

최소 절삭력형 밀링커터의 가공에서 공구마멸 및 칩의 특성에 관한 연구

김정현*, 김희술**

A Study about Character of Tool Wear and Chip on The Face Milling Cutter to Minimize Resultant Cutting Force

Jung-Hyun Kim* and Hee-Sool Kim**

Abstract

A new optimal tool design model which can be minimized the resultant cutting forces under the constrains of variables was developed. The resultant cutting forces are used as the objective function and tool angles are used as the variables. Cutting experiments of tool wear and chip length using the new and conventional tools were carried out.

Tool life of optimized cutter are more increased than those of conventional cutter by 2.29 times and 2.52 times at light and at heavy cutting conditions respectively. Chip length of optimized cutter are more increased than those of conventional cutter. It is considered that the decrease of the resultant cutting forces is the cause that an effective rake and shear angles by the shape of optimal cutter.

Key Words : Optimal design(최적설계), Resultant cutting forces(합력), Tool wear(공구마멸), Objective function(목적함수), Chip length(칩의 길이)

1. 서론

절삭가공에서 공구수명은 경제적인 측면과 절삭성에 있어서 중요한 문제이다. 특히 정면 밀링 가공은 단속 절삭 작용에 의하여 공구 선단이 칩핑(chipping)이 발생하기 쉽고, 이로 인하여 공구 수명 및 가공 정밀도에 큰 영향을 주게 된다. 그러므로 공구수명에 대한 많은 연구^(1,2,3)가 이루어져 왔다. 경제적인 절삭을 위하여 공구수명을 늘리는 방법

으로는 공구재질의 개발, 최적절삭 조건의 선정, 코팅 인서트의 개발, 각 조건에 따른 최적 설계한 커터의 개발 등을 들 수 있다. 최적 절삭조건의 선정은 공구수명을 늘리는 방법에는 한계가 있고, 공구재질의 개발 및 코팅 인서트의 개발은 공구수명을 늘일 수 있으나 비용이 많이 든다.

최적 설계한 커터의 종류로는 1975년 S. M. Wu^(4,5)는 수직 밀링에서 인서트 간격을 불규칙하게 배열하여 최소 진동형 커터의 형상을 설계하였다. 최근에는 V. K. Jha⁽⁶⁾가

* 경일대학교 기계공학부
** 영남대학교 기계공학부

수평 밀링에서 커터설계의 최소비용을 목적함수로 하여 커터의 형상을 설계하였다. 김 종성^[7] 등의 연구자들은 인서트 각각의 반경방향 경사각과 축방향 경사각을 변수로 하여 최소진동형 최적공구를 설계하였다. 그러나 진동을 줄이기 위하여 인서트를 불규칙하게 배열하면 간격이 큰 인서트와 작은 인서트간에 절삭량이 크게 변화하여 공구 수명이 짧아지는 문제가 발생하고, 각 인서트마다 공구 각을 변화시키면 커터의 제작에 큰 어려움이 발생한다. 더구나 밀링 작업은 단속절삭에 의한 변동 절삭력과 여러날의 동시가공에 의한 절삭력의 교란 때문에 표면조도가 저하하고, 공작기계 및 공구의 수명이 짧아지는 문제가 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 절삭력 모델^[8]을 이용하여 3방향(X, Y, Z)의 합력을 목적함수로 취하고 공구의 반경방향 경사각(Radial rake angle), 축방향 경사각(Axial rake angle), 리이드각(Lead angle)을 변수로 하여 최적화 알고리즘인 S.Q.P(Sequential Quadratic Programming)를 이용하여 커터형상을 3차원으로 최적 설계^[9-10-11-12] 하였다. 최적 설계된 공구(이하 최적화 공구라 칭함)를 제작하여 절삭력 모델을 이용한 예측절삭력을 비교 검토한 후 공구마모 실험을 하여 SEM(scanning electron micrographs)으로 촬영하였다. 칩의 특성을 구명하기 위하여 칩을 수거하여 절삭 Parameter를 구하였다.

2. 이론 해석

2.1 최적화 모델

절삭력의 합력을 목적함수(Objective function)로 취하고, 반경방향 경사각(Radial rake angle)과 축방향 경사각(Axial rake angle) 및 리이드 각(Read angle)을 변수(Variable)로 취하여 S.Q.P(Sequential Quadratic Programming)^[13] 알고리즘을 이용하여 최적화 모델을 개발하였다. 제한조건(Constraint Condition)은 상업적으로 유통한 밀링커터에 추천된 한계값 및 국내외에서 제작되고 있는 커터의 각을 고려하여 네가티브 경사각(Negative rake angle)까지 고려하였으며 3축방향의 절삭력을 고려하여 최적화 표준 형태로 나열하면(2.1)식과 같다.

$$\text{Find } x = [x_1, x_2, x_3]$$

$$\text{minimize } Q = \left[\sum_{i=1}^n \sqrt{F_x^2(\Phi) + F_y^2(\Phi)} \right] / n$$

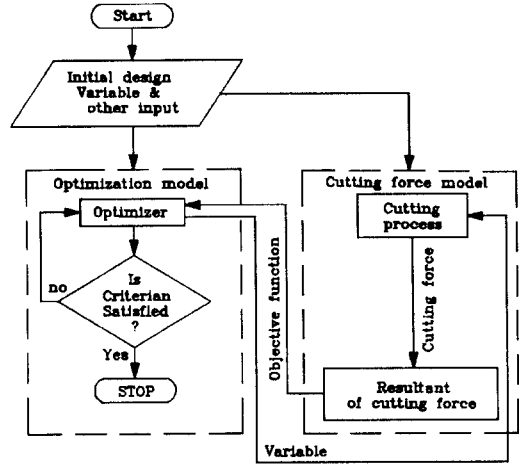


Fig. 1 Flow chart of optimization

Subject to constraints :

$$\begin{aligned} g_1(x) &= -12 - x_1 \leq 0 \\ g_2(x) &= x_1 - 15 \leq 0 \\ g_3(x) &= -12 - x_2 \leq 0 \\ g_4(x) &= x_2 - 15 \leq 0 \\ g_5(x) &= -12 - x_3 \leq 0 \\ g_6(x) &= x_3 - 45 \leq 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

식(2.1)에서 x는 설계변수로서 x₁, x₂, x₃는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각 및 리이드각을 나타내고 Q는 최소화시키고자 하는 절삭력의 합력을 나타내는 목적함수이다. g₁(x)~g₆(x)는 각각 설계변수에 대한 제한 조건들이고, g₁(x)~g₂(x), g₃(x)~g₄(x)는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각이 -12°에서 15°사이의 형상으로 설계하고자 하는 것이고, g₅(x)~g₆(x)는 리이드각이 0°에서 45°사이의 형상으로 설계하고자 하는 조건을 의미한다.

Fig. 1은 S.Q.P 알고리즘을 이용한 최적화 과정의 흐름도를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 절삭력 실험

본 연구에 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머시인이고 Fig. 2와 같이 테이블 위에 공구동력계를 부착하고, 그 위에 시편을 고정하였다. 측정된 신호는 A/D 변환기를 통하여 0.0005초 간격으로 샘플링하여 데이터를 퍼스널 컴

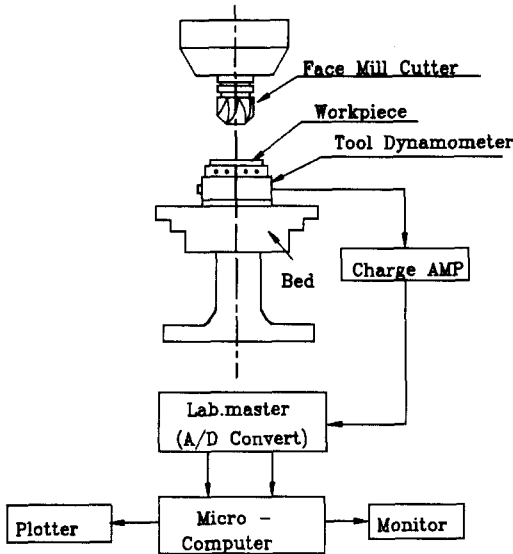


Fig. 2 Schematic diagram for experimental set-up

퓨터에 저장시킨다.

Table 1 은 실험장치의 제원 및 실험조건을 나타내고, Table 2 는 인서트의 형상과 재래식 공구와 최적화 공구의 형상을, Table 3은 절삭조건을 나타낸다. 편의상 절삭조건을 경(輕)절삭, 중(重)절삭 이라 칭하였다.

3.2 최적화 공구 제작

일반적으로 현재 사용되고 있는 절삭공구는 그 기하학적 형상이 복잡하며, 절삭성능의 향상을 위하여 정확한 형상의 공구가 되도록 정밀하게 가공되고 있다. 최적화 공구를 제작함에 있어, 가장 주의할 점은 반경방향 경사각, 축방향 경사각 및 리이드 각이 범용되는 인서트를 사용하여, 원하는 각도가 되도록 앤빌(anvil) 및 웨지(wedge)가 설계 제작되어야 한다.

본 연구에서는 커터의 반경방향 경사각, 축 방향 경사각 및 리이드 각이 주어진 경우 3자유도를 갖는 밀링 머신에서 커터 몸체의 인서트 및 앤빌, 웨지, 칩 포켓 등의 안내면 가공을 위한 셸엿 각도들은 재래식 공구의 제작법과 같은 회전 변환 행렬 해법을 이용하였다. 커터의 몸체는 새로이 제안된 커터의 리이드 각이 커짐에 따라서 인서트를 충분히 받쳐줄 수 있는 크기로 설계 되었다. 칩 포켓은 칩의 흐름을 방해하지 않도록 충분히 고려하였다. 인서트의 수(8개)는 재래식 공구와 최적화 공구가 같도록 제작

Table 1 Specification of experimental set-up and cutting condition

Milling machine	WMV-1100(1100×280(mm2))
Workpiece	S45C(150×100×50(mm3))
Tool-dynamometer	KISLER Type 9257A
A/D converter	Conversion rate : 30KHz Resolution : 12bit Input range : ±10[V]
Charge amplifier	KISTLER Type 5008E DPM-2300
Milling type	Up-Milling
Spindle rotational speed	180, 370 rpm
Feed per tooth	0.043 mm
Depth of cut	0.5 ~3 mm
Width of workpiece	46 mm
Number of insert	8

Table 2 Tool and insert geometries

Conventional cutter(1)	M115SP04R/L-10(Korea Tungsten) Lead angle : 15° Radial Rake angle : 0° Axial Rake angle : 7° Cutter diameter : 106(mm) Insert diameter : 100(mm)
Optimal cutter(2)	Special manufacture Lead angle : 45° Radial Rake angle : -9° Axial Rake angle : 15° Cutter diameter : 128(mm) Insert diameter : 100(mm)
Optimal cutter(3)	Special manufacture Lead angle : 45° Radial Rake angle : -4° Axial Rake angle : 15° Cutter diameter : 128(mm) Insert diameter : 100(mm)
Insert (1) Cutter	SPKN1203EDTR(P25)(Korea Tungsten) Thickness : 3.18(mm) Clearance : 11°
Insert (2),(3) Cutter	SEAN1203AFTN(P25)(Korea Tungsten) Thickness : 3.18(mm) Clearance : 20°

Table 3 Cutting conditions

Cutting conditions	Con.(Light cut) (i)	Con.(Heavy cut) (iii)
Spindle speed(rpm)	180	370
Feed rate(mm/insert)	0.0424	0.0429
Depth of cut(mm)	1.0	2.5

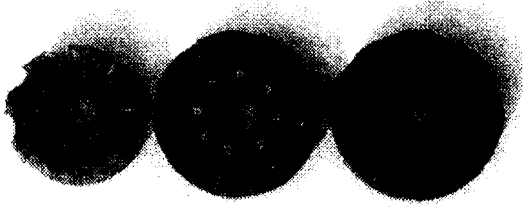


Photo. 1 Configuration of the conventional and new proposed cutter

하였다. 새로이 개발된 공구는 경(輕)절삭 조건과 중(重)절삭 조건에서 각각 한 개씩 제작하였다. Photo.1은 재래식 공구와 최적화 공구의 형상을 나타낸 것으로서 왼쪽 사진은 재래식 공구, 가운데 사진은 경(輕)절삭 조건에서 제안된 최적화 공구, 오른쪽 사진은 중(重)절삭 조건에서 개발된 최적화 공구의 형상을 나타낸다.

3.2 공구 마멸 실험

밀링 작업에서 발생하는 공구의 마멸은 가공조건이나 피삭재 및 절삭공구의 재질에 따라 각기 다른 모양을 나타내지만, 초경공구를 사용한 일반적인 정삭 가공이나 경제적인 절삭 상태에서는 ISO추천 공구수명 판정기준에 근거하여 여유면 마멸을 공구교환 시기나 공구수명 판정기준으로 삼는다. 여유면 마멸의 정의는 CIRP 규정과 ISO규정이 주로 사용되고 있는데, CIRP규정에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 절입부의 1/2인 부분에서의 마멸 폭을 취하고 있고, ISO 규정에서는 노즈(nose) 반경부와 절입 경계부의 1/4을 제외한 절입부의 마멸 평균 폭으로 정의하고 있고, 또한 JIS규정에서는 비교적 균일한 마멸의 경우 그 평균치로 하는 것이 원칙이나 불균일한 경우 최대의 마멸 폭을 취하는 등의 각기 다른 차이를 보이고 있다.

본 연구에서는 ISO 규격에 근거하여 공구마멸의 측정은 인서트의 노즈(nose)부와 절입 경계부를 제외한 나머지 절입부의 마멸의 평균폭(Flank wear land)을 V_B 로 규정하였다. 가공정밀도의 요구에 따라 달라지는 V_B 의 값을 선정하기 위하여 투수강과 주강 절삭시 사용되는 공구 여유면 마멸 폭의 가운데 값과 현장에서 강의 황삭시 많이 사용하는 값들을 고려하여 V_B 가 0.6mm에 도달되었을 때 공구 교환시기로 정하였다.

공구 마멸 실험에 사용된 시험편은 절삭용 시험편과 동일하며, 크기는 치핑을 피하기 위하여 커터의 지름과 공작

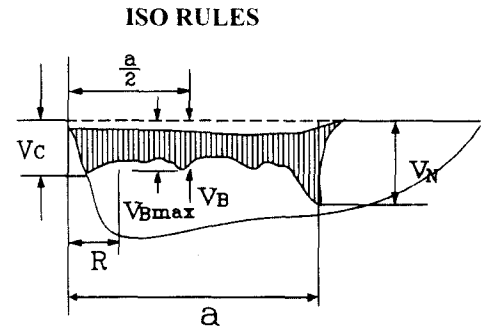
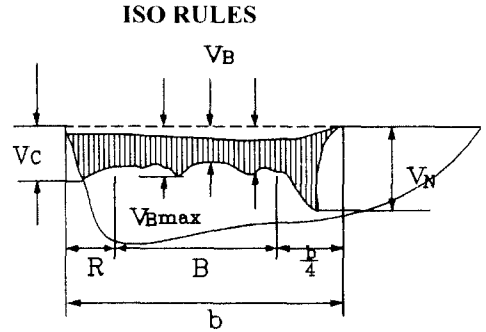


Fig. 3 The criteria of flank wear(ISO, CIRP)

물의 폭을 고려하여 $45 \times 130 \times 80(\text{mm}_3)$ 로 하여 각각 경(輕)절삭 조건과 중(重) 절삭조건에서 마멸실험을 하였다. 공작물을 커터가 1번 절삭한 것을 1통과(pass)라 하고, 시간으로 환산하면 경절삭 조건에서는 2분 10초, 중절삭 조건에서는 1분3초의 시간이 소요된다. 20회 통과마다 공구 현미경(Tool microscope)으로 V_B 를 측정하였으며, V_B 가 0.6mm를 초월할 때 까지 계속 절삭 하였다. 경절삭 조건과 중절삭 조건에서 절삭실험을 수행하여, 최적화 공구와 재래식 공구의 여유면 마모길이를 측정하여 비교 분석하고, 여유면 마멸의 형상을 관찰하기 위하여 공작물을 60회 통과 후 SEM(scanning electron micrographs)으로 사진을 촬영하였다.

3.3 절삭 parameter 측정

절삭 Parameter를 구하기 위하여 재래식 공구 및 최적화 공구로 각각 가공시 발생하는 칩을 수거하여 Point micrometer로 칩의 두께를 여러번 측정하여 그 평균값으로 구하였다. 이평균값을 이용하여 3차원 절삭이론의 결과식에 대입하여 절삭 Parameter를 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 절삭력

Table 4는 각각 절삭조건에서 최적화 공구들의 형상과 재래식 공구와 최적화 공구로 측정된 절삭력을 각 방향의 평균 절삭력 및 합력(Resultant cutting force)등을 나타내었다. 최적화 공구는 재래식 공구에 비해 축 방향 경사각과 리이드 각이 증가하는 경향으로 나타났고, 반경방향 경사각은 네가티브(-)각을 형성하였다. Y-방향(이송방향)의 절삭력이 현저하게 감소하였고, 경절삭에서는 49.94N, 중절삭 조건에서는 132.69N이 감소하였다. Z-방향(축방향)과 X-방향에서는 최적화 공구쪽이 재래식 공구보다 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 3방향의 합력은 최적화 공구가 재래식 공구보다 경절삭에서 순간 절삭력은 약 20N이 감소하였고, 중절삭에서 순간 절삭력은 약 50N이 감소하였다. Z-방향(축방향)과 X-방향(이송방향에 수직인 방향)에서 최적화 공구의 절삭력이 다소 증가한 이유는 축방향의 경사각이 네가티브(-)로 산출된데 기인하는 것으로 사료된다.

Table 4 Tool angles and cutting force

	Tool Angles R, A, L	X-dir. mean(N)	Y-dir. mean(N)	Z-dir. mean(N)	Resul. mean(N)
Conven. tool (i)	0, 7, 15	98.99	-257.45	114.09	302.45
Opti. tool (i)	-9, 15, 45	115.42	-206.55	141.93	280.31
Conven. tool(iii)	0, 7, 15	125.66	-689.25	216.59	712.92
Opti. tool (iii)	-4, 15, 45	197.52	-526.56	347.81	662.42

4.2 공구마멸

Table 5, Table 6, Table 7, Table 8은 각각 절삭 조건에서 재래식 공구와 최적화 공구로 공작물을 20회 통과마다 여유면의 마멸량을 나타내었다. 가로에는 인서트의 수를 나타내었고, 세로에는 통과수를 나타내었으며, 우측 끝단에는 평균마멸량을 나타내었다. 다시 20회 통과를 했는데도 여유면 마멸량이 그대로 측정된 인서트는 절삭력의 충격에 의해 인서트 사이의 축방향 및 반경방향의 런아웃에서 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 4는 중절삭 조건에서 Table 5와 Table 6의 평균값을 가로에는 통과 수, 세로에는 여유면의 마멸량을 커브피팅(Curve fitting)하여 나타내었다. 여기서 V_B 가 0.6mm에 도달할 때 까지 통과수를 보면 재래식 공구가 87회, 최적화 공구가 220회로서 새로이 개발된 최적화 공구의 수명이 재래식 공구에 비해 2.52배 증가한 것을 알 수 있다.

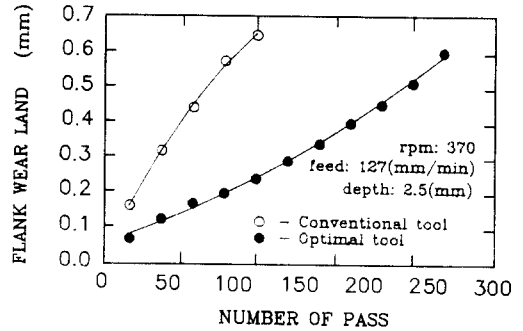


Fig. 4 The relation between flank wear land and number of pass(heavy cutting)

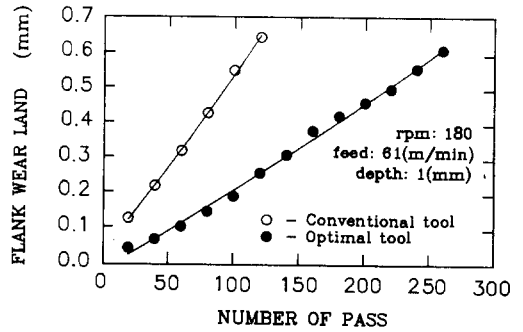


Fig. 5 The relation between flank wear land and number of pass(light cutting)

Table 5 Flank wear land on inserts
(Conventional tool, heavy cutting)

									[mm]
	1	2	3	4	5	6	7	8	평균
20	0.150	0.160	0.135	0.160	0.170	0.175	0.175	0.165	0.161
40	0.340	0.330	0.320	0.330	0.300	0.300	0.260	0.370	0.319
60	0.445	0.450	0.430	0.465	0.380	0.415	0.480	0.485	0.444
80	0.565	0.570	0.565	0.565	0.495	0.565	0.650	0.650	0.578
100	0.650	0.660	0.635	0.615	0.595	0.630	0.725	0.715	0.653

이 재래식 공구에 비해 2.52배 증가한 것을 알 수 있다. Fig. 5는 경절삭 조건에서 Table 7과 Table 8의 평균값을 가로에는 통과 수, 세로에는 여유면의 마멸량을 커브피팅(Curve fitting)하여 나타내었다. 여기서 V_B 가 0.6mm에 도달할 때 까지 통과수를 보면 재래식 공구가 111회, 최적화 공구가 254회로서 새로이 개발된 최적화 공구의 수명이 재래식 공구에 비해 2.29배 증가한 것을 알 수 있다.

**Table 6 Flank wear land on inserts
(Optimal tool, heavy cutting)**

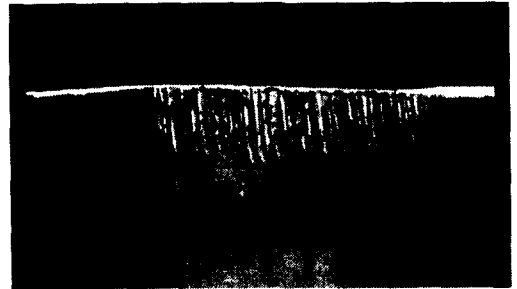
	1	2	3	4	5	6	7	8	mean
20	0.065	0.050	0.065	0.070	0.080	0.065	0.070	0.065	0.066
40	0.125	0.100	0.105	0.135	0.125	0.120	0.135	0.140	0.123
60	0.165	0.155	0.115	0.180	0.155	0.155	0.175	0.215	0.169
80	0.165	0.180	0.175	0.235	0.175	0.180	0.225	0.265	0.200
100	0.205	0.215	0.185	0.310	0.225	0.205	0.285	0.305	0.242
120	0.260	0.305	0.245	0.350	0.265	0.245	0.335	0.345	0.294
140	0.305	0.375	0.330	0.395	0.295	0.275	0.395	0.385	0.344
160	0.345	0.465	0.425	0.450	0.335	0.305	0.440	0.435	0.403
180	0.425	0.530	0.460	0.490	0.380	0.350	0.530	0.485	0.457
200	0.480	0.665	0.515	0.535	0.430	0.405	0.585	0.535	0.519
220	0.535	0.745	0.635	0.635	0.490	0.585	0.625	0.615	0.680

**Table 7 Flank wear land on inserts
(Conventional tool, light cutting)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	mean
20	0.19	0.095	0.170	0.095	0.115	0.135	0.105	0.095	0.125
40	0.325	0.160	0.310	0.205	0.165	0.215	0.160	0.205	0.218
60	0.445	0.225	0.485	0.345	0.235	0.275	0.225	0.315	0.319
80	0.595	0.285	0.665	0.485	0.300	0.380	0.285	0.425	0.428
100	0.680	0.415	0.800	0.645	0.415	0.545	0.345	0.560	0.551
120	0.735	0.565	0.850	0.715	0.570	0.610	0.495	0.625	0.646

**Table 8 Flank wear land on inserts
(Optimal tool, light cutting)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	mean
20	0.035	0.050	0.035	0.040	0.055	0.035	0.030	0.045	0.040
40	0.050	0.075	0.060	0.065	0.095	0.080	0.050	0.055	0.066
60	0.075	0.135	0.080	0.105	0.135	0.105	0.105	0.085	0.103
80	0.110	0.180	0.145	0.140	0.160	0.165	0.165	0.105	0.146
100	0.170	0.220	0.205	0.185	0.215	0.200	0.195	0.135	0.191
120	0.275	0.285	0.270	0.225	0.300	0.250	0.260	0.195	0.208
140	0.315	0.345	0.325	0.285	0.335	0.310	0.325	0.245	0.311
160	0.400	0.395	0.400	0.355	0.405	0.415	0.370	0.300	0.380
180	0.430	0.440	0.445	0.435	0.425	0.425	0.400	0.380	0.423
200	0.485	0.490	0.485	0.480	0.485	0.435	0.435	0.400	0.462
220	0.505	0.545	0.535	0.525	0.520	0.450	0.480	0.450	0.501
240	0.575	0.565	0.605	0.610	0.585	0.510	0.535	0.495	0.560
260	0.6450	0.615	0.655	0.655	0.630	0.565	0.600	0.545	0.614



(a) conventional tool(rpm: 370, feed: 127mm/min, depth: 2.5mm, no. of pass: 60)

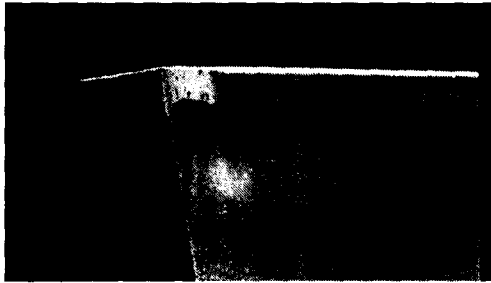


(b) optimal tool(rpm: 370, feed:127mm/min, depth: 2.5mm, no. of pass: 60)

Photo. 2 Flank wear land observed under scanning electron microscopy at heavy cutting condition

최적화 공구의 수명이 현저하게 증가한 이유를 확인하기 위하여 공구의 마멸현상을 관찰하였다. Photo. 2는 중절삭 조건에서 마멸의 형상을 나타낸 것으로서 공작물을 60회 통과 후 여유면 마멸의 형태를 SEM으로 촬영한 사진이다. 이 사진에서 재래식 공구의 V_B 는 0.445mm 이고, 최적화 공구의 V_B 는 0.165mm 이다. 재래식 공구의 여유면의 마멸 면을 관찰해 보면 짧은 구역에 집중적으로 마멸된 모양을 볼 수 있고, 최적화 공구는 넓은 구역에 마멸량이 분산되어 있음을 알 수 있었다. 이 이유는 최적화 공구의 리이드각이 재래식 공구의 리이드각 보다 큰 것에 기인된 것으로 사료된다.

Photo. 3은 경절삭 조건에서 마멸 상태를 촬영한 것이다. 중절삭에서 공구 여유면의 마멸면이 상당히 거칠게 마멸되는데 비하여 경절삭에서 공구의 여유면 마멸의 면이 매끈하게 마멸됨을 볼 수 있었고, 경절삭에서 최적화 공구의 마멸의 면이 현저하게 길게 마멸됨을 알 수 있었다. 재래식 공구의 V_B 는 0.315mm 이고, 최적화 공구의 V_B 는 0.119mm로 나타났다.



(a) conventional tool(rpm: 180, feed: 61mm/min, depth: 1mm, no. of pass: 60)



(b) optimal tool(rpm: 180, feed: 61mm/min, depth: 1mm, no. of pass: 60)

Photo. 3 Flank wear land observed under scanning electron microscopy at light cutting condition

4.3 절삭 parameter

Table 9는 개발된 최적화 공구의 절삭 특성을 알아보기 위하여 칩의 길이를 측정된 것으로 세로에는 공구의 종류와 절삭조건을 나타내고, 가로에는 측정회수와 평균값을 나타낸다. 칩의 길이를 3차원 절삭이론⁽¹⁴⁾에 적용하여 절삭력의 대소에 영향이 큰 유효경사각(effective rake angle) 및 유효 전단각 (effective shearing angle)의 크기를 계산하여 Table 10에 나타내었다.

Table 9 The length of chips

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	mean
A	1.385	1.525	1.445	1.495	1.420	1.460	1.410	1.500	1.410	1.530	1.458
OA	1.500	1.905	1.730	1.655	1.805	1.975	1.785	1.565	1.595	1.825	1.734
C	3.095	2.980	3.015	3.030	3.000	2.990	2.965	3.050	3.010	3.000	3.014
OC	3.875	3.925	3.840	3.875	3.763	3.900	3.866	3.925	3.765	3.855	3.859

A: Conventional tool(light cutting), OA: Optimal tool(light cutting)
 C: Conventional tool(heavy cutting), OC: Optimal tool(heavy cutting)

Table 10 The magnitude of angles in cutting section

	γ_c	η_c°	α_e°	n°	η_s°	ϕ_e°
Conven. tool (i)	0.7	45.6	4.9	37.2	31.9	47.4
Opti. tool (i)	0.6	55.3	15.9	34.5	34.7	54.5
Conven. tool(iii)	0.8	34.0	5.8	41.3	24.2	46.7
Opti. tool (iii)	0.6	49.7	12.7	34.5	32.0	48.6

γ_c : Cutting ratio, η_c : Chip flow angle, α_e : effective rake angle,
 ϕ_n : Normal shearing angle, η_s : Shear flow angle,
 ϕ_e : effective shearing angle

경(輕)절삭 조건에서 재래식 공구의 유효 경사각과 유효 전단각은 각각 4.9°와 47.4°이고, 최적화 공구는 각각 15.9°와 54.5°이다. 중(重)절삭 조건에서 재래식 공구의 유효 경사각과 유효 전단각은 각각 5.8°와 46.7°이고, 최적화 공구는 각각 12.7°와 48.6°이다. 최적화 공구쪽의 유효 경사각과 유효 전단각이 재래식 공구의 각들 보다 증가하는 경향을 보였다. 칩의 길이는 최적화 공구가 재래식 공구보다 길게 나타났고, 상대적으로 칩의 두께는 최적화 공구가 재래식 공구보다 얇게 나타남을 알 수 있었다. 이런 모양의 칩의 형태가 최적화 공구로 가공시 절삭력을 감소시키는 주원인으로 사료된다.

5. 결 론

축방향 경사각, 반경 방향 경사각, 리이드각을 변수로 하고 절삭력의 합력을 최소로 하는 최적화 공구를 설계 하여 공구마멸과 칩의 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

- (1) 최적화 공구의 수명은 재래식 공구의 수명보다 약 2~2.5배 증가하였다.
- (2) 최적화 공구의 마멸은 여유면 마멸보다는 여유면에 수직인 방향으로 길게 마멸되어 공구수명 이 길어지는 것으로 판명되었다.
- (3) 재래식 공구의 여유면 마멸면의 거칠기가 최적화 공구보다 거칠게 나타났다.
- (4) 절삭가공에서 최적화 공구로 가공한 칩의 길이가 재래식 공구로 가공한 칩의 길이보다 더 길게 나타났다.

참 고 문 헌

- (1) C. Rubenstein, "An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear", *Journal of Engineering for Industry*, Feb. pp. 221-232, 1976.
- (2) T. C. Hsu, "A Study of Wear on Cemented Carbide Cutting Tools", *ASME*, Aug. pp. 652-658, 1969.
- (3) Y. Yao, X. D. Fang, G. Arndt(1), "On-Line of Groove Wear at the Minor Cutting Edge for Finish Machining", *CIRP*, Vol. 40, 1, pp. 41-44, 1991.
- (4) Patrik Doolan & F. A BURNEY and S. M. WU, "Computer Design of a Multipurpose Minimum Vibration Face Milling Cutter," *MTDR*, Vol. 16, pp. 187-192, 1975.
- (5) P. Doolan & M. S. Phadke and S. M. Wu, "Computer Design of a Vibration Free Milling Cutter", *ASME, J. of Engr.for Ind.*, pp. 925-930, 1975.
- (6) N. K. Jha and Hsiao-Hong Cheung, "Computer Aided Optimal Design and Finite Element Analysis of Plain Milling Cutter", Department of Mechanical Engineering Manhattan College Riverdale, New York, 1990.
- (7) J. S. Kim & D.W. Cho and J. M. Iec, "Optimal Design of Face Milling Cutter Geometry", *CIRP*, Vol. 39, pp. 391-394, 1990.
- (8) Fu, H. J.,Devor, R. E., and Kapoor,S.G., "A Mechanistic Model for Prediction of the Force System in Face Milling Operations", *Trans of ASME,j.of Engr for Ind.*, Vol.106, Feb., pp. 81-88, 1984.
- (9) 김정현, 김희술, "시뮬레이션에 의한 정면밀링용 공구의 최적설계", *한국정밀공학회 제 10권, 제2호*, pp. 76-85, 1993.
- (10) 김정현, 김희술, "정면밀링용 공구의 최적설계에 대한 연구(1)", *대한 기계학회 논문집, 제 18집, 제9호*, pp. 2211-2224, 1994.
- (11) 김정현, 김희술, "정면밀링용 공구의 최적설계에 대한 연구(2)", *대한 기계학회 논문집, 제 18집, 제9호*, pp. 2225-2233, 1994.
- (12) 김정현, "최소 절삭력형 정면밀링 커터의 동적거동에 대한 연구", *한국정밀 공학회, 제13권, 제4호*, 1996
- (13) Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", *Macgraw Hill*, pp136-144, pp.392-399, 1989.
- (14) Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles", *Clarendon Press*, pp. 428-434, 1984.
- (15) 이우영, 신호철, "전단유동응력에 의한 정면밀링의 절삭력 해석", *대한 기계학회논문집, 제13권, 제6호*, pp. 1170-1182, 1989.