

## 시뮬레이션에 의한 正面밀링용 工具의 最適設計

김정현\*, 이병철\*\*, 김희술\*\*

### Optimal Design for Face Milling Cutter by Simulation

Jung-Hyun Kim\*, Byung-Chul Lee\*\*, Hee-Sool Kim\*\*

#### ABSTRACT

Based on the cutting force model, three-dimensional optimal design model was developed and optimal designed tool which is minimized cutting force is developed by computer simulation technique. In this model the objective function which is minimized resultant cutting force was used and the variables are radial rake angle, axial rake angle, lead angle of the tool. The cutting forces using conventional and optimal tools by simulation, are compared and analyzed in time and frequency domains. In time domain the cutting force of optimal tool in feed direction was more reduced and less fluctuated than that of conventional tool. Cutting forces of optimal tool in X-and Z-directions are shown a little increased than those of conventional tool. In frequency domain amplitude of insert frequency components of optimal tool in feed direction was more reduced than that of conventional tool. The amplitudes of insert frequency components of optimal tool in X-and Z-direction are a little increased than those of conventional tool. As the reduction of amplitude and fluctuations of the cutting force, Optimal tool is considered that tool life and surface roughness would be improved, and stable cutting would be expected.

**Key Words :** Optimal design(최적설계), Face milling cutter(수직밀링커터), Cutting force model(절삭력 모델), Objective function(목적함수)

#### 1. 서 론

밀링은 회전공구를 사용하여 금속을 제거하는 효율적인 기계가공 방법으로, 특히 수직밀링은 능률적인 절삭의 잇점 때문에 널리 사용되는 금속절삭 가공방법중의 하나이다.

그러나 밀링커터는 단속절삭 공구로서 절삭날의 단속

절삭작용에 의한 변동절삭력과, 여러날의 동시가공에 의한 절삭력의 교란때문에 가공능률, 가공정밀도, 기계와 공구의 수명향상에 문제가 되어 왔다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기계설계자들은 절삭력의 교란에 의하여 일어나는 진동을 줄이기 위하여 기계구조의 강성을 증가시켰으나 이것은 비용이 많이 들게 되므로 공구 형상을 개선하여 안정된 절삭을 시도하였다.

\* 영남대·원

\*\* 영남대학교 기계공학과(정희원)

1975년 S. M. Wu<sup>(1, 2)</sup>는 수직밀링에서 컴퓨터를 이용하여 기계의 진동을 목적함수(Objective function)로 하여 최소진동형 커터의 형상을 설계하였고, 최근에는 N. K. Jha<sup>(3)</sup>가 수평밀링에서 커터설계의 최소비용을 목적함수로 하여 커터의 형상을 설계하였다.

J. S. Kim<sup>(4)</sup>등의 연구자들은 공구각을 변수로 하고 최소진동을 목적함수로 한 최적공구를 설계하였다.

대부분의 연구자들은<sup>(1, 2, 3, 4)</sup> 절삭력에 의하여 발생하는 진동을 최소화하여 인서트 간격, 경사각, 커터크기 등을 고려하였으나 리이드(Lead)각은 고려하지 않았고, 최소진동을 목적함수로 한 논문에서는<sup>(1, 2, 4)</sup> 최소진동을 위한 공구 형상이 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 하는 것은 보다 다양한 공작기계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 논문에서는 절삭력 모델을 개발하여 변위 발생의 원인인 절삭력변동을 최소로 하는 커터를 개발하고자 한다. Martelloti, Fu, Gygax, Ruzhong<sup>(6, 7, 8, 9)</sup> 등이 제안한 기본 절삭력 모델에서는 절삭력 모델의 계수들을 결정하기 위해서 별도의 2차원 절삭실험의 번거로움이 있고 축방향의 절삭력 계수를 생략하였기 때문에 공구의 마모가 있거나 난삭재의 가공중의 중절삭 조건에서 예측절삭력의 정밀도가 떨어진다. 본 연구에서는 3차원 절삭력 계수를 사용하고 인서트의 초기 위치오차, 스펀들의 편심 등의 실제 절삭조건들을 고려 하였기 때문에 예측절삭력의 정밀도를 크게 향상 시킬 수 있다<sup>(5)</sup>. 그러므로 절삭력 모델<sup>(5)</sup>과 최적화기법을 결합하여 3방향(X, Y, Z)의 합력을 목적함수로 취하고 공구의 반경방향 경사각(Radial rake angle), 축방향 경사각(Axial rake angle), 리이드각(Lead angle)을 변수(Variable)로 한 커터형상을 3차원으로 최적설계하여 절삭력 변동을 줄임으로써 가공정밀도를 향상시키고, 생산능을 향상 및 절삭중 공작기계의 안정화에 기여하고자 한다.

## 2. 이론적 해석

### 2.1 절삭력 모델(Model)

#### 1) 기본 절삭력

실험에 의하여 결정된 계수를 이용하여 절삭력 모델

을 유도하기 위하여 Martelloti<sup>(6)</sup>, 및 Ruzhong<sup>(9)</sup>등의 기본 가정을 따랐으며 이들을 요약하면

- (가) "한 인서트의 날끝이 그리는 궤적은 커터의 중심에서 그린 원과 같다."
- (나) "한 순간에서의 절삭력은 그 순간에서 절삭작용을 하는 모든 인서트들의 합력과 같다."

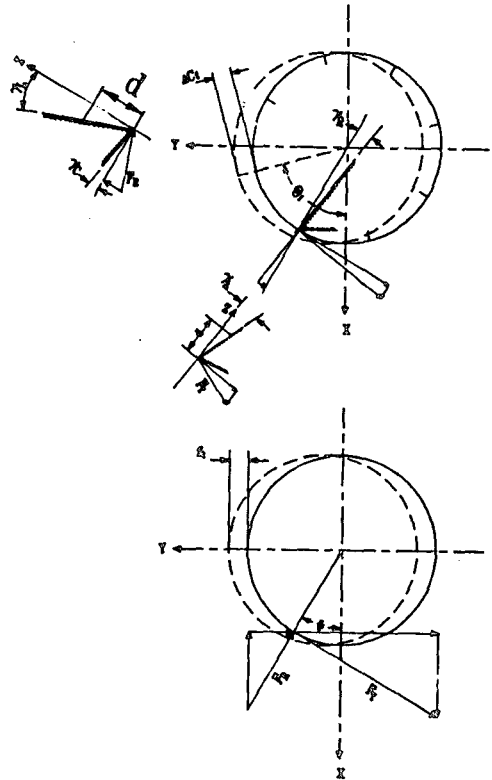


Fig.1 Force components according to cutter geometry and cutting geometry

Fig.1에서 커터의 회전각이  $\Phi$ 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.

$$\begin{aligned}
 C(\theta_i(\Phi)) &= f_t \sin(\theta_i(\Phi)) \\
 D(\theta_i(\Phi)) &= d \\
 A(\theta_i(\Phi)) &= C(\theta_i(\Phi))D(\theta_i(\Phi))
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Fu, Gygax, Kline, Ruzhong등에 의하면 한 인서트에 의해 발생된 칩 단면에 작용하는 접선 방향의 힘 (Tangential force)  $F_T(i, \Phi)$  는 칩 단면적  $A(\theta_i(\Phi))$  와 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)  $F_A(i, \Phi)$  는 칩단면적  $A(\theta_i(\Phi))$  와 축방향 절삭력 계수  $K_A$ '의 곱으로 나타내고  $K_A = K_A'/k_T$ 라 하면 (2)식과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_T(i, \Phi) &= K_T A(\theta_i(\Phi)) \\ F_R(i, \Phi) &= K_R' A(\theta_i(\Phi)) = K_R F_T(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) &= K_A' A(\theta_i(\Phi)) = K_A F_T(i, \Phi) \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 1에서 한 인서트에 작용되는 각 축 방향의 힘의 성분을 각각  $F_x(i, \Phi)$ ,  $F_y(i, \Phi)$  및  $F_z(i, \Phi)$ 라 할 때 식(2)에 표시할 수 있으며, X-, Y- 및 Z-방향의 순간 절삭력 성분은 커터회전각이  $\Phi$ 일때 동시에 절삭 작용을 하는 인서트들의 각 성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_x(i, \Phi) \\ F_y(i, \Phi) \\ F_z(i, \Phi) \end{Bmatrix} &= \sum_{i=1}^{Z_c} \begin{bmatrix} \sin(\theta_i(\Phi)) & -\cos(\theta_i(\Phi)) & 0 \\ \cos(\theta_i(\Phi)) & \sin(\theta_i(\Phi)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

$Z_c$ : 동시에 절삭작용을 하는 인서트의 수

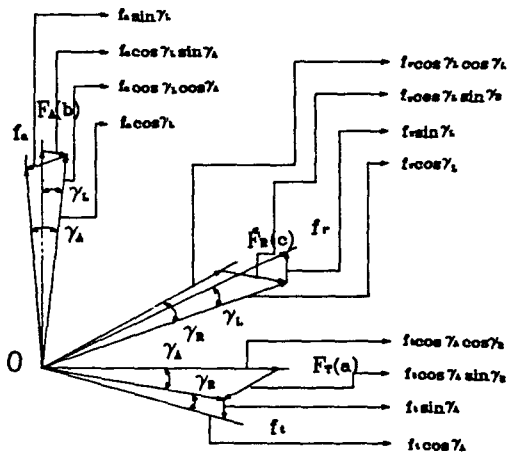


Fig. 2 Force component according to cutter geometries in the  $F_A, F_R, F_T$  coordinate system.

공구각의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 2와 같이 커터에 인서트를 삽입하였을 때  $i$ 번째 인서트의 끝점을 원점 (0점)으로 하고 커터의 반경 방향을  $c$ , 커터의 접선 방향을  $a$ , 수직방향을  $b$ 로 하는 좌표계에서  $a, b$  및  $c$ 방향의 힘의 성분을 각각  $F_T, F_R$  및  $F_A$ 라 하고, 공구각( $\gamma_A, \gamma_R, \gamma_L$ )의 영향에 따른 힘의 성분을 합성하면 식(4)와 같다.

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

2) 칩 단면적의 변화

i) 공구각( $\gamma_A, \gamma_R$ )에 의한 칩단면적의 변화를  $a(\theta_i(\Phi))$ 라 하면

$$a(\theta_i(\Phi)) = C(\theta_i(\Phi)) \cdot d / \cos \gamma_A \cdot \cos \gamma_R \quad (5)$$

ii) 스핀들 편심에 의한 절삭 칩단면적 변화

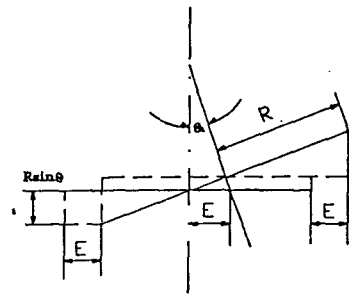


Fig. 3 Spindle eccentricity

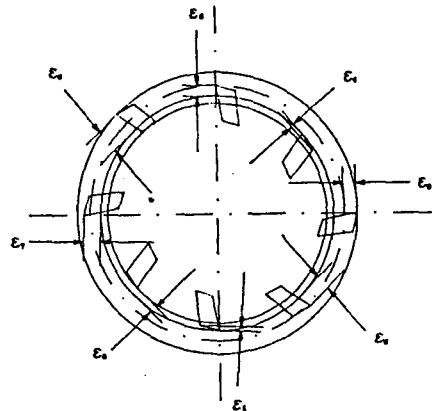


Fig. 4 Insert initial position error

Fig.3은 반경 R인 정면 커터가 절삭저항, 주축베어링의 유격 등에 의해서 스핀들 축이  $\theta_i$ 만큼 경사가 발생한 경우 커터는 절삭면에서 E 만큼의 변위가 발생한 것을 도시하였다.

$$C_1(\theta_i(\Phi)) = E \sin(\theta_i(\Phi))$$

$$D_1(\theta_i(\Phi)) = R \sin\theta_t \sin(\theta_i(\Phi)) \quad (6)$$

iii) 인서트 초기 위치오차에 의한 칩단면적 변화

a) 반경방향의 위치오차

$$C_2(\theta_i(\Phi)) = [\epsilon_r(i) - \epsilon_r(i-1)] \sin\theta_i(\Phi) \quad (7)$$

b) 축방향의 위치오차

$$D_2(\theta_i(\Phi)) = [\epsilon_a(i) - \epsilon_a(i-1)] \quad (8)$$

ii), iii) 를 함께 고려하면 칩두께와 절삭깊이는 식(9)과 같다.

$$c(\theta_i(\Phi)) = f_t \sin(\theta_i(\Phi)) + E \sin(\theta_i(\Phi)) + [\epsilon_a(i) - \epsilon_a(i-1)] \sin(\theta_i(\Phi))$$

$$d(\theta_i(\Phi)) = d + R \sin\theta_t \cdot \sin(\theta_i(\Phi)) + [\epsilon_a(i) - \epsilon_a(i-1)] \quad (9)$$

식(5)에 식(9)을 대입하여 (4)식을 정리하면 (10)식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{Bmatrix} = K_T d A(\theta_i(\Phi)) \begin{Bmatrix} \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \\ \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 \\ \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

메트릭스내의 계수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 1, & \alpha_2 &= \cos\gamma_A \tan\gamma / \cos\gamma_A, \\ \alpha_3 &= \cos\gamma_L \tan\gamma_A / \cos\gamma_R, \\ \beta_1 &= -\tan\gamma_A, & \beta_2 &= \cos\gamma_L / \cos\gamma_A, \\ \beta_3 &= -\sin\gamma_L / \cos\gamma_A \cos\gamma_R, \\ \gamma_1 &= -\tan\gamma_A / \cos\gamma_R, & & \\ \gamma_2 &= \sin\gamma_L / \cos\gamma_A \cos\gamma_R, & & \\ \gamma_3 &= \cos\gamma_L / \cos\gamma_R & & \end{aligned} \quad (11)$$

(3), (4)식으로 부터 (12)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_x(\Phi) \\ F_y(\Phi) \\ F_z(\Phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^N \begin{Bmatrix} \sin\theta_i(\Phi) & -\cos\theta_i(\Phi) & 0 \\ \cos\theta_i(\Phi) & \sin\theta_i(\Phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

(10), (12)식으로 부터 밀링작업에서 발생하는 스핀들의 동적인 변화성분 및 인서트를 커터에 설치할 때 발

생되는 오차 및 절삭조건을 고려한 절삭력을 예측할 수 있다.

## 2-2. 최적화 기법(목적함수)

수직밀링에서 양호한 절삭과정 수행은 최소절삭력에 의하여 보통 완성되어지며, 많은 연구자들은 절삭력의 교란에 의하여 일어나는 진동을 줄이기 위한 효과적인 접근법으로 인서트의 간격을 최적설계하는 방법에 대해 연구하였다. [1, 2]

절삭력교란 문제를 해결하기 위한 또 다른 유용한 접근은 각 인서트의 형상을 변화시키는 것이다.[4].

본 논문에서는 앞에서 제시한 절삭력 예측모델에서 X방향의 절삭력, Y방향의 절삭력, Z방향의 절삭력의 합력을 목적함수(Objective function)로 취하여 최적화 기법인 S. Q. P(Sequential quadratic programming)

[10]와 결합 하였다. 이때에 X, Y, Z방향의 절삭력 성분들을 0.0005초의 간격으로 1024개를 연속적으로 계산 하였다.

반경방향 경사각(Radial rake angle)과 축방향 경사각(Axial rake angle) 및 리이드각(Lead angle)을 변수(Variable)로 하였다.

제한조건(Constraint condition)은 상업적으로 유용한 밀링커터에 추천된 한계값[11] 및 국내외에서 제작되고 있는 커터의 각을 고려하여 네가티브 경사각(Negative rake angle)까지 고려 하였다. (12)식에서 3축방향의 절삭력을 고려하여 최적화의 표준형태로 나열하면 (13)식과 같다.

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

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

$$\text{S. T. } \begin{aligned} g_1(x) &= -12 - x_1 \leq 0 \\ g_2(x) &= x_1 - 15 \leq 0 \\ g_3(x) &= -12 - x_2 \leq 0 \\ g_4(x) &= x_2 - 15 \leq 0 \\ g_5(x) &= 0 - x_3 \leq 0 \\ g_6(x) &= x_3 - 45 \leq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

N : 데이터의 수

(13)식에서 x는 설계변수로서  $x_1, x_2, x_3$ 는 각각 반경 방향 경사각과 축 방향 경사각 및 리이드 각을 나타내고 Q는 최소화시키고자 하는 목적함수이며,  $g_1(x) - g_6(x)$ 는 각각 설계변수에 대한 제한조건들이다.

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 steel	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 negative (0-15)	5 - 30

Fig. 5는 최적화 과정의 흐름도(Flow-chart)로서 최적화 모델과 절삭력 모델로서 구성되었다. 최적화 모델은 목적함수와 제한조건함수 그리고 그들의 1차도함수로 구성된다. 최적화 모델에서는 입력데이터로 변수값, 제한조건 등이 초기치로 입력되고, 절삭력 모델에서는 절삭조건 및 주축의 편심량, 각인서트들의 초기위치오차 등이 입력되어 3축 방향의 절삭력 성분들이 계산되어 목적함수를 구성하여 최적화 모델로 옮겨져서 제한 조건을 만족하는 공구형상을 결정한다.

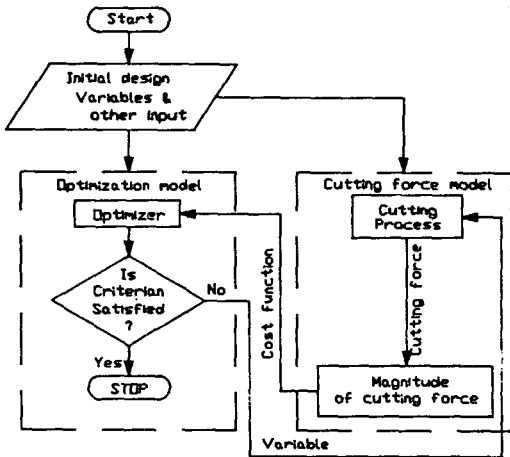


Fig. 5 Flow-chart of optimization

### 3. 실험장치 및 실험조건

Fig. 6은 절삭실험장치의 개략도이다. 수직밀링머신에 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계를 테이블 위에 고정시켜서 table. 2와 같은 조건으로 절삭실험을 행한다. 절삭 실험중 발생하는 데이터는 오실로스코프(Oscilloscope)를 통해 모니터링(Monitoring)함과 동시에 A/D Converter를 통해 마이크로 컴퓨터에 저장한다.

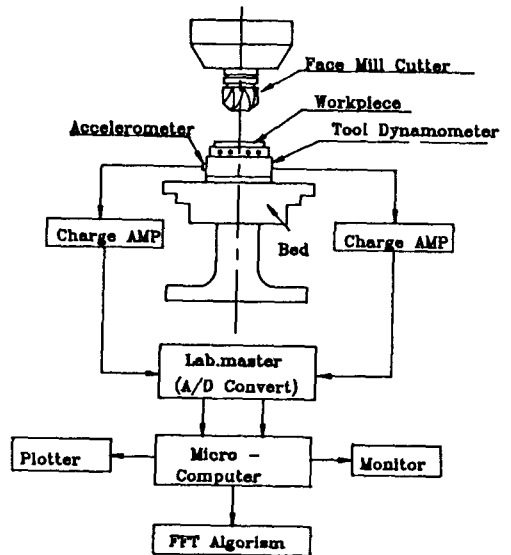


Fig. 6 Schematic diagram for experimental set-up

Table 2 Experimental conditions

Spindle rotational 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)
Diameter of Cutter	100(mm)
Number of insert	8
Sampling time	0.0005(sec)
Number of data	1024

절삭 조건은 Metal hand book의 추천값과 본 실험에 사용된 밀링머신의 용량을 고려하여 경(輕)절삭, 중(中)절삭, 중(重)절삭 3조건으로 선정하여 table. 4와 같고, 실험에 사용된 기계 및 공작물, 계측기의 제원은 Table 3과 같다.

Table 3 Specification of experimental set-up

Milling machine	회전기계 Vertical type WMV-1100 (1100×280mm)
Tool Dynamometer	KISTLER (type 9257 A)
A/D Converter	Lab. MASTER conversion rate : 30KHz resolution : 12bit input range : ±10V
Computer	IBM PC/AT : 64bit
Charge Amplifier	KISTLER (type 5008EDPM-2300)
Filter	KISTLER
Workpiece	SM45C

Table 4 Cutting conditions

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

#### 4. 실험결과 및 고찰

Table 2와 같은 실험조건에서 Table 3에 나타나 있는 실험장치로 절삭시험에 의해서 얻은 절삭력은 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8은 식(12)의 절삭력 모델로부터 예측한 절삭력이고 Fig. 9는 최적화 한 공구의 절삭력을 나타낸다. Fig. 10-12는 절삭력을 200(Hz)까지 필터링(Filtering)한 후 시간영역의 절삭력을 FFT(Fast fourier transform)을 이용하여 주파수 영역으로 나타낸 것이다.

Fig. 7의 측정 절삭력과 Fig. 8의 시뮬레이션 절삭력이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있고, Fig. 10과 Fig. 11에서 주파수 영역에서도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었다.

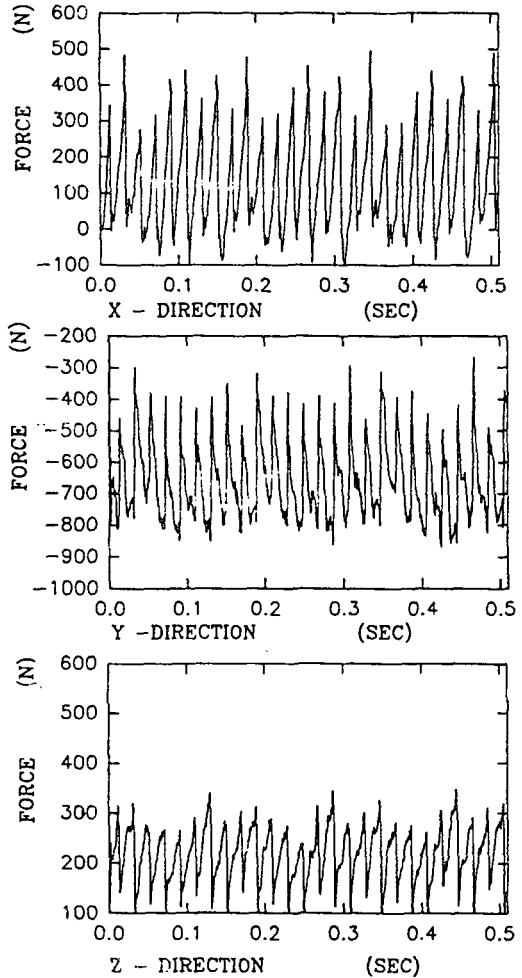


Fig.7 Measured cutting force in time domain  
rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm)  
feed per tooth : 0.0429(mm)

Table 4와 같이 절삭조건(i)에서 절삭력의 합력을 최소로 하는 공구각은 반경방향 경사각이 -9도, 축방향 경사각이 15도, 리이드각이 45도로 결정되었고, 절삭조건(ii)에서는 -5도, 15도, 45도로 결정되었으며, 절삭조건(iii)에서 -4, 15도, 45도로 결정되었다. 이 최적화 공구들과 반경방향 경사각이 0도, 축방향 경사각이 7도, 리이드각이 15도인 재래식 공구와의 각방향의 평균절삭력, Y-방향의 인서트주파수의 크기, 합력을 비교한 것이 Table 5이다.

Table 5 The comparison of optimal and conventional tools

공구 종류	공구각 R, A, L	x-방향 mean (N)	Y-방향 mean (N)	Z-방향 mean (N)	인서트 주파수 크기(Y)	합 力
		A	0, 7, 15	98.99		
OA	-9, 15, 45	118.00	-207.51	140.95	11.85	277.22
B	0, 7, 15	119.11	-397.33	127.26	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	180.01	712.91
OB	-4, 15, 45	197.52	-526.56	347.81	98.09	667.42

A : 재래식공구 (i), OA : 최적화 공구 (i)  
 B : 재래식공구 (ii), OB : 최적화 공구 (ii)  
 C : 재래식공구 (iii), OC : 최적화 공구 (iii)  
 R : 반경방향경사각, A : 축방향경사각, L : 리이드각

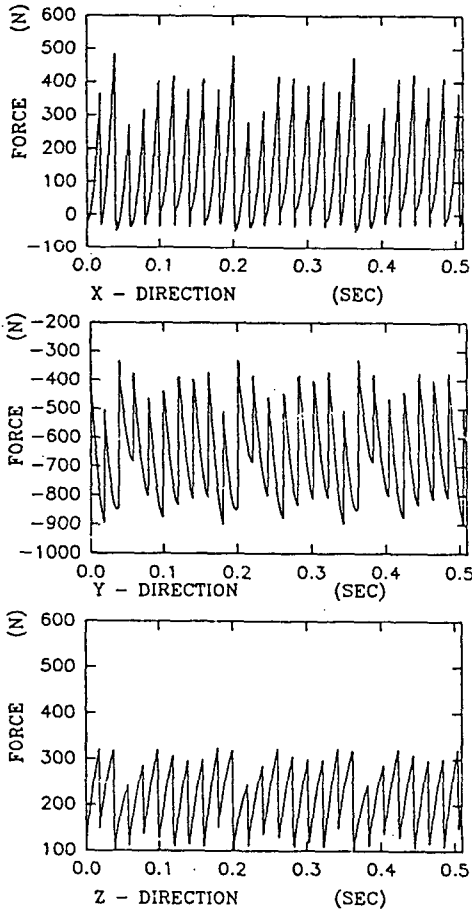


Fig. 8 Simulated cutting force in time domain  
 rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm)  
 feed per tooth : 0.0429(mm)

절삭조건 (i), (ii), (iii)에서 피드방향의 절삭력이 크게 감소됨을 알 수 있었고, X-방향과 Z-방향의 절삭력은 다소 증가하는 경향으로 나타났다. 실험조건 (i), (ii), (iii)에서 합력은 각각 25.23(N), 29.72(N), 45.49(N)이 감소함을 알 수 있다.

절삭력이 크게 감소된 피드방향의 피크가 Fig. 8(Y-방향)에서 (-350)(N)-(-900)(N)사이로 약 550(N) 사이를 오르내리는 것을 볼 수 있고, Fig. 9(Y-방향)에서는 (-300)(N)-(-700)(N) 사이로 약 400(N)으로 절삭력의 변동이 줄어들어 합력이 감소해지는 것을 알 수 있다.

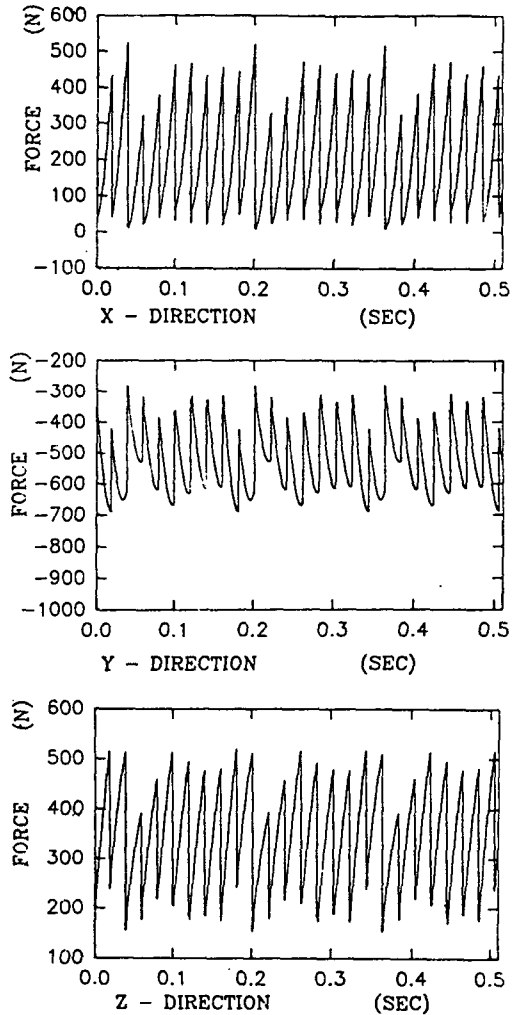


Fig. 9 optimal cutting force in time domain  
 rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm)  
 feed per tooth : 0.0429(mm)

절삭조건 (i)에서 24(Hz), 절삭조건 (ii)에서 35.3(Hz), 절삭조건 (iii)에서 49.3(Hz)에서 큰 피크(dominant peak)가 나타남을 볼 수 있다. 이 주파수는 커터회전에 의한 인서트 절삭 주파수로서 생각되며, 이 주파수를 기준으로 해서 왼쪽부분의 저주파수 성분은 스피들의 회전주파수와 같으며, 축방향 및 반경방향의 위치오차에 의해서 발생하는 절삭성분이며, 우측부분의 피크주파수는 인서트의 절삭주파수의 주기적인 반복에 의하여 나타나는 주파수로 생각된다.

Fig.7과 Fig.8에서 피이드 방향(Y-방향)의 인서트 절삭주파수의 크기(Magnitude)는 최적화 공구쪽이 크게 줄어 들었고, X-방향은 비슷함을 보였으며, Z-방향은 상대적으로 최적화 공구쪽이 증가함을 보였다.

그러나 피이드(Y-방향) 방향의 절삭력의 감소에 비해 Z-방향 절삭력의 증가가 적으므로 전체 합력이 감소됨을 알 수 있다.

절삭조건 (i), (ii)에서 각각 시간영역과 주파수영역의 절삭력들은 절삭조건 (iii)과 같은 경향을 알 수

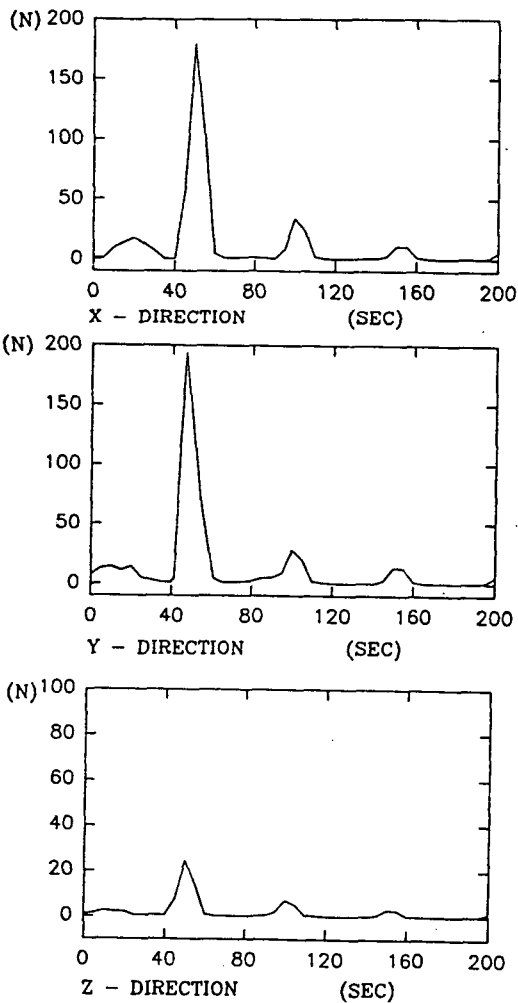


Fig.10 measured cutting force in frequency domain  
rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm)  
feed per tooth : 0.0429(mm)

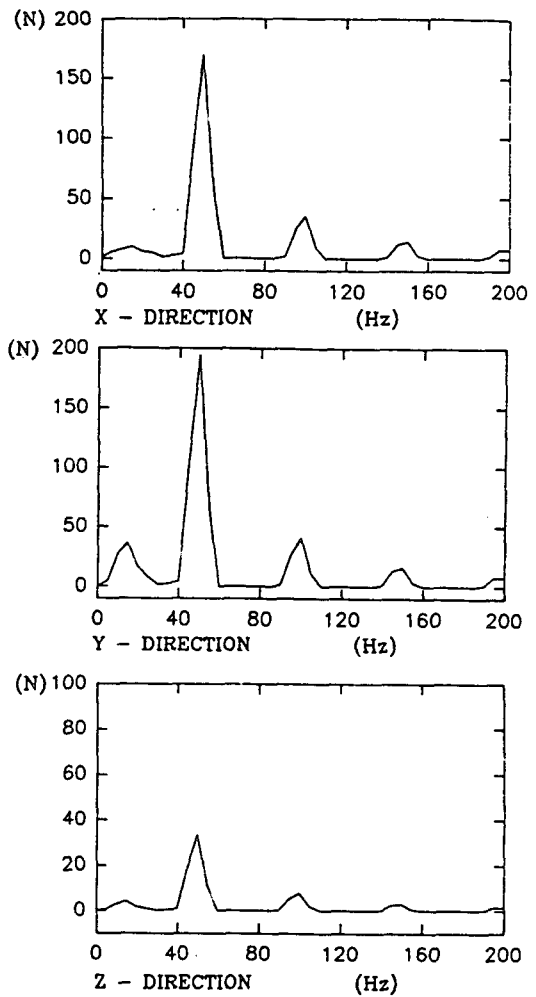


Fig.11 simulated cutting force in frequency domain  
rpm : 370, depth of cut : 2.5(mm)  
feed per tooth : 0.0429(mm)



있었다.

따라서 실측절삭력과 시뮬레이션 절삭력이 비교적 잘 일치함으로 공구를 최적화 시킨 모델이 타당할것으로 생각되며, 3방향(X, Y, Z) 중 절삭력이 가장 큰 피이드방향(Y-방향)의 변동절삭력을 줄일 수 있는 최적화 공구는 재래식공구에 비해 능률적인 절삭성을 가질 것으로 생각된다.

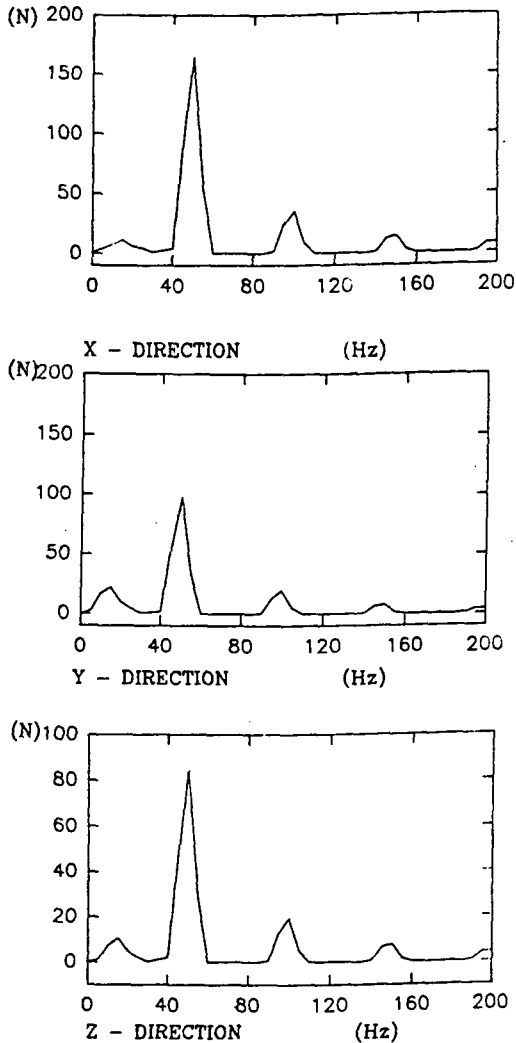


Fig.12 optimal cutting force in frequency domain  
rpm : 370, depth of cut : 2.5 (mm)  
feed per tooth : 0.0429 (mm)

## 5. 결 론

정면밀링머신에서 절삭력 모델로 부터 발생하는 절삭력을 최소화 시키는 시뮬레이션으로 공구를 최적설계하여 얻은 결과를 시간영역과 주파수 영역에서 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭력의 합력을 목적함수로 취하고 공구각을 변수로 하여 목적함수를 최소화시키는 모델이 개발되었다.
2. 최적화 공구에 의한 절삭력을 시간영역에서 비교한 결과 피이드 방향의 절삭력이 재래식 공구에 비해 크게 줄어들었고 절삭력의 변동(Fluctuation)도 줄어들었다. 주파수 영역에서는 인서트 절삭 주파수 성분의 크기(Magnitude)가 줄어든 것을 알 수 있었다.
3. 절삭력변동을 감소시킴으로써 기계의 진동을 줄일 수 있게 되어 기계와 공구 수명이 길어지고 가공물의 표면조도가 향상되며 안정된 절삭작업이 가능할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 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.
2. P. Doolan & M. S. Phadke and S. M. Wu, "Computer Design of a Vibration-Free Face-Milling Cutter", ASME, J. of Engr. for Ind., pp.925~930, 1975.
3. 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.
4. J. S. Kim & D. W. Cho and J. M. Lee, "Optimal Design of Face Milling Cutter Geometry" CIRP, Vol. 39, pp.391~394, 1990.
5. 김 희술, 이 상석, "3축방향의 비절삭계수를 이용한 정면밀링 절삭력 모델개발", 한국절밀공학회지, 제8권, 제1호, pp.116~129, 1991.
6. Martelloti. M. E., "An Analysis of The

- Milling Process." Trans, ASME Vol. 63, pp.667~700, 1941.
7. Fu. H. J & Devoor. R. E. and Kapoor. S. G. "A Mechanistic Model for Prediction of The Force System, in Face Milling Operation" ASME Vol. 106, pp.81~99, 1984.
  8. Gygax P. E., "Experimental Full Cut Milling Dynamics", CIRP, Vol. 29, pp.61~66, 1980.
  9. Ruzhong, Z. and Wang, K. K., "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling", CIRP, Vol. 321, pp.21~26, 1983.
  10. Jasbir S., Arora, "Introduction To Optimum Design", McGraw-Hill Book Company pp.404~417, 1989.
  11. Milling System Manual, GTE Valenite Corporation, 1987.