rpm, 이송속도를 120 mm/min 로 고정하였다.

다음으로 최적의 절삭조건을 구하기 위해 다시 한번 더 실험을 행하였다. 이때 실험 조건은 구성인선에 영향을 미치는 인자로서 코팅의 유무, 공구의 기하학적 형상(경사각, 날수), 절삭속도, 이송속도를 고려하여 인자 수준 변화에 균형이 있도록 Table 2와 같이 구성하였다. Table 2에서 경사각은 Table 1보다는 넓은 범위의 값으로 하였는데 이는 Table 1로 절삭한 경사각의 값이 작을 때가 보다 유리하기 때문에 범위를 넓힌 값이다. 코팅은 TiAlN 다층 코팅을 한 경우와 하지 않은 경우로 하였다.

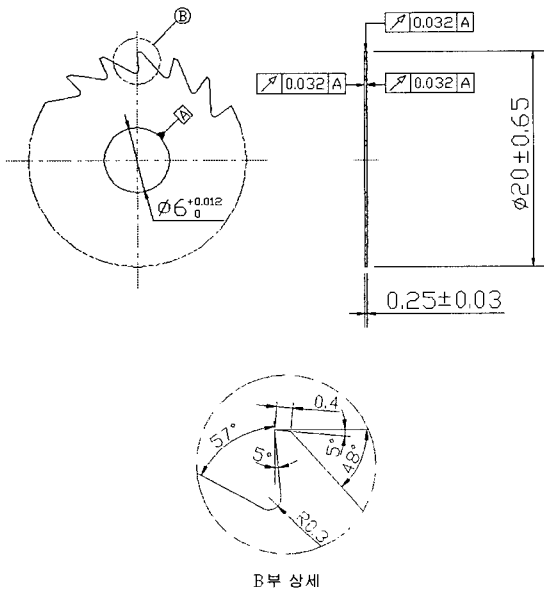


Fig. 3 Drawing of the milling cutter

한편 이 경우 구성인선에 영향을 미쳤던 공구경사각과 절삭날수를 다시 절삭조건과 함께 비교함으로써 상대적인 중요성을 검증하였다. 이에 해당하는 표준 직교배열(L18)을 이용하여 테이블을 작성하여 실험을 행하였는데, Table A-2(Appendix A)는 이에 해당하는 직교배열표이다.

Table 1 The factors and the corresponding levels

Factor/Level	Rake angle(°)	Clearance angle(°)	No. of tooth	Land width (mm)
1	5	5	18	0.4
2	6	10	22	0.6
3	7	12	24	0.8

Table 2 The factors and the corresponding levels

Factor/Level	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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 기하학적 형상 선정

Table A-1의 직교배열에 따라 실험을 한 후, 구성인선 발생 날수를 가지고 Taguchi방법의 망소특성을 이용하여 Table 3과 같이 S/N비를 구하였다.^[12] Table 4는 S/N비를 가지고 응답테이블을 만든 것으로 해칭한 부분은 각 인자에 대하여 가장 큰 영향을 미친 수준을 나타낸다. 여기서 응답테이블의 값은 각 인자에 해당하는 모든 값을 합하여 평균을 취한 값이다.

응답 테이블로부터 공구는 경사각이 작고, 여유각이 크며, 날 수가 많은 것이 유리한 것으로 나타났다. 그리고 랜드 폭은 구성인선에 대해 크게 영향을 미치지 않는다.

Table 3 S/N ratio(dB)

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/N	-17.4	-17.8	-14.1	-18.5	-18.5	-17.8	-17.8	-19.4	-16.9

Table 4 Response table (dB)

Factor/Level	Rake angle	Clearance angle	No. of tooth	Land width
1	-16.43	-17.9	-18.2	-17.6
2	-18.3	-18.6	-17.73	-17.3
3	-18.03	-16.27	-16.8	-16.5

4.2 기하학적 형상을 고려한 절삭조건 선정

4.1절의 기하학적 형상중 여유각은 12° , chip pocket의 깊이는 1.7mm로 고정을 한 상태에서 최적의 절삭조건을 구하였다. Table A-2의 직교배열에

따라 실험을 한 후, 구성인선 발생 날수를 가지고 망소특성을 이용하여 Table 5와 같이 S/N비를 구한 후, Table 6과 같이 응답 테이블을 만들어 각 인자의 수준 변화에 따른 영향을 분석할 수가 있었다. Table 6에서 보면, 코팅이 구성인선 생성에 가장 영향을 많이 미치는 것을 볼 수 있다. 이러한 각 인자 간의 상대적인 효과는 분산 분석을 함으로써 좀 더 확실하게 알 수 있다.

Table 7은 분산 분석한 결과이다. 코팅의 경우에 분산비가 3 정도로 인자의 효과가 큼을 알 수 있다. 그 이유는 코팅으로 인하여 공구와 피삭재의 마찰계수가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4는 무코팅 공구(직교배열번호 2)와 코팅공구(직교배열번호 11)로 피삭재를 16 m 가공한 후의 플랭크면과 측면의 사진이다. 이 사진에서도 보듯이 코팅공구에서는 거의 경사면과 측면 모두 구성인선이 발생하지 않았다. 기여도면에서 볼 때, 코팅이 구성인선 생성에 19.6 % 정도, 그리고 절삭속도가 12.14 % 정도 미친다는 것을 알 수 있다.

다음은 표면 거칠기의 데이터를 Taguchi방법에 적용하였다. 공작물에서 20개의 가공면을 샘플링하여 표면 거칠기를 측정하고, 망소특성을 이용하여



(a) Non-coated cutter



(b) Coated cutter

Fig. 4 Photograph of flank and side face

Table 8과 같이 S/N비를 구하였다. 다음으로 Table 9와 같이 응답 테이블을 만들었다. Table 10과 같이 분산분석을 해본 결과, 앞의 구성인선 발생날수에서의 결과와 비슷한 경향이 나타났는데, 절삭속도와 코팅이 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 또, 분산비를 보면 코팅은 표면 거칠기에 많은 영향을 미치고, 절삭속도 역시 영향을 미친다. 반면에 경사각과 이송속도는 인자의 수준이 증가하여도 표면 거칠기에 큰 영향을 미치지 못했다. 기여도면에서 볼 때 절삭속도와 코팅이 각각 31.4, 23.6%로 표면 거칠기에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 표면 거칠기 값을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 그래프에 나타낸 표면 거칠기 값은 20개 샘플링한 가공면을 각각 3번씩 측정하여 평균한 것을 합한 값이다.

Fig. 6은 직교 배열 번호에 따라 공구에 발생한 구성인선의 발생 빈도를 나타낸 그림이다. Fig. 6(a)는 경사면과 측면에 발생한 전체 구성인선의 발생 빈도이고, Fig. 6(b)는 측면에서의 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 말할 수 있다. 그리고 무코팅 공구에서는 전체 구성인선 발생 빈도를 이용하여 표면 거칠기에 대한 영향을 비교할 수는 없고, Fig. 6(b)의 측면 구성인선 발생 빈도로서 그 영향을 확인 할 수 있었다. 이것으로 보아 이 실험에서는 경사면 보다 측면에 발생한 구성인선이 표면 거칠기에 큰 영향을 줌을 알 수 있었다.

Table 5 S/N ratio(dB)

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/N ratio	-5.64	-8.92	-16.7	-7.12	-10.1	-17.18	-15.24	-19	-19.1
Experiment No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
S/N ratio	-13.2	-1.54	-1.38	-8.59	-6	-22.92	-6.8	-5.36	-1.38

Table 6 Response table(dB)

Level \ Factor	Coating	Rake angle	No. of tooth	Cutting speed	Feed rate
1	-13.22	-7.9	-9.43	-10.28	-7.83
2	-7.46	-11.97	-8.48	-7.6	-11.02
3		-11.14	-13.12	-13.15	-12.17

Table 7 Variance analysis

	Degree of freedom	Sum of square (dB)	Average of sum of square	Variance ratio F	Percentage contribution (%)
Coating	1	149.1	149.1	3.15	19.6
Rake angle	2	55.77	27.88	0.59	7.3
No. of tooth	2	71.84	35.92	0.75	9.4
Cutting speed	2	92.47	46.24	0.98	12.14
Feed rate	2	60.54	30.27	0.63	8
Error	8	331.62	47.37		
Sum	17	761.29			

4.3 공구마모와 절삭력 분석

Fig. 7은 각 공구에 대해 16 *m* 절삭하는 동안 2 *m* 구간으로 측정한 플랭크 마모 그래프이다. 일반적으로 절삭길이가 길어짐에 따라 마모가 증가한다. 그러나 코팅을 한 공구는 내마모성이 좋은 것에 반하여 마모량이 많음을 볼 수 있다. 이는 불안정한 구성인선이 공구마모를 증가시키는데 반하여, 안정된 구성인선은 공구 수명을 연장하는 보호층 역할을 하기 때문에 무코팅 공구가 마모량이 작은 것으로 사료된다. Fig. 8은 직교배열 13번인 코팅

Table 8 S/N ratio(dB)

Experiment No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/N ratio	-17.65	-11.69	-12.84	-16.15	-10.31	-14.23	-13.62	-11.69	-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 9 Response table(dB)

Factor 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 10 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	364.93			

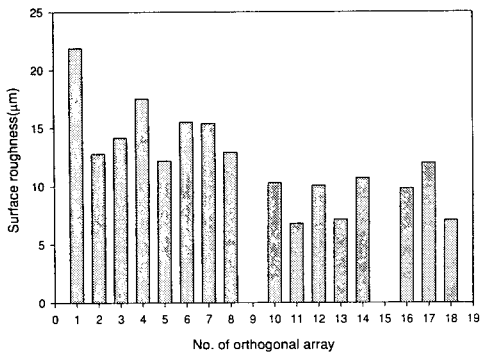
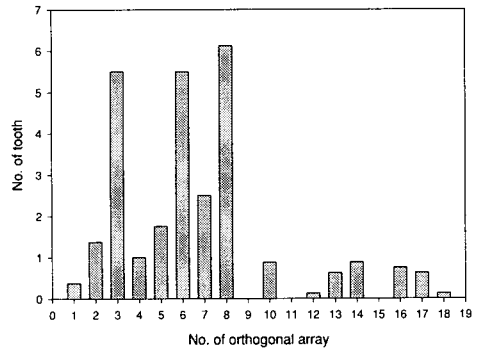
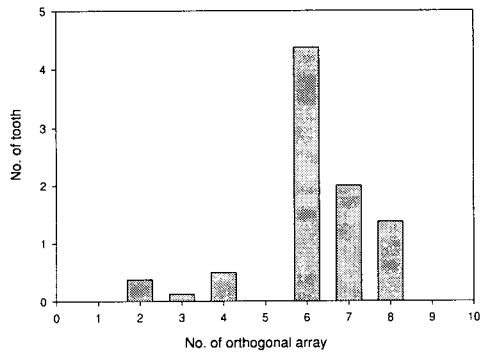


Fig. 5 Graph of surface roughness

공구에 대하여 16 *m* 절삭하는 동안 0.5 *m* 간격으로 절삭력을 측정하여 도시한 그래프이다. 일반적으로 절삭 길이가 길어지고 마모량이 커짐에 따라 절삭력은 증가하지만, Fig. 8에서는 감소하는 경향을



(a) Total built-up edge generated at rake and a side face



(b) Built-up edge at a side face

Fig. 6 The number of built-up edge generated at tooth

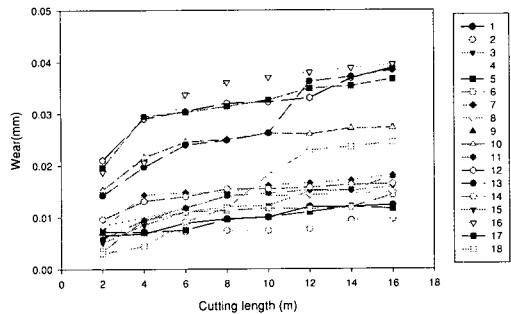


Fig. 7 The relation between flank wear and cutting length

볼 수 있다. 이는 본 실험에서 절삭깊이가 1.8 mm로 고정됨으로 인하여 Fig. 9에서 보는 바와 같이 플랭크 마모와 측면 마모가 커짐에 따라, 절삭면적이 감소하기 때문에 절삭력이 감소된다고 생각된다. 또한 본 연구에서는 진동에 의한 절삭력의 동적 성분을 고려하지 않았는데, 공구의 마모가 진전되면서 절삭날의 평준화현상이 나타나고 이로 인하여 절삭날에서 동적 성분이 감소하는 것도 평균 절삭력을 감소시키는 한가지 원인으로 생각할 수가 있다.

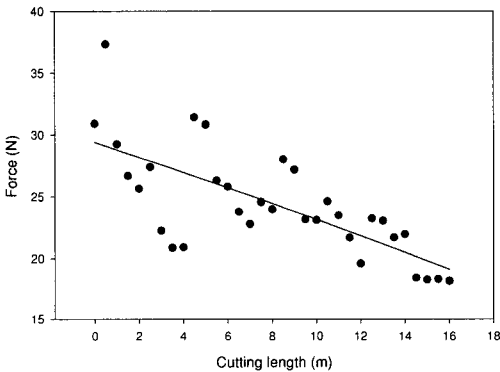


Fig. 8 Cutting force of orthogonal array No. 13

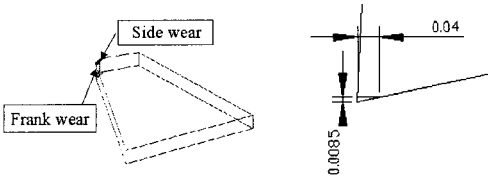


Fig. 9 Trend of frank and side wear

5. 결론

실험적인 방법으로 소형박판밀링공구의 기하학적인 형상과 절삭조건을 선정하는 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Taguchi 방법으로 실험한 결과 구성인선이 적게 발생하는 공구의 기하학적인 형상은 경사각이 작고, 여유각은 커야하며, 날수는 많은 것, 그리고 Land 폭은 큰 것이 좋았다.
2. 구성인선 발생에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 코팅입을 알 수 있었다. 반면에 경사각, 날수,

이송속도는 코팅에 비하여 큰 영향을 미치지 못한다. 또한, 표면 거칠기 측면에서 보면 가장 큰 영향을 미치는 인자는 절삭속도와 코팅입을 알 수 있었다. 최적의 기하학적 형상과 절삭조건은 공구에 코팅을 하였을 때 경사각이 작고, 날수 22날, 절삭속도 157.1m/min (2500rpm), 이송속도는 낮은 것이 좋은 것으로 나타났다.

3. 표면 거칠기는 구성인선 발생 빈도가 높을수록 좋지 않았으며, 특히 무코팅 공구의 경우, 측면에 발생한 구성인선에 많은 영향을 받았다.

4. 마모의 경우, 무코팅 공구가 마모량이 적었는데, 이는 구성인선이 날끝을 보호했기 때문이라 보여진다. 또 절삭력은 절삭깊이와 마모량이 커짐에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 이는 마모에 의해 절삭면적이 감소하기 때문이다.

참고문헌

1. K. Iwata, K. Ueda, "Fundamental analysis of the mechanism of built-up edge formation based on direct scanning electron microscope observation," *Wear*, Vol. 60, pp. 329-337, 1980.
2. S. Sukvittayawong, I. Inasaki, "Detection of built-up edge in turning process," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 6, pp. 829-840, 1994.
3. J. A. Arsecularatne, R. F. Fowle, P. Mathew, "Nose radius oblique tool: Cutting force and built-up edge prediction," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 36, No. 5, pp. 585-595, 1996.
4. K. Oishi, "Built-up edge elimination in mirror cutting of hardened steel," *ASME J. of Engng. for Ind.*, Vol. 117, No. 2, pp. 62-66, 1995.
5. T. Lin, "Reliability and failure of face-milling tools when cutting stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 41-46, 1996.
6. V. C. Venkatesh, W. Xue, "A study of the built-up edge in drilling with indexable coated carbide insert," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 58, pp. 379-384, 1996.
7. S. Karagöz, H. F. Fischmeister, "Metallographic observations on the wear process of TiN-coated cutting tools," *Surface and Coating Technology*,

Vol. 81, pp. 190-200, 1996.

8. D. B. Lewis, S. R. Bradbury, M. Sarwar, "Analysis of the wear and failure mechanism that develop in high speed steel circular saw blades when machining nickel-based alloys," *Wear*, Vol. 197, pp. 74-81, 1996.
9. Y. L. Su, S. H. Yao, C. S. Wei, C. T. Wu, W. H. Kao, "Design of a titanium nitride-coated WC milling cutter," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, pp. 223-236, 1999.
10. Y. L. Su, S. H. Yao, C. S. Wei, W. H. Kao, C. T. Wu, "Design and performance analysis of TiCN-coated cemented carbide milling cutters," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, pp. 223-236, 1999.
11. Y. L. Su, S. H. Yao, C. S. Wei, C. T. Wu, "Analyses and design of a WC milling cutter with TiCN coating," *Journal of Materials Processing Technology*, *Wear*, Vol. 215, pp. 59-66, 1998.
12. G. S. Peace, *Taguchi Methods*, Addison Wesley, 1995.

Table A-2 Orthogonal array(L18)

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

Appendix A : 직교배열표

Table A-1과 Table A-2는 각각 본 실험에서 사용된 직교배열표이다.

Table A-1 Orthogonal array(L9)

Experiment No.	Rake angle	Clearance angle	No. of tooth	Land width
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1