

최소 절삭력형 정면밀링 커터의 동적거동에 관한 연구

김 정 현*

A Study about Dynamic Behavior of the Face Milling Cutter to Minimize Resultant Cutting Force

Jung-Hyun Kim*

ABSTRACT

On face milling operation a newly optimal tool, which can minimize the resultant cutting forces resulted from the cutting force model, was designed and manufactured.

Cutting experiments using the new and conventional tools were carried out and the cutting forces resulted from those tools were analyzed in time and frequency domains.

The performance of the optimized cutter was tested through the dynamic cutting force experiment and surface roughness test. The feed directional dynamic cutting forces resulted from the newly designed tool are much reduced in comparison with those from the conventional tool. By reducing the dynamic cutting force fluctuations, machine tool vibrations can be reduced, and stable cutting operation can be carried out.

Key Words : Face Milling(정면밀링), Optimal Tool(최적화 공구), Cutting Force Model(절삭력 예측 모델), Dynamic Cutting Force(동절삭력)

1. 서 론

밀링작업은 단속절삭에 의한 변동절삭력과 여러날의 동시 가공에 의한 절삭력의 교란 때문에 표면조도가 저하하고, 공작기계 및 공구의 수명이 짧아지는 문제가 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위하여 기계구조의 강성을 증가시키거나, 공구를 최적설계하여 진동을 줄이거나, 최적 절삭조건 선정 등의 연구를 하여 개선 발전시켜 왔다.

공구의 최적설계와 공작기계의 효율적인 이용을 위해서

는 기본적으로 절삭력의 예측이 필요하다. 따라서 지금까지 절삭력 예측을 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이들에 대한 연구들은 정절삭력 모델^(1, 2, 3, 4, 5, 6) (cutting force model)은 공구의 기하학적 형상과 절삭조건에 의하여 결정되는 날 한개당 절삭면적과 단위면적당 절삭저항을 곱하여 절삭력을 예측하는 모델이다. 동절삭력 모델^(7, 8, 9, 10, 11)은 일반적으로 절삭과정에서 발생하는 공작기계의 진동에 의해 공구와 공작물간의 상대변위를 고려한 절삭력 변동성분을 해석하여 절삭력의 동적인 특성을 고려

* 경북산업대학교 기계설계학과 (정회원)

한 모델이다.

공구의 최적설계에 대한 연구를 살펴보면 1975년 S. M. Wu^(12,13)는 수직밀링에서 인서트 간격을 불규칙하게 배열하여 최소진동형 커터의 형상을 설계하였고, 최근에는 V. K. Jha⁽¹⁴⁾가 수평밀링에서 커터설계의 최소비용을 목적함수로 하여 커터의 형상을 설계하였다. 김 중성⁽¹⁵⁾ 등의 연구자들은 인서트 각각의 반경방향 경사각과 축방향 경사각을 변수로 하여 최소진동형 최적공구를 설계하였다. 그러나 진동을 줄이기 위하여 insets를 불규칙하게 배열하면 간격이 큰 insert와 작은 insert간에 절삭량이 크게 변화하여 공구수명이 짧아지는 문제가 발생하고, 각인서트마다 공구각을 변화시키면 커터의 제작에 큰 어려움이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 절삭력 모델⁽⁶⁾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)⁽¹⁶⁾를 이용하여 커터형상을 3차원으로 최적설계하였다^(17,18,19). 제작된 공구(이하 최적화 공구라 칭함)로 절삭실험을 행하여 동절삭력 성분을 조사하여 최적화 공구의 동특성을 규명하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 절삭력 모델

본 연구에 사용된 절삭력 모델^(8,9,11,14)에서 인서트에 의해 발생된 칩 단면에 작용하는 접선 방향의 힘 (Tangential Force) $F_T(i, \Phi)$ 는 칩 단면적 $A(\theta_i(\Phi))$ 과 비절삭력 계수 (Specific Cutting Force Coefficient) K_T 의 곱으로 표시할 수 있고, 반경방향의 힘(Radial Force) $F_R(i, \Phi)$ 은 칩단면적과 반경방향 절삭력 계수 K_R 의 곱으로 나타내었으며 $K_R = K_{R'} / K_T$ 로 표시하고, 축방향의 힘 (Axial force) $F_A(i, \Phi)$ 은 칩단면적 $A(\theta_i(\Phi))$ 와 축방향 절삭력 계수 K_A 의 곱으로 나타내고 $K_A = K_{A'} / K_T$ 라 하면 (2.1)식과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_T(i, \Phi) &= K_T A(\theta_i(\Phi)) \\ F_R(i, \Phi) &= K_{R'} A(\theta_i(\Phi)) = K_R F_T(i, \theta) \\ F_A(i, \Phi) &= K_{A'} A(\theta_i(\Phi)) = K_A F_T(i, \Phi) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} F_X(i, \Phi) \\ F_Y(i, \Phi) \\ F_Z(i, \Phi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{Z_c} \begin{bmatrix} \sin \theta_i(\Phi) - \cos \theta_i(\Phi) & 0 \\ -\cos \theta_i(\Phi) - \sin \theta_i(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$F_X(\Phi)$: 커터의 회전각이 Φ 일때 X 방향의 힘의 성분,
 $F_Y(\Phi)$: 커터의 회전각이 Φ 일때 Y 방향의 힘의 성분,
 $F_Z(\Phi)$: 커터의 회전각이 Φ 일때 Z 방향의 힘의 성분.
 Z_c : 동시에 절삭작용을 하는 insert의 수.

식(2.1)과 식(2.2)으로 부터 밀링 작업에서, insets를 커터에 설치할 때 발생하는 오차 및 절삭조건을 고려한 절삭력을 예측할 수 있다.

2.2 최적화 모델

절삭력의 합력을 목적함수(Objective function)로 취하고, 반경방향 경사각(Radial rake angle)과 축방향 경사각(Axial rake angle) 및 리이드 각(Lead angle)을 변수(Variable)로 취하여 S.Q.P 알고리즘을 이용하여 최적화 모델을 개발하였다. 제한조건(Constraint Condition)은 상업적으로 유용하게 추천된 밀링커터 각들의 한계값 및 국내외에서 제작되고 있는 커터의 각을 고려하여 네가티브 경사각(Negative rake angle)까지 고려하였으며 식(2.2)에서 3축방향의 절삭력을 고려하여 최적화 표준형태로 나열하면(2.3)식과 같다.

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

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

Subject to constraints:

$$\begin{aligned} g1(x) &= -12 - x_1 \leq 0 \\ g2(x) &= x_2 - 15 \leq 0 \\ g3(x) &= -12 - x_2 \leq 0 \\ g4(x) &= x_2 - 15 \leq 0 \\ g5(x) &= 0 - x_3 \leq 0 \\ g6(x) &= x_3 - 45 \leq 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

식(2.3)에서 x 는 설계변수로서 x_1, x_2, x_3 는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각 및 리이드각을 나타내고 Q 는 최소화시키고자 하는 절삭력의 합력을 나타내는 목적함수이다. $g_1(x)-g_6(x)$ 는 각각 설계변수에 대한 제한 조건들이고, $g_1(x)-g_2(x), g_3(x)-g_4(x)$ 는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각이 -12° 에서 15° 사이의 형상으로 설계하고자 하는 것이고, $g_5(x)-g_6(x)$ 는 리이드각이 0° 에서 45° 사이의 형상으로 설계하고자 하는 조건을 의미한다. Fig. 1은 S.Q.P 알고리즘을 이용한 최적화 과정의 흐름도를 나타낸다. 절삭조건은 Metal Hand Book⁽²⁰⁾의 추천값과 본 실험에 사용된 밀링머신의 용량을 고려하여 경(輕)절삭(i), 중(中)절삭(ii), 중(重)절삭(iii)을 선정하여 Table 1에 나타내었다. 절삭력 모델에서 절삭조건 및 주축의 편심량, 각 인서트들의 초기 위치오차 등이 입력되어 3축 방향의 절삭력 성분들을 식(2.2)로부터 계산한다. 이 3축 방향의 절삭력들은 식(2.3)의 Q (resultant force)와 같이 변수 x_1, x_2, x_3 들만이 미지수로 처리되어 목적함수를 구성한다. 절삭력 모델에서 구성되어진 목적함수는 최적화 모델로 옮겨져서 제한조건 함수와 함께 각각 편미분값들을 포함하는 QP subproblem 이 형성된다. QP subproblem의 해(solution)는 새로운 설계변수의 탐색 방향으로 설정되고, descent function을 최소화함으로써 결정되는 스텝사이즈와 함께 새로운 설계변수로 형성되어 목적함수의 값을 감소시켜 나간다. 이러한 과정을 반복하여 수렴조건을 만족하면 반복수행에서 빠져나온다. 이결과는 Table 4에 나타내었다.

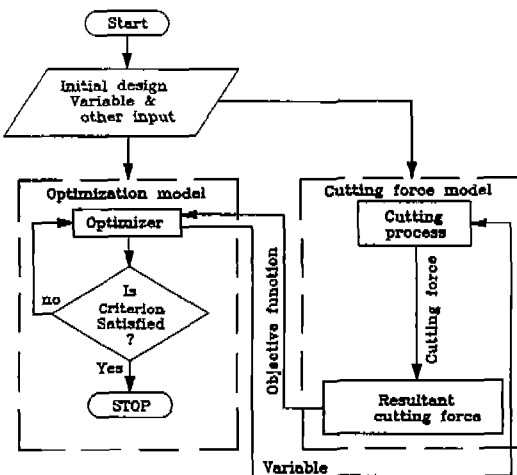


Fig.1 flow chart of optimization.

Table. 1 Cutting conditions

절삭조건	(i)	(ii)	(iii)
주축회전수(rpm)	180	265	370
이송속도(mm/tooth)	0.0424	0.0410	0.0429
절삭깊이(mm)	1.0	1.8	2.5

3. 실험장치 및 방법

3.1 절삭력 실험

본 연구에 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머신이고 Fig.2와 같이 테이블 위에 공구동력계를 부착하고, 그 위에 시편을 고정하였다. 가속도계는 공구동력계 옆에 부착하였다. 측정된 신호는 A/D 변환기를 통하여 0.0005초 간격으로 샘플링하여 데이터를 16 bit 퍼스널 컴퓨터에 저장시킨다. 또한 주파수 변환 (Fast Fourier Transform)을 통하여 측정된 데이터를 분석하였다.

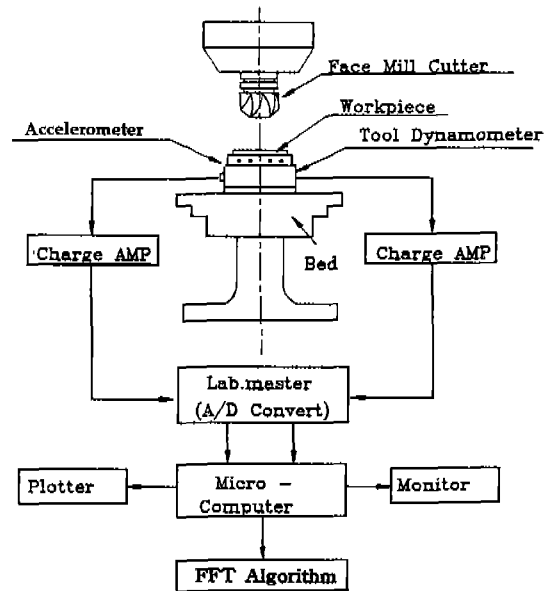


Fig.2 Schematic diagram for experimental set-up

Table 2는 실험장치의 제원 및 실험조건을 나타내고, Table 3은 인서트의 형상과 재래식 공구와 최적화 공구의 형상을 나타낸다.

Table. 2 Specification of experimental set-up and cutting condition.

Milling machine	WMV-1100(1100×280(mm ²))
Workpiece	S45C(150×100×50(mm ³))
Tool-dynamometer	KISLER Type 9257A
Accelerometer	One Sokki,VP-36, 9257A
A/D conveter	Conversion rate : 30KHz Resolution : 12bit Input range : ±10(V)
Charge amplifier	KISTLER Type 5008E DPM-2300
Up-Milling	Milling type
Spindle rotational speed	180, 370 rpm
Feed per tooth	0.043 mm
Depth of cut	0.5 ~3 mm
Width of cutting	46 mm
Number of insert	8

Table. 3 Tool and insert geometries.

Conventional cutter(1)	M 115 SP 04 R/L-10 (대한중석) Lead angle : 15° Radial Rake angle : 0° Axial Rake angle : 7° Cutter diameter : 106(mm) Insert diameter : 100(mm)
Optimal cutter(2)	특별제작 Lead angle : 45° Radial Rake angle : -9° Axial Rake angle : 15° Cutter diameter : 128(mm) Insert diameter : 100(mm)
Optimal cutter(3)	특별제작 Lead angle : 45° Radial Rake angle : -4° Axial Rake angle : 15° Cutter diameter : 128(mm) Insert diameter : 100(mm)
Insert (1) 커터에 사용	SPKN1203EDTR(P25)(대한중석) Thickness : 3.18(mm) Clearance : 11°
Insert (2) (3) 커터에 사용	SEAN1203AFTN(P25)(대한중석) Thickness : 3.18(mm) Clearance angle : 20°

3.2 표면조도 실험

표면조도 시험에 사용된 시험편은 공구 마모시 사용하

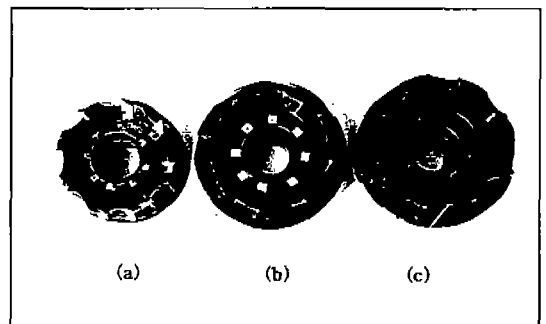
던 시편과 동일하며 사용된 공구 및 절삭조건도 동일하다. 표면 조도계의 촉침 (Stylus tip) 의 변위량에 비례하는 전압은 증폭기 (Amplifier) 에서 증폭 시킨후 A / D Converter 를 통하여 마이크로 컴퓨터에 저장 하였다. 이 때에 마이크로 컴퓨터는 0.0005초의 간격으로 1024개의 데이터를 연속적으로 최대 거칠기 (Rmax) 값을 받아 들인다. 표면 거칠기의 측정시간은 0.512초가 걸리고 촉침이 가공면을 지나가는 거리는 1.536mm이며, 이 거리는 절삭 가공시 인서트가 약 36개가 지나간 거리이다.

컴퓨터에 저장된 데이터를 FFT(Fast fourier transform)알고리즘을 이용하여 주파수영역으로 변환하여 분석 하였다.

3.3 최적화 공구 제작

일반적으로 현재 사용되고 있는 절삭공구는 그 기하학적 형상이 복잡하며, 절삭성능의 향상을 위하여 정확한 형상의 공구가 되도록 정밀하게 가공 되고 있다. 최적화 공구를 제작함에 있어, 가장 주의할 점은 반경방향 경사각, 축방향 경사각 및 리이드각이 범용의 인서트를 사용하여, 원하는 각도가 되도록 엔빌(anvil) 및 윗지(wedge)가 설계 제작 되어야 한다.

본 연구에서는 커터의 반경방향 경사각, 축방향 경사각 및 리이드각이 주어진 경우 3자유도를 갖는 밀링머신에서 커터몸체의 인서트 및 엔빌, 윗지, 칩 포켓등의 안내면 가공을 위한 셋업 각도들은 재래식 공구의 제작법과 같은 회전 변환 행렬 해법을 이용하였다. 커터의 몸체는 새로이 제안된 커터의 리이드각이 커짐에 따라서 인서트를 충



(a)conventional cutter
(b)optimal cutter(light cutting)
(c)optimal cutter(heavy cutting)

Photo. 1 Configuration of the conventional and new proposed cutter

분히 받쳐줄 수 있는 크기로 설계 되었다. 칩 포켓은 칩의 흐름을 방해하지 않도록 충분히 고려하였다. 인서트의 수 (8개)는 재래식 공구와 최적화 공구가 같도록 제작 하였다. 새로이 제안된 공구는 경(輕)절삭 조건과 중(重)절삭 조건에서 각각 한개씩 제작 하였다. Photo.1 은 재래식 공구와 최적화 공구의 형상을 나타낸 것으로서 (1)은 재래식 공구, (2)는 경(輕)절삭 조건에서 제안된 최적화 공구, (3)은 중(重)절삭조건에서 제안된 최적화 공구의 형상을 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 정절삭력

Table 4는 각각의 절삭조건에서 최적화 공구들의 형상과 재래식 공구와 최적화 공구로 측정된 절삭력을 각방향의 평균 절삭력, Y-방향 절삭력의 최대 감소량, Y-방향의 인서트주파수의 크기 및 합력을 비교한 것이다. 중(重)절삭 조건에서 절삭력의 합력은 55 N이 감소하였고, 경(輕)절삭 조건에서는 25 N 이 감소한 것을 알 수 있다. 절삭력의 변동(fluctuation)량도 많이 감소 함을 알 수 있었다. 중(重)절삭 조건중 Y 방향에서 절삭력의 변동량의 최고 감소치는 217 N 이고, 경(輕)절삭 조건에서 최고치는 약 80 N 이었다. 이 원인은 최적화 공구로 가공시 유효전단각이 증가하기 때문이다.^(6,7)

Table 4. Tool angles and cutting force.

공구종류	공구각	X-방향	Y-방향	Z-방향	합력
	R, A, L	mean(N)	mean(N)	mean(N)	
재래식 공구(i)	0, 7, 15	98.99	-257.45	114.09	302.45
최적화 공구(i)	-9, 15, 45	115.42	-207.51	140.95	277.22
재래식 공구(iii)	0, 7, 15	125.66	-659.25	216.59	712.91
최적화 공구(iii)	-4, 15, 45	197.52V	-526.56	347.81	667.42

(R : Radial rake angle, A : Axial rake angle, L : Lead angle)

4.2 동절삭력

Fig. 3 은 중(重)절삭조건에서 측정된 동적성분을 나타낸 것으로서 Z방향의 동적성분의 크기가 X방향이나 Y방향에 비하여 훨씬 적게나타나는 것을 알 수 있다. 원인은 공구와 공작물이 스펀들과 테이블에 의해 강하게 지지되어 있기 때문에 Z방향의 절삭력 변동이 작기 때문에 Z방향의 동적성분이 적게 나타난 것으로 생각

된다. 정절삭력과 같은 경향으로 3 방향중 이송방향인 Y방향의 동적성분이 현저하게 나타났고, 재래식 공구보다 최적화 공구가 현저하게 감소 하였다.

Fig. 4 는 중(重)절삭 조건에서 측정된 이송방향의 절삭력을 대역 통과 필터(Band pass filter)를 이용하여 200 (Hz) 이하의 절삭력 성분과 1000 (Hz) 이상의 신호를 제거하여 동적성분에 대한 Power spectrum을 구하였다. 주파수 영역에서 살펴보면 동적 성분은 공작기계의 고유진동수 부근에서 발생하는 것을 알 수 있다. 고유진동수 부근의 주파수의 피크값은 재래식 공구보다 최적화 공구가 감소 하는 경향을 보였다. 이것은 최적화 공구로 가공시 절삭상태가 안정됨을 알 수 있다. Table 5 는 재래식 공구와 최적화 공구로 측정된 절삭력의 동적성분을 각방향의 크기 및 합력, Y 방향의 변동량이다. 중(重)절삭 조건에서 최적화 공구의 X방향의 평균 동적성분이 0.89 N 이 감소 하였고, Y 방향의 동적 성분은 12.43 N 이 감소 하였고, Z 방향의 동적 성분이 4.02 N 이 증가 하여 전체 동적성분의 평균합력은 재래식 공구의 평균합력에 비해 8.25 N 이 감소 하였다.

경(輕)절삭 조건에서 최적화 공구의 X방향의 평균 동적성분이 0.63 N 이 감소 하였고, Y 방향의 동적 성분은 3.39 N 이 감소 하였으며, Z 방향의 동적 성분이 0.55 N 이 증가 하여 전체 동적성분의 평균합력은 재래식 공구의 평균합력에 비해 3.05 N 이 감소 하였다. 동적 성분의 Y 방향에 대한 변동량을 살펴보면 재래식 공구의 동적성분의 변화량이 최대 227.28 N 에서 최소 -237.62 N 까지 변화 하였으며 최적화 공구는 최대 181.37 N 에서 -192.88 N 으로서 최적화 공구의 동적 성분의 변동량은 재래식 공구에 비해 크게 감소 하였고, 이 감소된 변동량은 가공물의 표면조도를 양호하게 하는 직접적인 원인으로 사료된다.

Table 5. The comparison of dynamic components between conventional and optimal tools by experiment

공구종류	공구각	X-방향	Y-방향	Z-방향	합력	Y 방향 변동량(N)
	R, A, L	rms(N)	rms(N)	rms(N)		
재래식 (i)	0, 7, 15	6.09	9.59	2.80	13.24	116.3~(-92.5)
최적화 (i)	-9, 15, 45	6.27	6.20	3.35	10.19	87.9~(-68.8)
재래식 (iii)	0, 7, 15	21.06	41.10	11.07	47.72	227.3~(-237.6)
최적화 (iii)	-4, 15, 45	20.17	32.47	15.09	39.47	181.3~(-192.9)

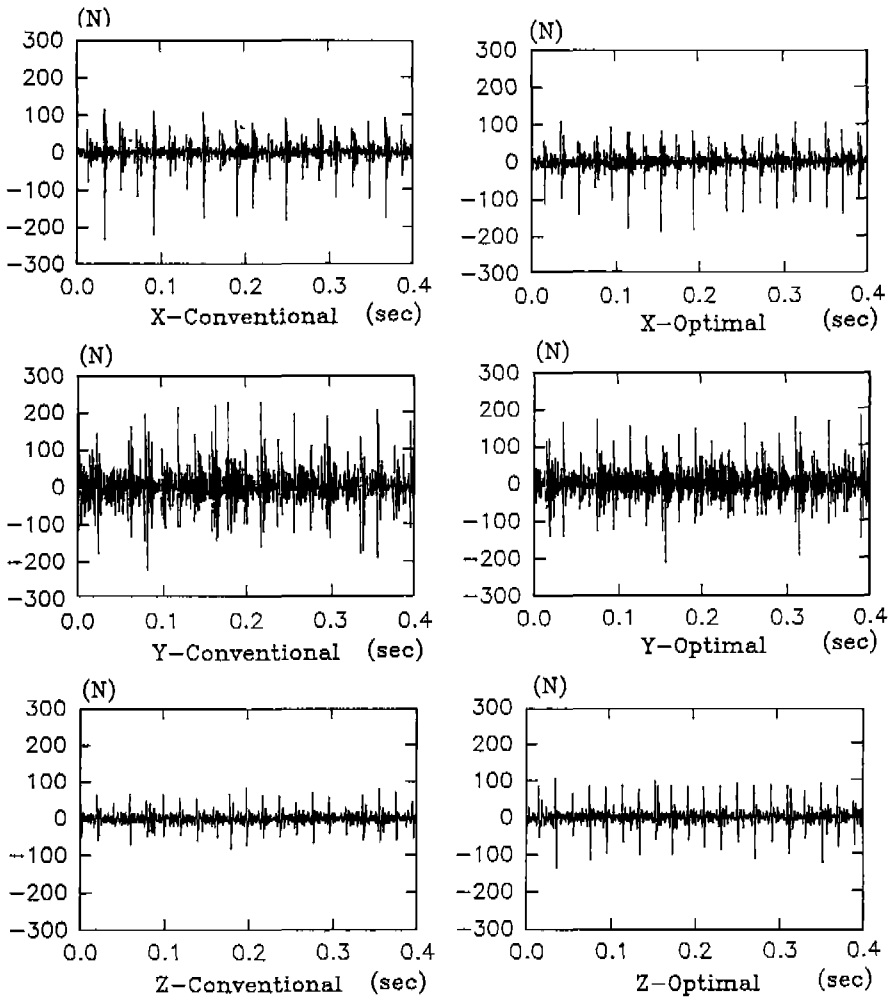


Fig. 3 Measured dynamic component of conventional and optimal tools.
 (370 rpm, depth: 2.5mm, feed per tooth: 0.043mm)

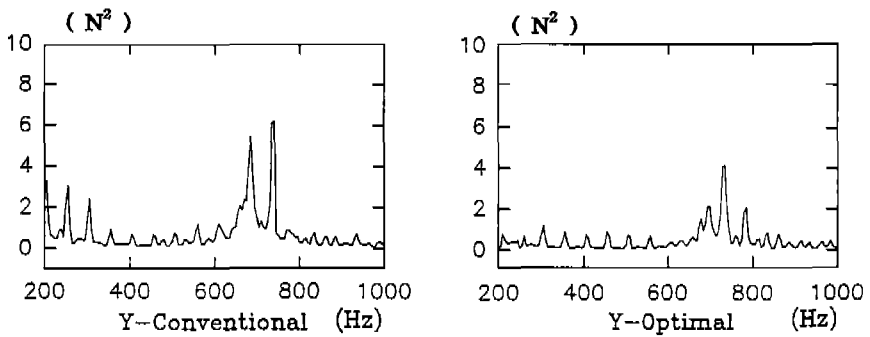


Fig. 4 Power spectra of measured dynamic component in Y direction.
 (370 rpm, depth: 2.5mm, feed per tooth: 0.043mm)

Fig. 5 는 정절삭력과 동적성분을 중첩하여 중(重)절삭 조건에서 동절삭력을 나타내었다. 정절삭력이나, 동적성분의 경향과 같이 최적화 공구가 재래식 공구 보다 이송 방향의 절삭력 및 변동량이 감소 함을 알 수 있다.

Table. 6 The comparison of dynamic components between conventional and optimal tools by experiment.

공구종류	공구각 R, A, L	X-방향	Y-방향	Z-방향	합력
		mean(N)	mean(N)	mean(N)	mean(N)
재래식 (i)	0, 7, 15	103.26	-259.11	117.93	318.09
최적화 (i)	-9, 15, 45	112.55	-195.80	131.42	284.96
재래식 (iii)	0, 7, 15	123.63	-667.18	227.77	723.20
최적화 (iii)	-4, 15, 45	190.13	-523.65	338.01	670.47

자려진동을 유발하고 공작기계를 불안정하게 하는 직접적인 원인인 동적성분을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 절삭속도와 이송량은 일정하게 하고 절삭깊이를 변화시키면서 실험을 하였다. 동적성분들 중에 영향이 가장 큰 이송방향(Y)의 동적성분을 주파수 분석하여 중(重)절삭 조건은 Fig. 6 에 나타내고, 경(輕) 절삭조건은 Fig. 7에 나타 내었다. 그림에서 중(重)절삭은 2.5mm 에서 안정하고, 경(輕)절삭은 1mm 와 1.5mm 에서 안정함을 보였다.

4.3 표면조도

Fig. 8 은 중(重)절삭 조건에서 재래식 공구와 최적화 공구로 가공된 시편의 표면 거칠기를 나타낸다. 재래식

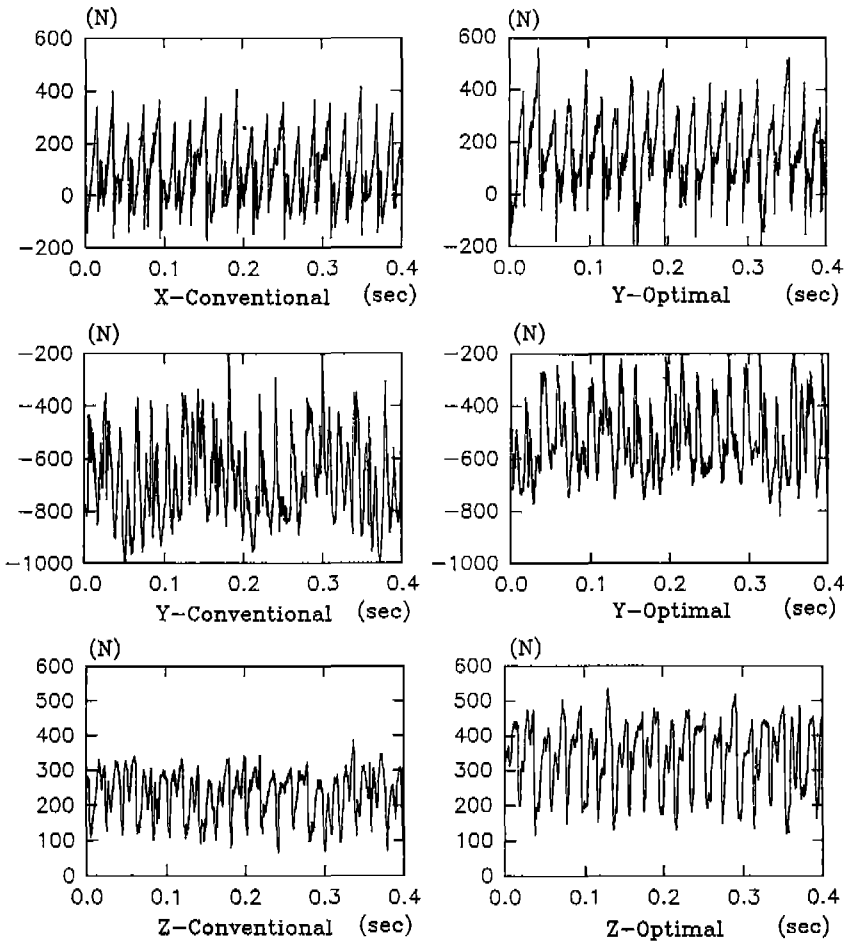


Fig. 5 Measured dynamic cutting force of conventional and optimal tools. (370 rpm, depth: 2.5mm, feed per tooth: 0.043mm)

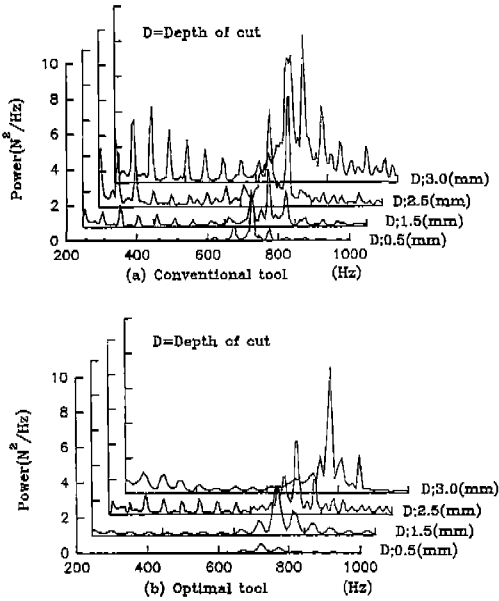


Fig. 6 Power spectra of measured dynamic component in Y direction. (370 rpm, depth: 2.5mm, feed per tooth: 0.043mm)

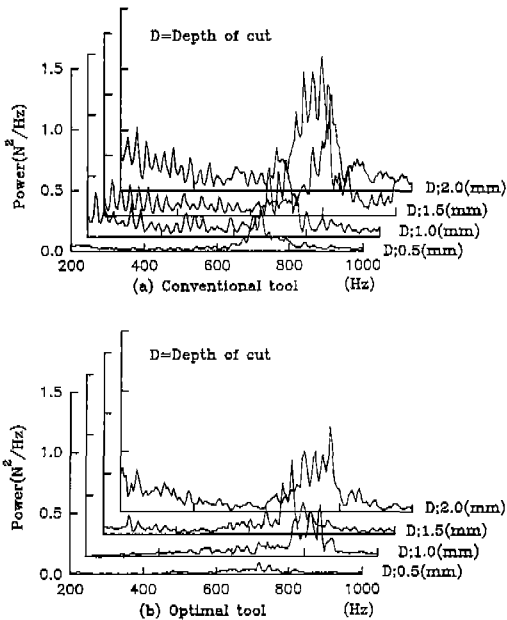


Fig. 7 Power spectra of measured dynamic component in Y direction. (180rpm, depth: 1.0 mm, feed per tooth: 0.043mm)

공구로 가공된 시편의 최대 거칠기(R_{max})는 $10.1 \mu m$ 이고, 최적화 공구로 가공된 시편의 최대 거칠기(R_{max})는 $7.9 \mu m$ 이다. 중(重)절삭 조건에서 가공된 시편의 최대 거칠기는 최적화 공구가 재래식 공구 보다 $2.1 \mu m$ 더 양호하게 나타났다.

Fig. 9는 중(重)절삭 조건에서 주파수 영역의 표면 거칠기를 나타낸다. 주파수 영역에서 36 Hz에서 큰 피크값을 나타내는데 이 성분은 절삭가공시 날당 이송량 (Feed per tooth : 0.0429 mm)과 Tracing 속도에 해당하는 주파수이다. 이 주파수 우측에 나타나는 주파수는 정면 밀링에서 절삭 가공시 절삭력의 변동에 의한 공구 및 공작물의 진동에 의하여 부가적으로 가공면에 나타나는 결(Lay)의 주파수 성분으로 생각된다. 큰 피크값 우측의 주파수 성분들을 재래식 공구와 최적화 공구로 가공한 가공면의 결과를 비교해 보면, 재래식 공구는 여러 개의 주파수로 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 가공면의 무늬가 불규칙하다는 것을 의미 하고, 최적화 공구 쪽은 이런 주파수가 미소 하고 주된 무늬의 주파수가 우월하게 나타나므로 표준시편의 주파수 성분들과 근접함을 알 수 있고, 주된 무늬가 다른 무늬들과 간섭없이 규칙

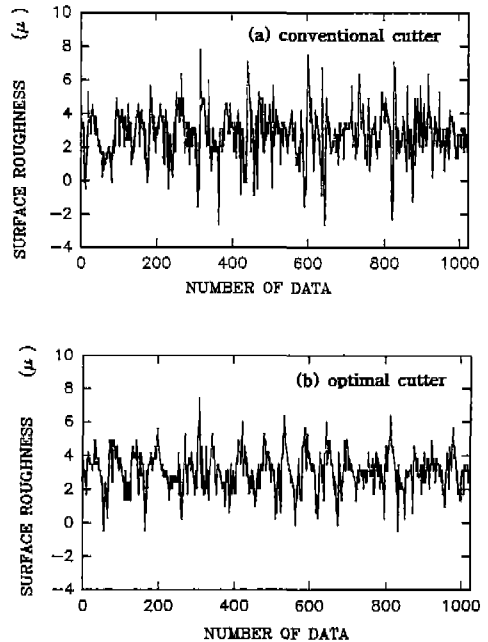


Fig. 8 Surface roughness of workpieces at heavy cutting condition. (time domain)

적으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이는 절삭력의 동적 성분의 변동량이 최적화 공구가 재래식 공구 보다 낮은 것에 기인되는 것으로 사료된다.

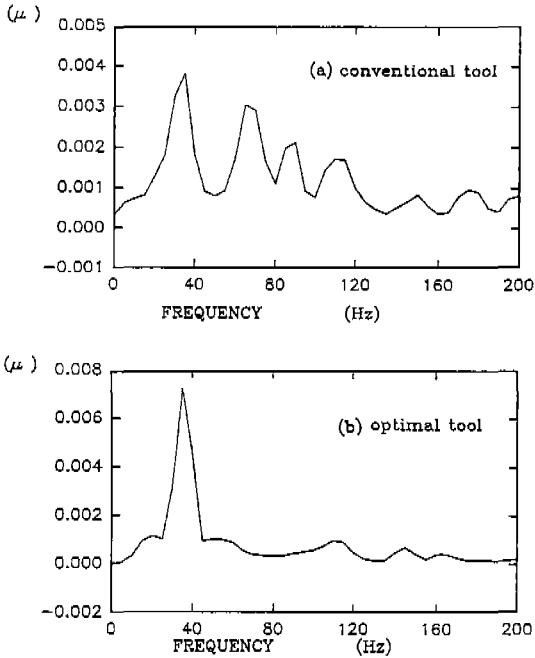


Fig. 9 Surface roughness of workpieces at heavy cutting condition. (frequency domain)

5. 결 론

절삭력을 최소화 하는 공구를 설계제작하여 동적거동을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 최적화 공구는 가공시 절삭력 중 이송방향의 동적성분 변동량을 크게 감소시켜 재래식 공구보다 안정성을 보였다.
2. 최적화 공구는 가공시 동절삭력이 감소됨으로써 공구와 공작물 사이의 상대변위가 감소하여 재래식 공구에 비하여 고유진동수 부근의 동적성분이 감소 하였다.
3. 최적화 공구로 가공한 가공물의 표면조도가 양호한 것은 동적성분의 변동량이 작은 것에 기인된 것으로 사료 된다.

6. 참고 문헌

1. Martellotti, M.E., "An Analysis of the Milling Process", ASME, Vol. 63, pp.

- 667-700, 1941.
2. Ruzhong, Z. and Wang, K. K. , "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling ", Annals of CIRP, Vol. 321/1, pp. 21-26, 1983.
3. Fu, H. J.,Devor, R. E., and Kapoor,S.G., "A Mechanistic Model for Prediction of the Force System in Face Milling Operations ", ASME, Vol. 106, pp81-99, 1984.
4. Kline,W.A. and Devor,R.E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in Milling". J. of MTDR, Vol. 23, No.2/3, pp.123-140, 1983.
5. Kline. W.A. and Devor,R.E. and Lindberg,J.R., "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int. J. of MTDR, Vol.22, No. 1, pp7, 1982.
6. 김희술, 이상석, "3축방향의 비절삭계수를 이용한 정면밀링 절삭력 모델 개발" 한국정밀공학회지, 제8권, 제1호, pp.116-120, 1991.
7. Gygax, P. E., "Dynamics of Single Tooth Milling", CIRP, Vol. 28, Jan., pp.65-71, 1979.
8. Das,M.K. and Tobias,S.A., "The Relation between the Static and the Dynamic Cutting of Metals", Int.J.,MTDR,Vol.7,pp63-89, 1967.
9. Nigm, M.M., Sadek,M.M. and Tobias,S.A., "Determination of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data", Int.J.of MTDR,Vol.17,pp19-37, 1977.
10. Opitz, H. and Bernardi, F., "Investigation and Calculation of the Chatter Behavior of Lathes and Milling Machines". Annals of the CIRP, Vol. 17,pp335-343, 1970.
11. 김희술, 이상석, 이병철, "정면밀링 작업에서 동절삭력의 해석", 대한 기계학회 논문 집, 제16권, 제 12호, pp2268-2278, 1992.
12. Patrik Doolan & F. A BURNEY and S. M. WU, "Computer Design of a Multipurpose Minimum Vibration Face Milling Cut-

- ter", MTDR, Vol. 16, pp. 187-192, 1975.
13. 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.
 14. 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.
 15. J. S. Kim & D.W. Cho and J. M. lee, "Optimal Design of Face Milling Cutter Geometry" CIRP, Vol. 39, pp 391-394, 1990.
 16. Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design". Macgraw Hill, pp136-144.
 17. 김정현, 김희술, "시뮬레이션에 의한 정면밀링용 공구의 최적설계" 한국정밀공학회 제 10권, 제2호, pp76-85, 1993.
 18. 김정현, 김희술, "정면밀링용 공구의 최적설계에 대한 연구(1),(절삭력 중심으로)" 대한기계학회 논문집, 제 18집, 제9호, pp. 2211-2224, 1994.
 19. 김정현, 김희술, "정면밀링용 공구의 최적설계에 대한 연구(2),(공구수명 및 표면조도중심으로)" 대한 기계학회 논문집, 제 18집, 제9호, pp. 2225-2233, 1994.
 20. Tool and Manufacturing Engineers Hand book, Vol. Wick, Drozda.