

(論 文)

정면밀링커터의 최적설계에 대한 연구(1)

— 절삭력 중심으로 —

김정현* · 김희술**

1993년 4월 30일 접수

A Study on Optimal Design of Face Milling Cutter Geometry (I)

— With Respect to Cutting Force —

Jung-hyun Kim and Hee-Sool Kim

Key Words : Optimal Design(최적설계), Cutting Force Model, 절삭력 모델, Resultant Cutting Force/절삭력의 합력, Objective Function(목적함수)

Abstract

On face milling operation a new optimal cutter, which can minimize the resultant cutting forces, was designed from the cutting force model. Cutting experiments were carried out and the cutting forces of the new and conventional cutters were analyzed in time and frequency domains. The resultant cutting forces were used as the objective function and cutter angles as the variables. A new optimal cutter design model which can minimize the resultant cutting forces under the constraints of variables was developed and its usefulness was proven. The cutting forces in feed direction of the newly designed cutter are reduced in comparison with those from the conventional cutter. The magnitudes of an insert frequency component of cutting force from the newly designed cutter are reduced than those from conventional cutter and the fluctuations of cutting force are also reduced.

기 호 설 명

$A(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트 의 미절삭 칩면적(mm ²)	$F_a(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준면으로 한 좌표 계에서 i 번째 인서트에 작용하는 수직 방향 힘 N .
$C(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서트 의 순간 칩 두께, mm.	$F_A(i, \phi)$: 커터면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 수직방향 힘 (N)
$C_i(\theta_i, \phi)$: 스핀들 편심에 의한 i 번째 인서트의 칩두께의 변화 mm.	$F_r(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준면으로 한 좌표 계에서 i 번째 인서트에 작용하는 반경 방향 힘 N .
d : 절삭길이 mm.	$F_R(i, \phi)$: 커터면을 기준면으로 한 좌표계에서 i 번째 인서트에 작용하는 반경방향 힘 N .
$D(\theta_i, \phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i 번째 인서 트의 순간 절삭길이 mm.	f_i : 절삭날 한개당 피드 mm.
E : 스핀들 편심량 mm.	$F_z(i, \phi)$: 인서트 경사면을 기준으로 한 좌표계

*정회원, 영남대학교 대학원

**정회원, 영남대학교 기계공학과

- 에서 i 번째 인서트에 작용하는 접선방향 힘 N_i
- $F_{y,i}, \emptyset$: 커터면을 기준면으로 한 좌표에서 i 번째 인서트에 작용하는 접선방향 힘 N_i
- F_x, \emptyset : 커터의 회전각이 \emptyset 일때 X -방향의 힘의 성분 (N)
- F_y, \emptyset : 커터의 회전각이 \emptyset 일때 Y -방향의 힘의 성분 (N)
- F_z, \emptyset : 커터의 회전각이 \emptyset 일때 Z -방향의 힘의 성분 (N)
- $g_1 \sim g_6$: 제한조건 (constrain conditions)
- K_A : 축방향과 접선방향의 힘과 관련된 무차원 상수
- K_A' : 축방향의 비절삭력 계수 $(N \cdot mm^2)$
- K_R : 반경방향과 접선방향의 힘과 관련된 무차원 상수
- K_R' : 반경방향의 비절삭력 계수 $(N \cdot mm^2)$
- K_T : 접선방향의 비절삭력 계수 $(N \cdot mm^2)$
- n : 데이터의 수 (1024개)
- N : 스피들의 회전속도 RPM
- R : 커터의 반경 (mm)
- Z_c : 동시에 절삭작용을 하는 인서트의 수 (개)
- Z_a : 커터에 설치된 인서트의 수 (8개)
- γ_A : 인서트의 축방향의 경사각 $(^\circ)$
- γ_L : 커터의 리드각 $(^\circ)$
- γ_R : 인서트의 반경방향의 경사각 $(^\circ)$
- $\varepsilon_a(i)$: i 번째 인서트의 반경방향의 초기 위치 오차 (mm)
- $\varepsilon_a(i-1)$: $(i-1)$ 번째 인서트의 축방향의 초기 위치 오차 (mm)
- $\varepsilon_r(i)$: i 번째 인서트의 반경방향의 초기 위치 오차 (mm)
- $\varepsilon_r(i-1)$: $(i-1)$ 번째 인서트의 반경방향의 초기 위치 오차 (mm)
- θ_i, \emptyset : 커터의 회전각이 \emptyset 일때 i 번째 인서트의 위치 $^\circ$
- θ : 스피들의 편심각 $(^\circ)$
- \emptyset : 커터의 회전각 $(^\circ)$
- X_1 : 변수로서 최적화 공구의 반경방향 경사각 $(^\circ)$
- X_2 : 변수로서 최적화 공구의 축방향 경사각 $(^\circ)$
- X_3 : 변수로서 최적화 공구의 리드각 $(^\circ)$

Q : 목적함수 objective function

1. 서론

정면밀링공정 (face milling process)은 회전하는 커터에 대하여 가공물이 커터축에 수직인 방향으로 상대적 운동을 하면서 이루어지는 가공공정으로서 한번에 많은 양의 칩을 처리할 수 있기 때문에 금속가공을 매우 효율적으로 수행할 수 있다.

그러나 밀링커터는 단속 절삭공구로서 절삭날의 단속 절삭작용에 의한 변동절삭력과, 여러날의 동시가동에 의한 절삭력의 교란때문에 가공능률, 가공정밀도, 기계와 공구의 수명에 문제가 되어 왔다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기계설계자들은 절삭력의 교란에 의하여 일어나는 진동을 줄이기 위하여 기계구조의 강성을 증가시켰으나 이것은 비용이 많이 들게 되므로 커터형상을 개선하여 안정된 절삭을 시도하였다.

1975년 Wu^(1,2)는 수직밀링에서 컴퓨터를 이용하여 기계의 진동의 크기를 목적함수(objective function)로 하여 최소진동형 커터의 형상을 설계하였고, 최근에는 Jha⁽³⁾가 수평밀링에서 커터설계의 비용을 목적함수로 하여 커터의 형상을 설계하였다. Kim 등⁽⁴⁾의 연구자들은 공구각을 변수로 하고 진동의 크기를 목적함수로 하여 2차원으로 최적 커터를 설계하였다.

대부분의 연구자들은⁽¹⁻⁴⁾ 절삭력에 의하여 발생하는 진동의 크기를 최소화하기 위하여 불균일한 인서트 간격, 커터의 지름과 높이의 비, 축방향 경사각 및 반경방향 경사각 등을 설계하였다. 진동을 목적함수로 한 논문에서는^(1,2,4) 진동을 줄이는 커터형상이 개발되었으나, 진동은 공작기계의 구조와 노이즈 noise 등에 큰 영향을 받기 때문에 공작기계의 종류에 따라서 그 형상이 상이(相異)할 수 있으나 진동원이 되는 절삭력을 목적함수로 하여 개발된 커터는 보다 다양한 공작기계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 절삭력 모델을 이용하여 변의발생의 원인인 절삭력변동을 최소로 하는 커터를 개발하고자 한다. Martelloti, Fu, Gyax, Ruzhong⁽⁷⁻¹⁰⁾등이 제안한 절삭력 모델을 기본으로 하여 난삭재 및 중절삭 가공시의 절삭력 예측, 정밀도를 향상시키기 위해 축방향 절삭력 계수 및 인서트

트의 초기 위치오차, 스피들의 편심들을 고려하여 절삭력 예측 정밀도의 향상을 시도한 모델을 사용하였다^(5,6)

절삭력 모델과 최적화기법을 결합하여 3방향(X, Y, Z)의 합력을 목적함수로 취하고 공구의 반경방향 경사각(radial rake angle), 축방향 경사각(axial rake angle), 리드각(lead angle)을 변수(variable)로 하여 커터형상을 최적설계하였다. 재래식 공구와 최적설계된 공구의 특성을 비교하기 위하여 최적설계된 공구를 제작하여서 절삭실험을 수행하여 그 유용성을 검증하였다.

새로이 제안된 커터(이후 최적화 커터라 칭함)는 절삭력 변동을 줄임으로써 가공정밀도, 생산능력, 기계 및 공구의 수명, 가공물의 표면조도 등의 향상과 절삭중 공작기계의 안정화에 기여할 것으로 사료된다.

2. 최적화 모델

2.1 절삭력 모델

Fu, Gyax^(8,9) 등에 의하여 기본 절삭력의 계산은 Fig. 1에서 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i 번째 인서트에 의해 발생하는 순간절삭 칩두께(instantaneous chip thickness) $C(\theta_i(\phi))$, 순간 절삭깊이(instantaneous depth of cut) $D(\theta_i(\phi))$, 및 순간 절삭면적(instantaneous uncut chip area) $A(\theta_i(\phi))$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} C(\theta_i(\phi)) &= f_i \sin(\theta_i(\phi)) \\ D(\theta_i(\phi)) &= d \\ A(\theta_i(\phi)) &= C(\theta_i(\phi)) \cdot D(\theta_i(\phi)) \end{aligned} \quad (1)$$

스핀들 편심에 의한 절삭 커터각, 스피들 편심, 인서트 초기 위치오차(축방향 및 반경방향)에 의한 칩 단면적의 변화는 참고문헌^(5,6)에 의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c(\theta_i(\phi)) &= f_i \sin(\theta_i(\phi)) - E \sin^2(\theta_i(\phi)) \\ &\quad + [\varepsilon_r(i) - \varepsilon_r(i-1)] \cos \theta_i \sin^2 \theta_i(\phi) \\ &\quad + \varepsilon_a(i) \sin \theta_i \\ d(\theta_i(\phi)) &= d - R \sin \theta_i \cdot \sin^2 \theta_i(\phi) \\ &\quad + [\varepsilon_a(i) - \varepsilon_a(i-1)] \sin \theta_i \\ &\quad + \varepsilon_r(i) \sin \theta_i \\ A(\theta_i(\phi)) &= c(\theta_i(\phi)) \cdot d(\theta_i(\phi)) \end{aligned} \quad (2)$$

한 인서트에 의해 발생된 칩 단면에 작용하는 점

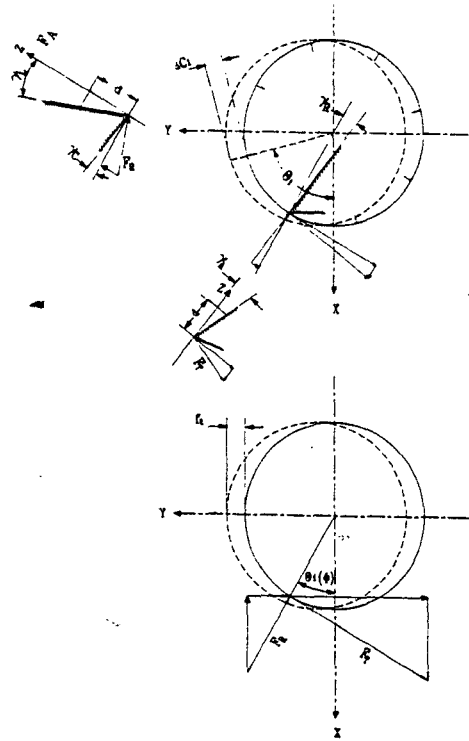


Fig. 1 Force components according to cutter geometry and cutting geometry

선방향의 힘(tangential force) $F_T(i, \phi)$ 와 반경방향의 힘(radial force) $F_R(i, \phi)$ 과 및 축방향의 힘(axial force) $F_A(i, \phi)$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.^(5,6)

$$\begin{aligned} F_T(i, \phi) &= K_T A(\theta_i(\phi)) \\ F_R(i, \phi) &= K_R A(\theta_i(\phi)) = K_R F_T(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) &= K_A A(\theta_i(\phi)) = K_A F_T(i, \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

위의 식에 사용된 비절삭 계수들은 같은 절삭조건에서도 정면밀링커터의 회전각 및 공구각에 따라서 변화한다. 그러나 밀링절삭기구는 선삭과 같은 단인절삭기구에 비하여 매우 복잡하고 또한 공구각을 변화시키면서 비절삭 계수를 측정하는 것이 큰 비용과 노력이 소요된다. 따라서 본 논문에서는 Fu^(5,6,8,10) 등에 의하여 평균 비절삭 저항을 절삭력 모델의 계수로 사용하였다. 절삭력을 계산할 때에는 공구각에 따른 절삭면적의 변화를 고려하므로써 절삭력의 예측 정밀도가 보완되었다.

한 순간에 작용되는 각 축방향의 힘의 성분을 각각 $F_x(\phi)$, $F_y(\phi)$ 및 $F_z(\phi)$ 라 할 때 식(3)에 표시된 F_T , F_R 및 F_A 의 각 축방향의 분력의 합으로

표시할 수 있으며, X-, Y- 및 Z-방향의 순간절삭력 성분은 커터회전각이 ϕ 일 때 동시에 절삭작용을 하는 인서트들의 각 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

F_T , F_R 및 F_A 를 각각 커터의 형상을 고려하여, 공구각(γ_A , γ_R , γ_L)에 의한 힘의 성분으로 나타내면 식(4)와 같다.^(5,6)

$$\begin{aligned}
 F_T(i, \phi) &= f_t \cos \gamma_A \cos \gamma_R + f_r \cos \gamma_L \sin \gamma_R \\
 &\quad + f_a \cos \gamma_R \sin \gamma_A \\
 F_R(i, \phi) &= -f_t \cos \gamma_A \sin \gamma_R + f_r \cos \gamma_L \cos \gamma_R \\
 &\quad - f_a \sin \gamma_L \\
 F_A(i, \phi) &= -f_t \sin \gamma_A + f_r \sin \gamma_L + f_a \cos \gamma_L \cos \gamma_A
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식(2), (3), (4)으로부터 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_X(\phi) \\ F_Y(\phi) \\ F_Z(\phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^z \begin{bmatrix} \sin \theta_i(\phi) & -\cos \theta_i(\phi) & 0 \\ -\cos \theta_i(\phi) & -\sin \theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i, \phi) \\ F_R(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) \end{Bmatrix}
 \tag{5}$$

식(5)로부터 밀링작업에서 발생하는 스핀들의 동적인 변화성분 및 인서트를 커터에 설치할 때 발생하는 오차 및 절삭조건을 고려한 절삭력을 예측할 수 있다.

2.2 커터형상의 최적설계

수직밀링에서 일반적으로 최소 절삭력이 발생할 때 양호한 절삭이 이루어지며, 많은 연구자들은 절삭력의 교란에 의하여 일어나는 진동을 줄이기 위

한 효과적인 접근법으로 인서트의 간격을 부등간격으로 설계하는 방법⁽¹²⁾ 및 2단 형상의 커터설계⁽¹⁴⁾ 등에 대해 연구하였다. 절삭력 교란문제를 해결하기 위한 또 다른 유용한 접근은 각 인서트의 형상을 변화시키는 것이다.⁽⁴⁾

그러나 부등분할의 정도가 심한 경우 일부 인서트에 편중된 하중을 받게되고 이로 인하여 공구수명에 치명적인 영향을 줄 우려가 있고, 진동은 공작기계의 구조와 노이즈(noise) 등에 큰 영향을 받기 때문에 공작기계의 종류에 따라서 그 형상이 상이할 수 있으나 진동원이 되는 절삭력을 목적함수로 하는 것은 보다 다양한 공작기계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 앞에서 제시한 절삭력 예측모델에서 X, Y 및 Z방향의 절삭력의 합력을 목적함수(objective function)로 취하였다. 반경방향 경사각(radial rake angle)과 축방향 경사각(axial rake angle) 및 리드각(lead angle)을 변수(variable)로 취하였다. 제한조건(constraint condition)은 상업적으로 유용한 밀링커터에 추천된 한계값⁽¹²⁾ 및 국내외에서 제작되고 있는 커터의 각을 고려하여 네가티브 경사각(negative rake angle)까지 고려하였으며, Table 1은 일반적으로 널리 사용되고 있는 커터 형상을 나타낸다.

식(5)에서 3축 방향의 절삭력을 고려하여 최적화의 표준형태로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{Find } & x = [x_1, x_2, x_3] \\
 \text{Minimize } & \\
 Q = & \left[\sum_{i=1}^n \sqrt{F_x^2(\phi) + F_y^2(\phi) + F_z^2(\phi)} \right] / n
 \end{aligned}$$

Table 1 Commercially available milling cutter geometry⁽¹²⁾

Workpiece material	Insert rake angle (Axial, Radial) (Degree)	Lead angle (Degree)
Free machining steels	Double positive (0~15)	5~30
Plane carbon steel	Double positive (0~15)	5~30
High alloy steels	Double positive or negative (0~15)	5~30
Armor plate steels	Double negative (0~15)	5~30
Cast iron	Double negative (0~15)	5~45
Non-ferrous (Aluminum, Brass, Bronze copper)	Double positive (0~15)	5~30

Subject to $g_1(x) = -12 - x_1 \leq 0$
 $g_2(x) = x_1 - 15 \leq 0$
 $g_3(x) = -12 - x_2 \leq 0$
 $g_4(x) = x_2 - 15 \leq 0$
 $g_5(x) = 0 - x_3 \leq 0$
 $g_6(x) = x_3 - 45 \leq 0$ (6)

식 6)에서 x 는 설계변수로서 x_1, x_2, x_3 는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각 및 리드각을 나타내고 Q 는 최소화시키고자 하는 절삭력의 합력을 나타내는 목적함수이다. $g_1(x) \sim g_6(x)$ 는 각각 설계변수에 대한 제한조건들이고, $g_1(x)$ 및 $g_2(x), g_3(x)$ 및 $g_4(x)$ 는 각각 반경방향 경사각과 축방향 경사각이 -12° 에서 0° 에서 15° 사이의 형상으로 설계하고자 하는 것이고, $g_5(x)$ 및 $g_6(x)$ 는 리드각이 45° 사이의 형상으로 설계하고자 하는 조건을 의미한다.

3. 시뮬레이션에 의한 최적커터의 설계

절삭조건은 Metal Hand Book⁽¹⁵⁾의 추천값과 본 실험에 사용된 밀링머신의 용량을 고려하여 경(輕) 절삭, 중(中) 절삭, 중(重) 절삭 3조건으로 선정하여 Table 2와 같다.

절삭력 모델로부터 예측되는 절삭력의 타당성을 검토기 위하여 Table 2와 같은 절삭조건으로 재래식 커터로 절삭시험을 행하여, 실측된 절삭력과 절삭력 모델로부터 예측된 절삭력이 일치 하는 것을 확인하였다. Fig. 2는 최적화과정의 흐름도로서 최적화 모델과 절삭력 모델로 구성되었다. 절삭력 모델에서 절삭조건 및 주축의 편심량, 각 인서트들의 초기 위치오차 등이 입력되어 3축 방향의 절삭력 성분들을 식(5)으로부터 계산한다. 이 3축 방향의 절삭력들은 식(6)의 Q (resultant force)와 같이 변수(x_1, x_2, x_3)들만이 미지수로 처리되어 목적함수를 구성한다.

최적화기법은 S. Q. P(sequential quadratic pro-

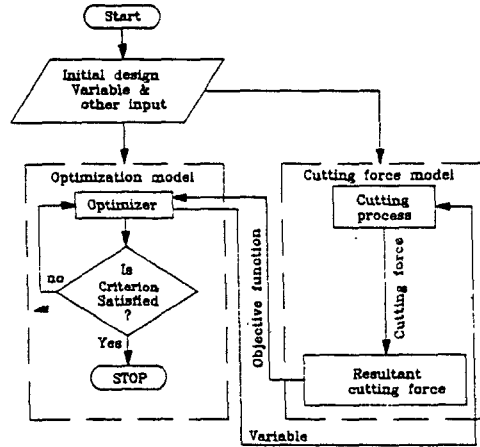


Fig. 2 Flow-chart of optimization

gramming)⁽¹¹⁾ 알고리즘을 이용하여 작성되었다. 절삭력 모델에서 구성되었던 목적함수는 최적화 모델로 옮겨져서 제한조건 함수와 함께 각각 편미분값들을 포함하는 QP subproblem이 형성 된다. QP subproblem의 해(solution)는 새로운 설계변수의 탐색방향으로 설정되고, descent function을 최소화함으로써 결정되는 스텝사이즈(step size)와 함께 새로운 설계변수로 형성되어 목적함수의 값을 감소시켜 나간다. 이러한 과정을 반복하여 수렴조건을 만족하면 반복수행에서 빠져 나온다.

4. 실험

4.1 최적화 커터의 제작

본 연구에서는 커터의 반경방향 경사각, 축방향 경사각 및 리드각이 주어진 경우 3자유도를 갖는 밀링머신에서 커터몸체의 인서트 및 엔빌, 웬지, 칩 포켓 등의 안내면 가공을 위한 셋업 각도들은 재래식 공구의 제작법과 같은 회전변환행렬 해법을 이용하였다.⁽¹⁴⁾ 커터의 몸체는 새로이 제안된 커터의 리드각이 커짐에 따라서 인서트를 충분히 받쳐 줄 수 있는 크기로 설계 되었다. 칩 포켓은 칩의 흐름을 방해하지 않도록 충분히 고려하였다. 인서트의 수(8개)는 재래식 공구와 최적화 공구가 같도록 제작하였다. 새로이 제안된 커터는 경(輕) 절삭 조건과 중(重) 절삭조건에서 각각 한개씩 제작하였다. Fig. 3은 재래식 커터와 최적화 커터의 형상을 나타낸 것으로서 (a)는 재래식 커터, (b)는 경(輕) 절삭조건에서 제안된 최적화 커터, (c)는 중(重)

Table 2 Cutting conditions

Depth of condition	(i)	(ii)	(iii)
Spindle speed (rpm)	180	265	370
Feed rate (mm/insert)	0.0424	0.0410	0.0429
Depth of cut (mm)	1.0	1.8	2.5

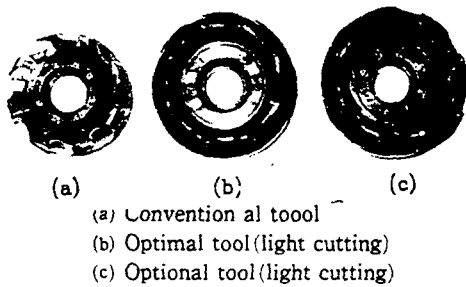


Fig. 3 Photographic configuration of the conventional & new proposed cutter

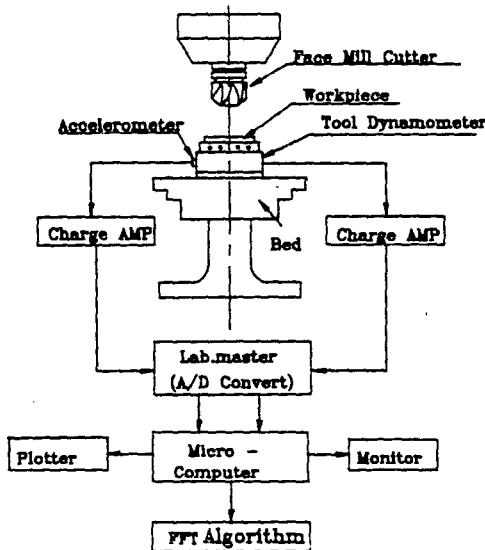


Fig. 4 Schematic diagram for experimental setup

절삭조건에서 제안된 최적화 커터의 형상을 나타낸다.

최적화 커터의 검증을 위하여 먼저 3차원 측정기로 공구각을 확인하였으며, 다음 절삭력을 측정하여 시뮬레이션 절삭력과 비교하였을 때 비교적 잘 일치하므로 간접적인 검증을 할 수 있었다.

4.2 실험장치 및 실험조건

Fig. 4는 절삭실험장치의 개략도이다. 수직밀링 머신에 3축 방향의 절삭력을 측정할 수 있는 공구 동력계를 테이블 위에 고정시켜서 Table 3과 같은 실험조건으로 절삭실험을 수행하였다. 절삭 실험중 발생하는 데이터는 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 모니터링(monitoring)함과 동시에 A/D converter를 통해 마이크로컴퓨터에 저장한다. 이 때에 X, Y, Z방향의 절삭력 성분들을 0.0005초의

Table 3 Experimental conditions

Spindle speed	180, 265, 370 rpm)
Milling type	Up-milling
Depth of cut	1, 1.8 2.5 (mm)
Feed rate	61, 87, 127 (mm/min)
Width of workpiece	47.3 (mm)vk
Diameter of cutter	100 (mm)
Number of insert	8
Sampling time	0.0005 (sec)
Number of data	1024

Table 4 Specification of experimental set-up

Milling machine	Vertical type WMV-1100
Tool dyanmometer	KISTLER (type 9257 A)
A/D converter	Lab. MASTER
	Conversion rate : 30KHz
	Resolution : 12bit Input range : ±10V
Computer	IBM PC/AT : 64bit
Amplifier	KISTLER (Type 5008)
Workpiece	SS 41

간격으로 1024개를 연속적으로 측정하였다. 실험에 사용된 기계, 공작물 및 측정기의 제원은 Table 4와 같다.

5. 결과 및 고찰

최적화 모델로부터 계산되어진 결과는 절삭조건 (i)에서 절삭력의 합력을 최소로 하는 커터각은 반경방향 경사각이 -9°, 축방향 경사각이 15°, 티드각이 45°로 결정되었고, 절삭조건 (ii)에서는 -5°, 15°, 45°로 결정되었고, 절삭조건 (iii)에서는 -4°, 15°, 45°로 결정되었다. 이 결과들은 공구수명, 표면조도 등의 절삭성에 악영향을 미치지 않는 범위의 설계변수로 고려되었기 때문에 일부 active constraint를 포함하고 있으므로 local minimum으로 생각된다.

Table 5 The simulated resultant cutting forces of conventional and optimal cutters in the case of increasing axial rake angle

γ_A	Conventional cutter	Optimal cutter
20°	726.93 N	656.83 N
30°	761.7 N	646.54 N
40°	831.67 N	652.60 N
50°	956.35 N	682.77 N
60°	1190.42 N	760.80 N

설계변수의 제한조건을 넓혀서 시뮬레이션에 의하여 재리식 공구와 최적화 공구의 합력을 Table 5에 나타내었다. 재리식 공구(0, 7, 15) 반경방향 경사각 0°와 리드각 15°를 고정하고 축방향 경사각을 점차로 증가시켰을때 절삭력의 합력은 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 절삭력의 합력을 줄이기 위하여서는 상대적으로 반경방향의 경사각과 리드각의 변화가 요구되어 최적화의 필요성이 요구됨을 알 수 있다. 최적화시킨 공구(-4, 15, 45)에서 반경방향 경사각과 리드각을 고정시키고 축방향 경사각만 증가시켰을 경우 30°까지는 합력이 줄어들다

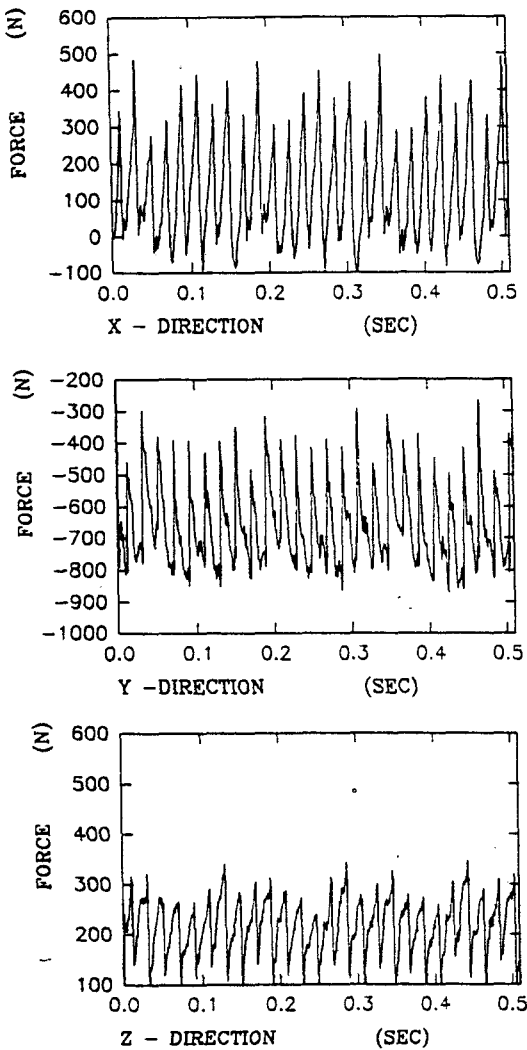


Fig. 5 Measured cutting force in time domain. rpm: 370, depth of cut: 2.5 (mm), feed per tooth: 0.0429 (mm)

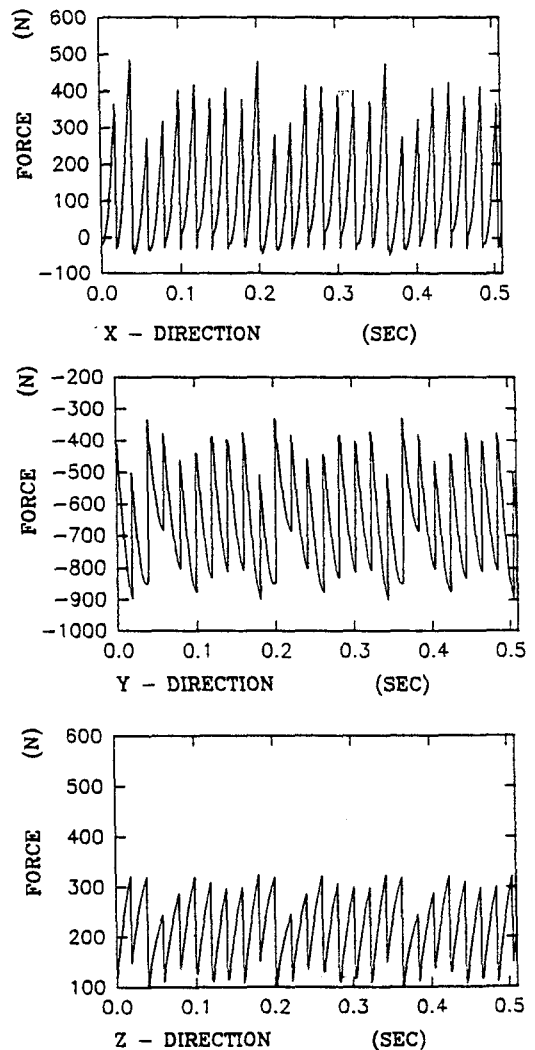


Fig. 6 Simulated cutting force in time domain. rpm: 370, depth of cut: 2.5 (mm), feed per tooth: 0.0429 (mm)

가 40°에서는 다시 증가하는 경향을 보인다. 축방향의 경사각이 30°라면 인서트 여유각이 30° 이상이 되어야 하고 만약 이렇게 제작한다 하여도 절삭각이 너무 작아서 인서트는 파괴되고 말 것이다. 따라서 본 연구에서 적절한 제한조건을 선정한 것으로 생각된다.

최적화시킨 결과들을 예측 절삭력 모델에 입력하여 시뮬레이션 최적공구의 절삭력을 계산하였다. 각 절삭조건에서 반경방향 경사각이 0°, 축방향 경사각이 7°, 리드각이 15°인 재래식 커터의 시뮬레이션 절삭력들과 새로이 제안된 최적커터의 시뮬레

이션에 의한 절삭력을 비교해 보면, 절삭조건 (i), (ii), (iii)에서 피드방향의 절삭력이 크게 감소 되었고, X-방향과 Z-방향의 절삭력은 다소 증가하는 경향으로 나타났다. 새로이 제안된 공구의 절삭력 특성은 특정한 방향의 절삭력이 다른 방향의 절삭력에 비하여 지나치게 커지는 것을 억제함으로써 합력을 감소시키고 안정된 절삭을 가능하게 한 것으로 생각된다.

Table 3과 같은 실험조건에서 Table 4에 나타나는 실험장치로, 중(重) 절삭조건에서 재래식 커터로 절삭실험을 수행하여 얻은 절삭력을 500(Hz)이

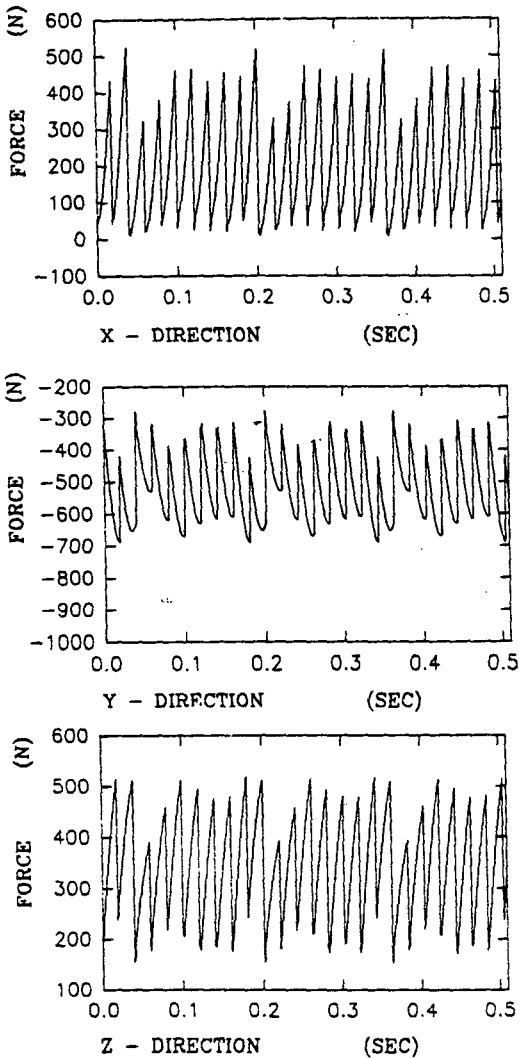


Fig. 7 Simulated cutting forces resulted from optimal tool in time domain. rpm : 370, depth of cut : 2.5 mm, feed per tooth : 0.0429 mm.

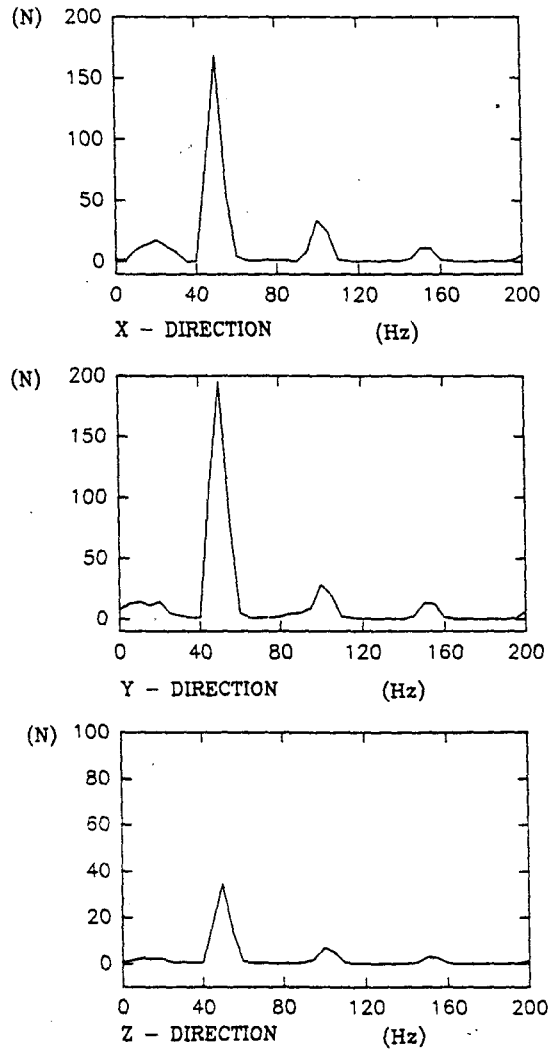


Fig. 8 measured cutting force in frequency domain rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm) feed per tooth : 0.0429(mm)

상의 고주파수 성분을 필터링(filtering)하여 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 6은 식(5)의 절삭력 모델로부터 예측한 절삭력이고, Fig. 7은 최적화한 커터의 예측 절삭력을 나타낸다. Fig. 8은 중(重)절삭 조건에서 재래식 커터로 절삭한 추정 절삭력을 저주파수영역에서 보다 정밀한 관찰을 위해 200(Hz) 이상을 필터링(filtering)한 후 FFT(fast fourier transform)를 이용하여 주파수영역으로 나타낸 것이다. Fig. 9는 시뮬레이션에 의해 계산된 절삭력이고, Fig. 10은 최적공구의 예측 절삭력이다.

Fig. 5의 추정 절삭력과 Fig. 6의 예측 절삭력이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있고, Fig. 8과 Fig. 9에서 주파수영역에서도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 이 결과로 절삭력 모델의 정도를 확인 할 수 있다.

Fig. 6의 시뮬레이션 절삭력과 Fig. 7의 시뮬레이션에 의한 최적커터의 절삭력을 비교해 보면 절삭력이 크게 감소된 피드방향의 피크가 Fig. 6(Y-방향)에서 (-350)(N) ~ (-900)(N)사이로 약 550(N)사이로 변화되는 것을 볼 수 있고, Fig. 7

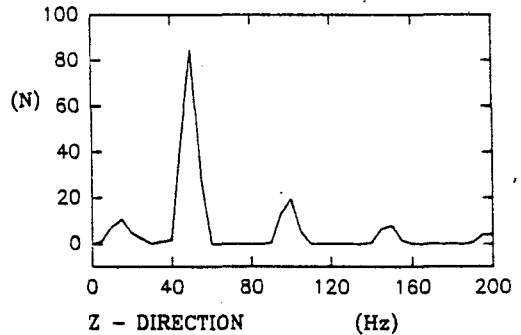
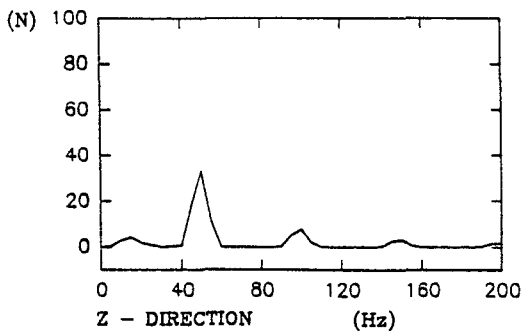
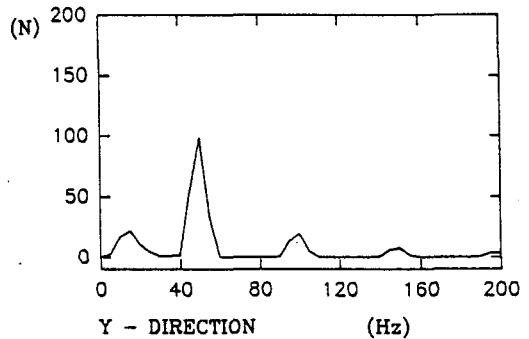
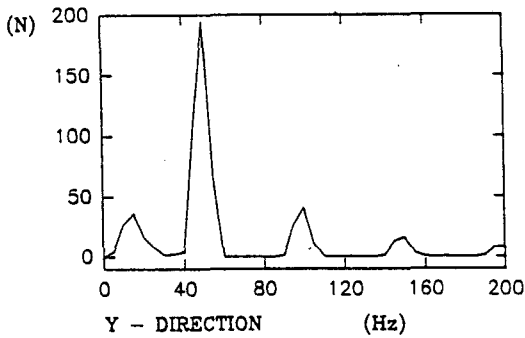
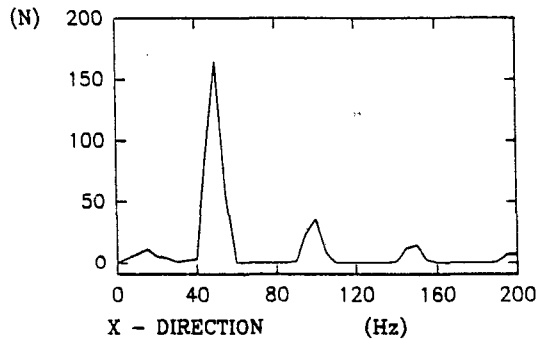
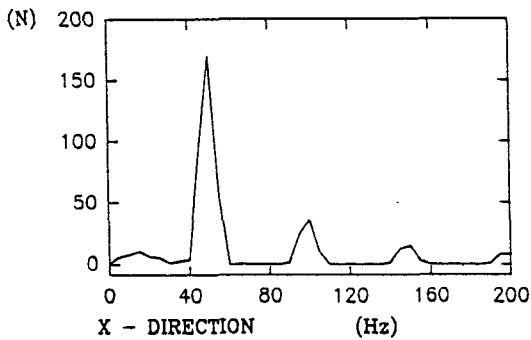


Fig. 9 Simulated cutting force in frequency domain rpm : 370 depth of cut : 2.5(mm) feed per tooth : 0.0429(mm)

Fig. 10 Simulated cutting forces resulted from optimal tool in frequency domain rpm : 370 depth of cut : 2.5(mm) feed per tooth : 0.0429(mm)

(Y-방향)에서는 (-300)(N)~(-700)(N) 사이로 약 400(N)으로 절삭력의 변동이 줄어들었고, X-방향과 Z-방향의 절삭력은 다소 증가하는 경향으로 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 가장 큰 절삭력이 발생 되는 Y-방향 절삭력에서 같은 순간에서 절삭력의 최고점(peak)의 감소는 53.5(N)에서 최대 217.6(N)이 감소함을 알 수 있고, 실험조건 (i)에서는 최저 14.2(N)에서 최대 80.9(N)이 감소하였고, 실험조건 (ii)에서는 최저 25.2(N)에서 최대 127.2(N)이 감소하였음을 알 수 있다.

Y-방향의 감소량에 비해 X-방향과 Z-방향의 절삭력의 증가가 적기 때문에 전체적인 합력은 감소하였다. 실험조건 (i), (ii), (iii)에서 평균 합력은 각각 25.23(N), 29.72(N), 45.49(N)이 감소함을 알 수 있었다.

절삭력의 주파수 성분들은 절삭조건 (i)에서 24(Hz), 절삭조건 (ii)에서 35.7(Hz), 절삭조건 (iii)에서 49.3(Hz)에서 큰 피크(dominant peak)가 나타남을 볼 수 있다. 이들 세 주파수들은 커터 회전으로 인한 인서트 절삭주파수이며, 이 주파수들을 기준으로 해서 왼쪽부분의 저주파수 성분은 스

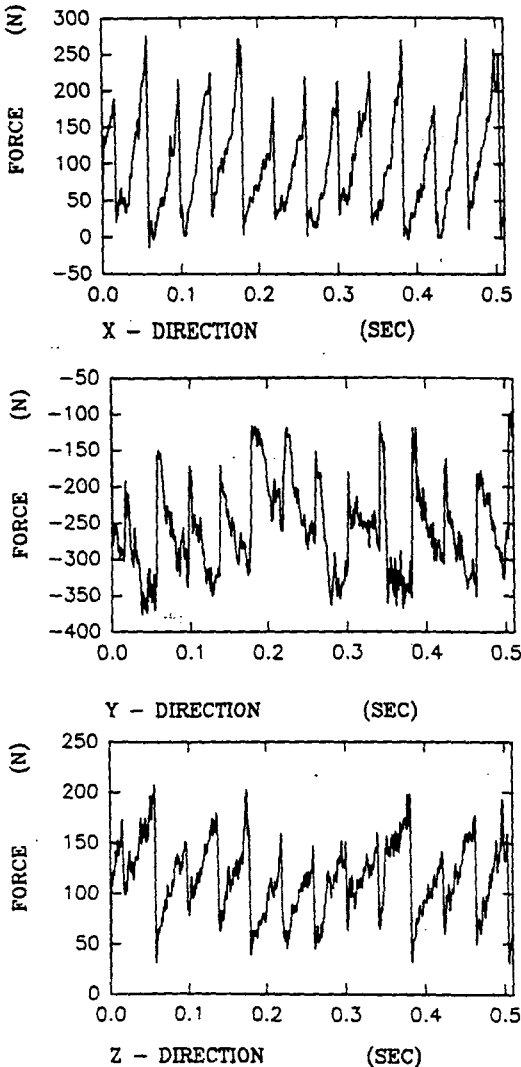


Fig. 11 Measured cutting force in time domain. rpm : 180, depth of cut : 1(mm) feed per tooth : 0.0424(mm)

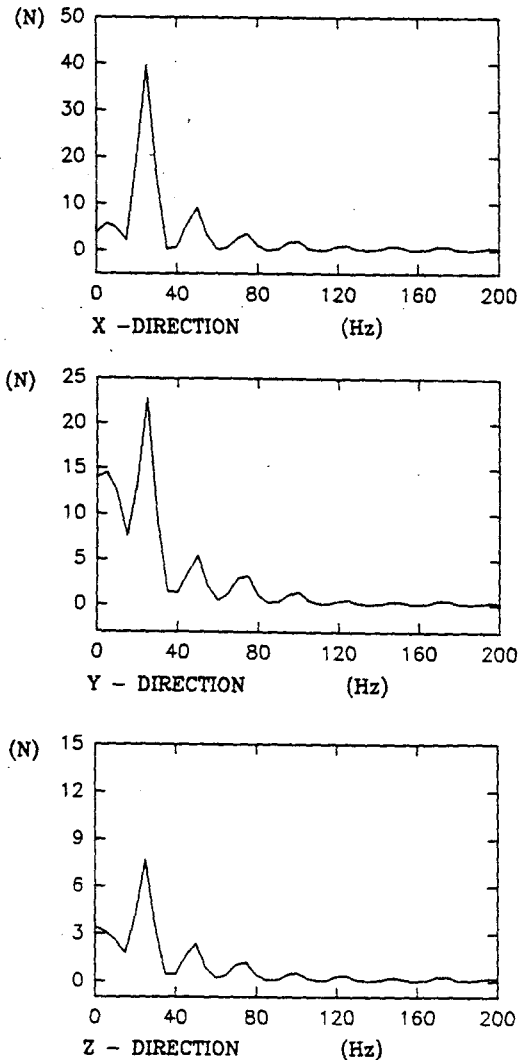


Fig. 12 Measured cutting force in frequency domain. rpm : 180, depth of cut : 1(mm) feed per tooth : 0.0424(mm)

핀들의 회전주파수와 같으며, 축방향 및 반경방향의 위치오차 등에 의해서 발생하는 절삭력 성분이며, 피크주파수의 우측부분의 피크성분들은 인서트의 절삭주파수의 주기적인 반복에 의하여 나타나는 주파수 성분들로 생각된다. Fig. 9와 Fig. 10에서 피드방향(Y-방향)의 인서트 절삭주파수의 크기(magnitude)는 최적화 공구쪽이 크게 줄어들었고, X-방향은 비슷함을 보였으며, Z-방향은 상대적으로 최적화 공구쪽이 증가함을 보였다. 이것은 공구각의 변화에 의해서 세방향 절삭력 성분들의 차이를 감소시킴으로써 절삭력의 변동폭이 감소된 원인으로 생각된다.

Figs. 11, 12는 절삭조건(i)에서 각각 시간영역

과 주파수영역의 재래식 커터로 절삭한 절삭력을 나타내었다. Fig. 13은 중(重)절삭조건에서 새로 제작된 최적커터로 실험한 절삭력이고, Fig. 14는 경(輕)절삭조건에서 새로 제작된 최적커터로 실험한 절삭력이다. Figs. 15, 16은 중(重)절삭과 경(輕)절삭에서 최적커터로 실험한 주파수영역의 절삭력이다. 시간영역과 주파수영역에서 측정된 절삭력들은 시뮬레이션에 의한 절삭력들과 비교적 잘 일치하였다.

Table 6은 각각 절삭조건에서 최적커터들의 형상과 재래식 커터들로 측정된 절삭력 및 시뮬레이션 절삭력을 각방향의 평균 절삭력, Y-방향 절삭력의 최대 감소량, Y-방향의 인서트주파수의 크기

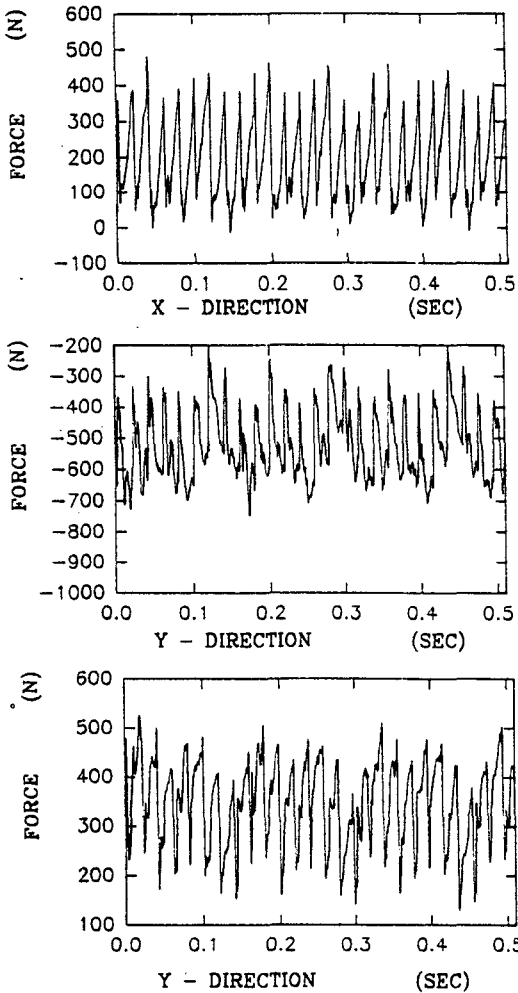


Fig. 13. Measured cutting forces resulted from optimal cutter in time domain heavy cutting.

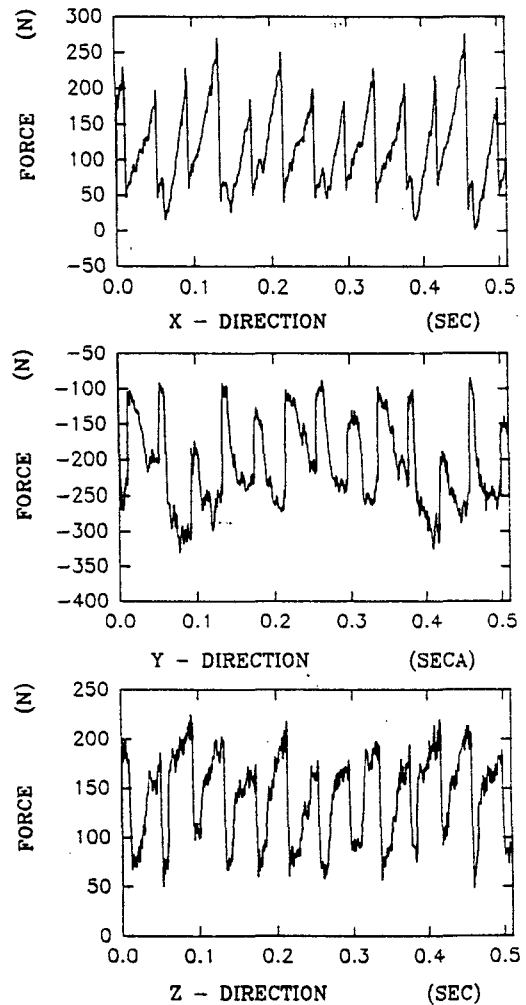


Fig. 14. Measured cutting forces resulted from optimal cutter in time domain, (light cutting).

및 합력을 비교한 것이다.

최적커터의 합력이 줄어드는 이유를 규명하기 위하여 칩폭의 길이를 측정하여, 3차원 절삭이론⁽¹³⁾에 적용하여 절삭력의 대소에 영향이 큰 유효경사각(effective rake angle) 및 유효 전단각(effective shearing angle)의 크기를 계산하여 Table 7에 나타내었다. 경(輕)절삭조건에서 재래식 커터의 유효 경사각 및 유효 전단각은 각각 4.9° 및 47.4°이고, 최적화 공구는 각각 15.9° 및 54.5°이다. 중(重)절삭조건에서 재래식 커터의 유효 경사각 및 유효 전단각은 각각 5.8° 및 46.7°이고, 최적화 공구는 각각 12.7° 및 48.6°이다. 유효 경사각과 유효 전단각이 증가하면 절삭저항이 감소 된다는 것은 주지

의 사실이다.

- γ_c : 절삭비(cutting ratio)
- η_c : 칩의 유동각(chip flow angle)
- α_e : 유효 경사각(effective rake angle)
- ϕ_n : 수직 전단각(normal shearing angle)
- η_s : 전단 유동각(shear flow angle)
- ϕ_e : 유효 전단각(effective shearing angle)

▶ 측방향 경사각, 반경방향 경사각, 리드각을 변수로 하고 절삭력의 합력을 최소로 하는 최적커터는 3방향(X, Y, Z) 중 절삭력이 가장 큰 피드 방향(Y-방향)의 변동절삭력을 감소시켜 합력을 감소시키며, 재래식 커터에 비해 유효 경사각과 유효 전

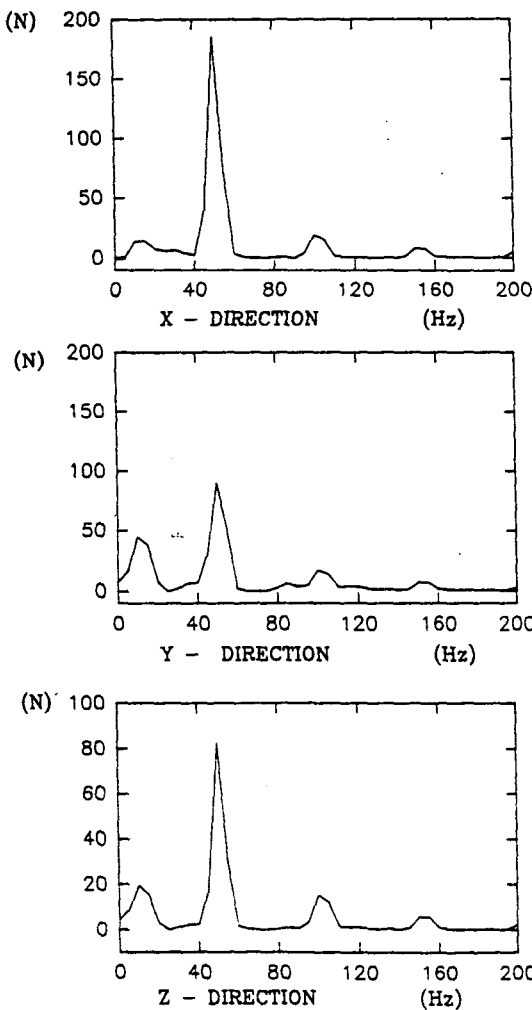


Fig. 15 Measured cutting forces resulted from optimal cutter in frequency domain (heavy cutting)

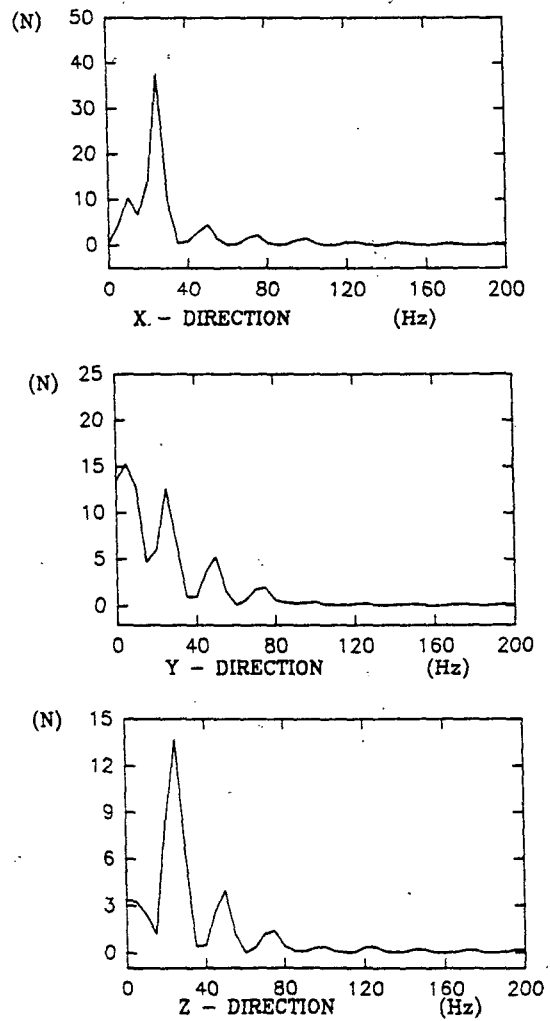


Fig. 16 Measured cutting forces resulted from optimal cutter in frequency domain (light cutting)

Table 6 The comparison of optimal and conventional tools

Cutters	Tool angle			X-dir. mean (N)	Y-dir. mean (N)	Z-dir. mean (N)	Decrease of peak (N)	Mag. of in- sert freq. (Y)	Resultant
	γ_R	γ_A	γ_L						
A	0	7	15	98.99	-257.45	114.09	max 80.9	22.26	302.45
SOA	-9	15	45	118.00	-207.51	140.95		11.85	277.22
OA	-9	15	45	115.42	-206.55	141.93		12.62	280.31
B	0	7	15	119.11	-397.33	127.26	max 127.2	64.78	439.55
OB	-5	15	45	155.57	-324.11	187.37		34.42	410.19
C	0	7	15	125.66	-659.25	216.59	max 217.6	180.01	712.92
SOC	-4	15	45	197.52	-526.56	347.81		98.09	667.42
OC	-4	15	45	195.46	-520.39	347.50		90.16	662.84

A : Conventional cutter, SOA : Simulation optimal cutter, OA : Optimal cutter, B : Conventional cutter
OB : Simulation optimal cutter, C : Conventional cutter, SOC : Simulation optimal, OS : Optimal cutter

Table 7 The magnitude of angles in cutting section

	γ_c	γ_c°	α_e°	ϕ_n°	γ_s°	ϕ_e°
Conventional cutter(light cutting)	0.7	45.6	4.9	37.2	31.9	47.2
Optimal cutter(light cutting)	0.6	55.3	15.9	34.5	34.7	54.5
Conventional cutter(heavy cutting)	0.8	34.0	5.8	41.3	24.2	46.7
Optimal cutter(heavy cutting)	0.6	49.7	12.7	34.5	32.0	48.6

단각이 크기 때문에 합력이 감소된 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

정면밀링작업에서 절삭력 모델로부터 발생하는 절삭력의 합력을 최소화시키는 최적설계 모델을 개발하고, 절삭조건에 따른 커터를 최적설계하여 제작하였다. 최적설계에 의해 제작된 커터와 재래식 커터를 사용하여 절삭실험을 수행하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 절삭력의 합력을 목적함수로 취하고 커터각을 변수로 하여 절삭력의 합력을 최소화시키는 최적설계 모델이 개발되고 이의 유용성을 실험을 통해 입증하였다.

(2) 최적커터에 의한 절삭력을 시간영역에서 비교한 결과 피드방향의 절삭력이 재래식 커터에 비해 크게 줄어들었고, 절삭력의 변동(fluctuation)

라도 줄어들었다. 주파수영역에서도 피드방향의 인서트 절삭 주파수 성분의 크기(magnitude)가 현저하게 줄어든 것을 알 수 있었다.

(3) 절삭력의 합력이 감소된 원인은 최적커터의 형상이 유효 경사각 및 유효 전단각을 증가시킨데 기인된 것으로 생각된다.

(4) 절삭력변동을 감소시킴으로써 기계의 진동을 줄일 수 있게 되어 안정된 절삭작업이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Doolan Partik, Burney, F. A. and Wu, S. M., 1975, "Computer Design of a Multipurpose Minimum Vibration Face Milling Cutter," *MTDR*, Vol. 16, pp.187~192.
- (2) Doolan P., Phadke M. S. and Wu S. M., 1975, "Computer Design of a Vibration Free Face

- Milling Cutter." *ASME, J. of Engr. for Ind.*, pp. 925-930.
- (3) Jha, N. K. and Cheung Hsiao-Hong, "Computer Aided Optimal Design and Finite Element Analysis of Plain Milling Cutter," Department of Mechanical Engineering Manhattan College Riverdale, New York
- (4) Kim, J. S., Cho, D. W. and Lee, J. M., 1990, "Optimal Design of Face Milling Cutter Geometry" *CIRP*, Vol. 39, pp.391~394.
- (5) Kim, H. S., and Ehman, K. F., "A Cutting Force Model For Face Milling Operations." *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 5, pp. 651~673.
- (6) 김희술, 이상석, 이병철, 1992, "정면 밀링 작업에서 동결삭력의 해석." 대한기계학회논문집, 제16권, 제12호, pp.2268~2278.
- (7) Martelloti, M. E., 1941, "An Analysis of The Milling Process." *Trans, ASME*, Vol. 63, pp. 667~700.
- (8) Fu, H. J, DeVor, R. E. and Kapoor, S. G. 1984. "A Mechanistic Model for Prediction of The Force System in Face Milling Operation" *ASME* Vol. 106, pp.81~99.
- (9) Gygax, P. E.. 1980, "Experimental Full Cut Milling Dynamics," *CIRP*, Vol. 29, pp.61~66.
- (10) Ruzhong, Z. and Wang, K. K., 1983, "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling," *CIRP*, Vol. 321, pp.21~26.
- (11) Jasbir S., Arora, 1989, "Introduction To Optimum Design" pp.404~417.
- (12) Milling System Manual, 1987, "GTE Valenite Corporation."
- (13) Shaw, M. C., 1984, "Metal Cutting Principles," Clarendon Press, pp.428~434.
- (14) 이우영, 신호철, 1987, "이단홈형 칩브레이커의 메카니즘," 대한기계학회논문집, 제11권, 제6호, p.1005.
- (15) Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Vol. Wick, Drozda.