

# 평균 비절삭저항을 이용한 정면 밀링의 동절삭력 모델 개발

이 병 철,\* 백 대 균,\*\* 김 희 술\*\*\*

## Development of Dynamic Cutting Force Model by Mean Specific Cutting Pressure in Face Milling Process

Byung-Cheol Lee,\* Dae-Kyun Baek,\*\* Hee-Sool Kim\*\*\*

### ABSTRACT

In order to design and improve a new machine tool, there is a need for a better understanding of the dynamic cutting force. In this paper, the computer programs were developed to predict the dynamic cutting force by the mean specific cutting pressure in the face milling process. The simulated cutting forces in X, Y, Z directions resulted from the developed dynamic cutting force model are compared with the measured cutting forces in the time and frequency domains.

The simulated cutting force model have a good agreement with the measured forces in comparison with those resulted from the existing cutting force model.

**Key Words** : Dynamic Cutting Force Model(동절삭력 모델), Mean Specific Cutting Pressure(평균 비절삭저항), Face Milling(정면 밀링)

### NOMENCLATURE

$C$  : 감쇠계수 (N/m)  
 $d$  : 절삭깊이 (mm)  
 $dc$  : 반경방향의 순간 미변형 칩두께의 변화량 (mm)  
 $DF_i(\phi)$  : 커터의 회전각이  $\phi$  일때  $i$ 방향의 동절삭력 (N)  
 $ft$  : 인서트 낱당 이송량 (mm/tooth)

$\gamma_A$  : 인서트의 축방향의 경사각 (degree)  
 $\gamma_R$  : 인서트의 반경방향의 경사각 (degree)  
 $\gamma_L$  : 커터의 리이드 각 (degree)  
 $K$  : 강성계수 (N/m)  
 $K_{MT}$  : 접선방향의 평균 비절삭저항 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $K_{MR}$  : 반경방향의 평균 비절삭계수 (무차원상수) (반경방향 평균절삭력/접선방향 평균절삭력)  
 $K_{MA}$  : 축방향의 평균 비절삭계수 (무차원상수) (축방

\* 연암공업전문대학 금형설계과 (정회원)

\*\* 영남대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 영남대학교 기계공학과 (정회원)

- 향 평균절삭력/접선방향 평균절삭력)
- $M$  : 질량(Kg)
  - $N$  : 커터의 회전수(rpm)
  - $\phi_d$  : 동적 커터의 회전각(degree)
  - $R$  : 커터의 반경(mm)
  - $S_i(\phi)$  : 커터의 회전각이  $\phi$  일 때  $i$ 방향의 순간 미변형 칩두께의 변화량(mm)
  - $S_i(t)$  : 시간  $t$ 에서의  $i$ 방향의 순간 미변형 칩두께의 변화량(mm)
  - $\theta_i(\phi)$  : 커터의 회전각이  $\phi$  일 때  $i$ 번째 인서트의 위치(degree)
  - $T$  : 한 절삭 주기 동안의 시간지연(sec)
  - $U_1$  : 공구의 진동변위(mm)
  - $U_2$  : 공작물의 진동변위(mm)
  - $U_i(t)$  : 시간  $t$ 에서의  $i$ 방향의 미변형 칩두께의 변화량(mm)
  - $V$  : 절삭속도(m/min)
  - $Z$  : 커터에 삽입된 인서트의 수
  - $\xi$  : 감쇠비

### 1. 서론

동절삭력 모델은 절삭과정에서 발생하는 공작기계의 진동에 의한 공구와 공작물간의 상대 변위로 부터 절삭력 변동 성분을 해석하여 절삭력의 동적인 특성을 고려한 모델이다. Das와 Tobias,<sup>(1)</sup> Nigm와 Sadek,<sup>(2)</sup> Tlusty,<sup>(3)</sup> Wu와 Liu<sup>(4,5)</sup> 등에 의한 동절삭력 해석은 한축방향의 미변형 칩두께 변화량은 그 방향의 절삭력에만 변화를 준다는 가정하에서, 동절삭력 성분을 공구와 공작물의 상대 변위로 나타나는 미변형 칩두께 변화량과 실험에 의해서 얻어지는 동절삭계수의 곱으로 표현하고 있다. 그러나 밀링 작업은 커터의 회전각에 따라 절삭위치가 변하므로, 미변형 칩두께 변화량은 절삭 작업에 관여중인 인서트 각각의 절삭위치에서의 X, Y 축방향 칩두께 모듈레이션의 합으로 이루어지며, 또한 이러한 미변형 칩두께 변화량에 의한 절삭력 변화 성분의 방향도 절삭위치에 따라 달라진다. 따라서 X축방향의 칩두께 모듈레이션과 일정한 값을 갖는 동절삭계수의 곱으로 X축방향 동절삭력 성분으로 나타내는 기존의 모델<sup>(2~7,9,10,14)</sup>은 절삭 작업에 관여하는 인서트의 수, 절삭위치(절삭점)의 변화를 고려하지 않기 때문에 실제의 측정 절삭력과는 상당한 오차를 나타낸다.

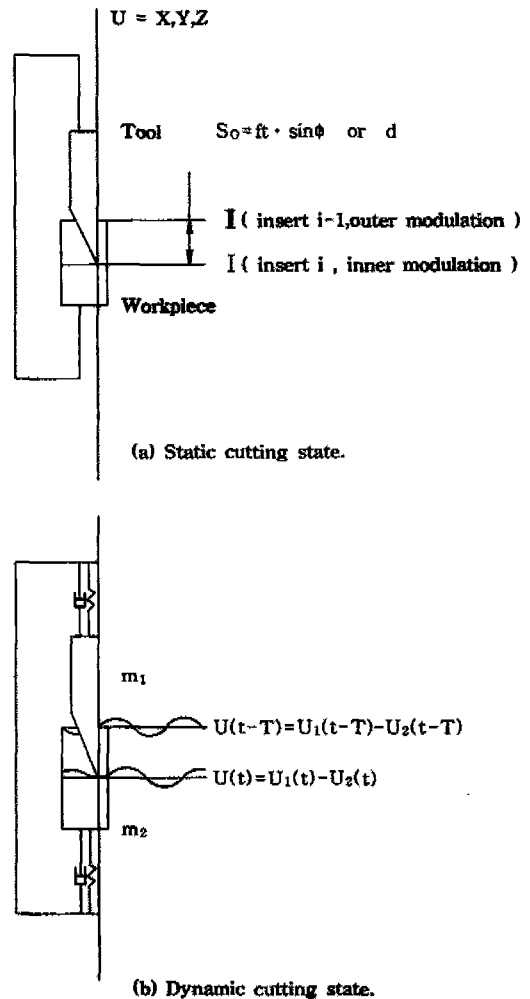


Fig. 1 The undeformed chip thickness variation effect.

본 연구에서는 인서트의 절삭위치 및 절삭작업에 관여하는 인서트의 수에 따른 X, Y, Z축방향 각각의 공구와 공작물의 상대 진동변위(칩두께 모듈레이션)을 동시에 고려하여 미변형 칩단면적을 계산하고, 이러한 미변형 칩단면적에 접선, 반경, 축방향 평균 비절삭저항<sup>(6)</sup>을 적용한 동절삭력 모델을 개발하고자 한다.

## 2. 이론해석

### 2.1 미변형 칩두께 방정식

밀링 가공 중 미변형 칩두께 변화효과는 어떤 순간

공구에 가해진 외란(disturbance)에 의하여 발생된 진동에 의해서 파상(wave)으로 가공된 공작물 표면위를 공구가 다시 지나가면서 가공할 때 일어난다. 즉 Fig. 1(a)와 같이 진동이 없는 경우 *i*번째(현재 절삭중인)인서트는 I로 표현된 직선을 따라서 균일한 두께의 칩을 생성시키고, *i*-1번째(앞선)인서트는 II로 표현된 직선을 따라서 균일한 두께의 칩을 발생시킬 것이다. 그러나 Fig. 1(b)와 같이 외란에 의해 발생된 진동에 의해서 절삭표면은 평면이 아닌 곡면으로 인서트 *i*, *i*-1에 의해 파상으로 가공될 것이며, 이 경우 *i*번째 인서트 끝의 변위는 평형위치로부터 시간 *t*에서의 진동변위 *U*(*t*)로 주어지게 된다. 한 절삭 주기 동안의 시간지연(*T*)을 아래와 같이 나타낼 때

$$T = \frac{60}{Z \cdot N} \quad (1)$$

한 절삭 주기 동안의 시간지연(*T*) 후에는 인서트 *i*의 위치에 인서트 *i*-1이 있게 되며, 이에 따라 인서트 *i*-1 끝의 평형위치로부터의 변위는 시간(*t*-*T*)에서의 진동변위 *U*(*t*-*T*)로 주어지게 된다. 따라서 인서트 *i*와 *i*-1의 연속절삭에 의한 미변형 칩두께의 변화량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_i(t) = U(t) - U(t - T) \quad (2)$$

여기서 *i, U : x, y, z*

인서트 *i*, *i*-1의 진동변위 *U*(*t*) 및 *U*(*t*-*T*)는 시간 *t* 및 *t*-*T*에서의 공구의 진동변위 *U*<sub>1</sub>(*t*), *U*<sub>1</sub>(*t*-*T*) 및 공작물의 진동변위 *U*<sub>2</sub>(*t*), *U*<sub>2</sub>(*t*-*T*)의 상대 진동변위로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U(t) &= U_1(t) - U_2(t) \\ U(t - T) &= U_1(t - T) - U_2(t - T) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 시간 *t*에서의 순간 미변형 칩두께의 변화량 *S*<sub>*i*</sub>(*t*)는 다음과 같이 표시된다.

$$S_i(t) = U_1(t) - U_2(t) - U_1(t - T) + U_2(t - T) \quad (4)$$

### 2.2 시스템 파라미터

수직 밀링머신의 테이블과 스피들 헤드를 완전 강체로 가정하고 공작물과 공구의 운동만을 고려한 정면 밀링 시스템을 3축방향으로 나타내면 Fig. 2와 같은 6 자유도(6 degrees of freedom system)로 표시된다.

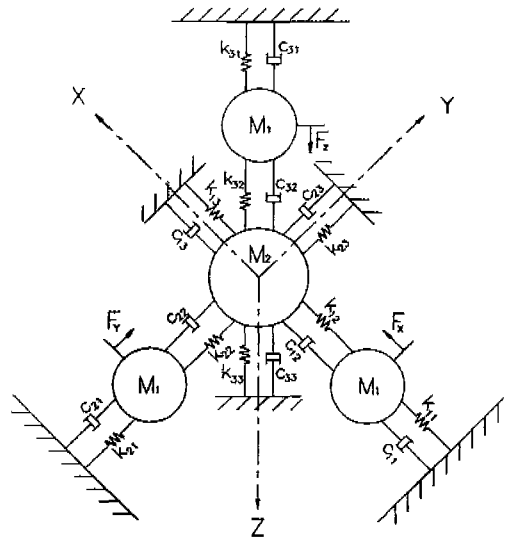


Fig. 2 Vibratory model in the three directional reference system

이 절삭계에서 *K*<sub>*ij*</sub>, *C*<sub>*ij*</sub>은 각 축방향으로 공작물과 테이블의 강성 및 감쇠계수를 나타내고, *K*<sub>*i2*</sub>, *C*<sub>*i2*</sub>은 각각 공작물과 공구간의 강성 및 감쇠계수, *K*<sub>*i3*</sub>, *C*<sub>*i3*</sub>은 각각 공구와 스피들 헤드의 강성 및 감쇠계수를 나타낸다.

여기서 *i*=1, 2, 3이고 *X, Y, Z*축 방향을 나타내는 변수이다. 이들 계수들은 절삭력 실험을 통해서 측정된 절삭력 및 변위 신호를 분석하여 구한 고유진동수 및 감쇠비와 동일한 값을 갖도록 시스템 파라미터들을 결정하며,<sup>(7,8,9)</sup> 이 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = [F] \quad (5)$$

여기서

$$X = \{X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2\}^T$$

$$[F] = \{F_x, 0, F_y, 0, F_z, 0\}^T$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} & -C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_{12} & C_{12} + C_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{21} + C_{22} & -C_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{22} & C_{22} + C_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{31} + C_{32} & -C_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_{32} & C_{32} + C_{33} \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} + K_{12} & -K_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{12} & K_{12} + K_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{21} + K_{22} & -K_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{22} & K_{22} + K_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{31} + K_{32} & -K_{32} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{32} & K_{32} + K_{33} \end{bmatrix}$$

### 2.3 동절삭력 모델

정면 밀링작업에 있어 커터의 회전각이  $\phi$ 일때 (4)식의 순간 미변형 칩두께의 변화량  $S_x(t)$ 는 X, Y, Z축방향 각각의 순간 미변형 칩두께의 변화량  $S_x(\phi)$ ,  $S_y(\phi)$ ,  $S_z(\phi)$ 로 아래와 같이 구체적으로 나타낼 수 있다. 여기서  $X_1(\phi)$  및  $X_2(\phi)$ 는 공구 및 공작물의 안쪽 모듈레이션(inner modulation)을,  $X_1(\phi - \frac{360}{Z})$  및  $X_2(\phi - \frac{360}{Z})$ 은 공구 및 공작물의 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)을 나타낸다.

$$S_x(\phi) = X_1(\phi) - X_2(\phi) - X_1(\phi - \frac{360}{Z}) + X_2(\phi - \frac{360}{Z})$$

$$S_y(\phi) = Y_1(\phi) - Y_2(\phi) - Y_1(\phi - \frac{360}{Z}) + Y_2(\phi - \frac{360}{Z})$$

$$S_z(\phi) = Z_1(\phi) - Z_2(\phi) - Z_1(\phi - \frac{360}{Z}) + Z_2(\phi - \frac{360}{Z}) \quad (6)$$

Fig. 3은 X, Y축방향의 미변형 칩두께의 변화량을 고려한 동절삭 상태의 순간 미변형 칩두께를 도기한 것이다. 커터의 회전각이  $\phi$ 일 때 정절삭 상태의  $i$ 번째(절삭 작업에 관여하는 첫번째)인서트의 끝은 M점에 위치하고 있으나, 동절삭상태에 있어서는 순간 미변형 칩두께의 변화량  $S_x(\phi)$ ,  $S_y(\phi)$ 가 발생하면 인서트의 끝은

N점에 위치하게 되며, 이 때의 커터의 위치각  $\phi_d$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\phi_d = \tan^{-1} \left[ \frac{R \cdot \sin \phi + S_y(\phi)}{R \cdot \cos \phi + S_x(\phi)} \right] \quad (7)$$

선분  $\overline{PQ} + \overline{QN}$ 의 길이로 표시되는 순간 미변형 칩두께  $C_d(i, \phi_d)$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_d(i, \phi_d) = ft \sin(\theta_i(\phi)) + \frac{R \sin(\theta_i(\phi)) - R \sin(\theta_i(\phi_d)) + S_y(i, \phi)}{\sin(\theta_i(\phi_d))} \quad (8)$$

또한 순간 절삭깊이  $C_d(i, \phi_d)$ 는 정절삭 상태의 순간 절삭깊이와 Z축방향의 칩 두께의 변화량의 합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

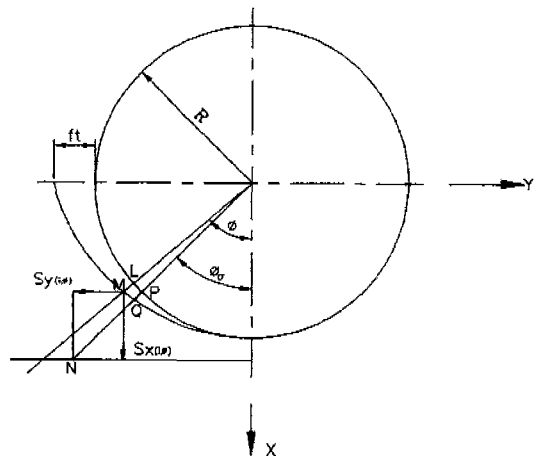


Fig. 3 The instantaneous undeformed chip thickness occurring in dynamic cutting state

$$d_d(i, \phi_d) = d + S_z(i, \phi) \quad (9)$$

따라서 동절삭력은 정절삭 상태의 순간 미변형 칩두께 및 순간 절삭깊이 대신에 동절삭 상태의 순간 미변형 칩두께  $C_d(i, \phi_d)$  및 순간 절삭깊이  $C_d(i, \phi_d)$ 를 대입하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned} DF_x(i, \phi) &= \dot{e} \cdot K_{MT} [\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_d)) \\ &\quad + \sin \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_d))) + \cos \gamma_L \\ &\quad \cdot (\sin \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_d)) - \cos \gamma_R \\ &\quad \cdot \cos \theta_i(\phi_d))] \cdot K_{MR} + (\cos \gamma_L \cdot \sin \gamma_A \\ &\quad \cdot \sin(\theta_i(\phi_d)) + \sin \gamma_L \cdot \cos(\theta_i(\phi_d))) \cdot K_{MA}] \\ DF_y(i, \phi) &= \dot{e} \cdot K_{MT} [-\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_d)) \\ &\quad - \sin \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_d))) - \cos \gamma_L \\ &\quad (\sin \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_d)) + \cos \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_d))) \\ &\quad \cdot K_{MR} - (\cos \gamma_L \cdot \sin \gamma_A \cdot \cos(\theta_i(\phi_d)) \\ &\quad - \sin \gamma_L \cdot \sin(\theta_i(\phi_d))) \cdot K_{MA}] \\ DF_z(i, \phi) &= \dot{e} \cdot K_{MT} [-\sin \gamma_A + \sin \gamma_L \cdot K_{MR} \\ &\quad + \cos \gamma_L \cdot \cos \gamma_A \cdot K_{MA}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\text{단, } \dot{e} &= [f_t \cdot \sin(\theta_i(\phi)) \\ &\quad + \frac{R \sin(\theta_i(\phi)) - R \sin(\theta_i(\phi_d)) + S_y(i, \phi)}{\sin(\theta_i(\phi_d))} \\ &\quad \cdot (d + S_z(i, \phi))] / \cos \gamma_A \cdot \cos \gamma_R) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DF_x(\phi) &= DF_x(i, \phi) + DF_x(i-1, \phi + \frac{360}{Z}) \\ &\quad + \dots + DF_x(i-(Z-1), \phi + \frac{360(Z-1)}{Z}) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} DF_y(\phi) &= DF_y(i, \phi) + DF_y(i-1, \phi + \frac{360}{Z}) \\ &\quad + \dots + DF_y(i-(Z-1), \phi + \frac{360(Z-1)}{Z}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} DF_z(\phi) &= DF_z(i, \phi) + DF_z(i-1, \phi + \frac{360}{Z}) \\ &\quad + \dots + DF_z(i-(Z-1), \phi + \frac{360(Z-1)}{Z}) \end{aligned}$$

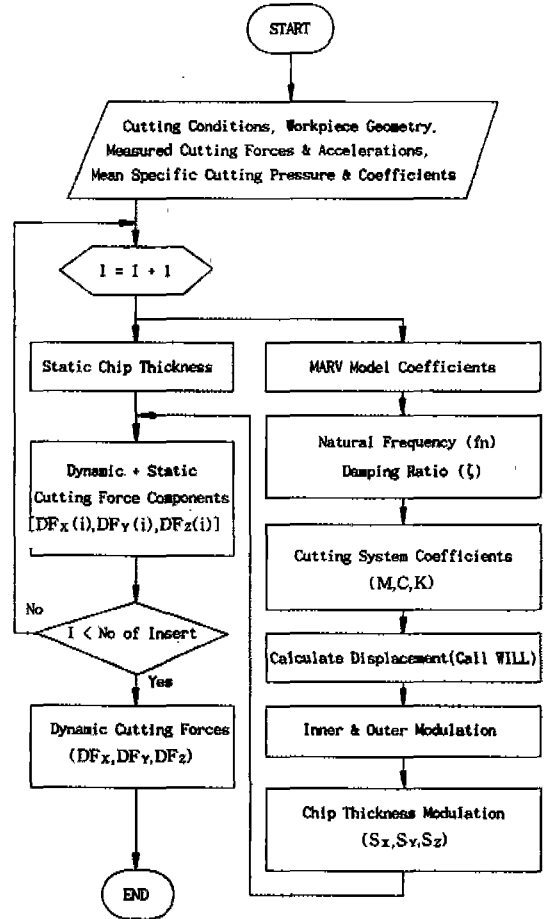


Fig. 4 The flow chart for dynamic cutting force simulation

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 논리흐름도

Fig. 4는 동절삭력을 예측하기 위한 시뮬레이션의 논리 흐름도를 나타낸 것이다. 사용된 밀링머신의 시스템 파라미터를 결정하기 위해 MARV(modified autoregressive vector) 모델을 이용하였다.<sup>(10,11,12)</sup> 먼저 측정가속도 및 측정절삭력을 MARV 모델에 적용해 모델계수를 계산하고, 모델계수를 입력하여 고유진동수와 감쇠비를 계산한다. 얻어진 고유진동수와 감쇠비가 동일한 값을 갖도록 시스템 파라미터를 결정하며,<sup>(13,14)</sup> 각 파라미터(질량, 감쇠, 강성, 초기 가진력)로 구성된 절삭 시스템의 운동방정식에 초기 가진력으로 정절삭력

Table 1 Experimental conditions

Experimental condition	Range
Cutting speed (m/min)	224.62
Feed per tooth (mm/tooth)	0.1181
Depth of cut (mm)	1.0, 2.0
Diameter of cutter (mm)	100
Number of insert	6
Sampling frequency (Hz)	2000
Width of workpiece (mm)	78
Cutting type	Symmetric cutting

모델로부터 시뮬레이션한 정절삭력을 입력하면 수치 적분법에 의해 계산된 공구 및 공작물 각각의 진동변위가 계산되고, 공구와 공작물의 상대변위인 안쪽 모듈레이션(inner modulation) 및 인서트 사이의 시간지연으로 인한 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)이 얻어지며, Inner와 Outer Modulation의 차인 미변형 칩두께 변화량(chip thickness modulation)이 계산된다. 얻어진 동적 상태의 미변형 칩두께 변화량에 의한 인서트의 궤적과 커터회전수, 이송속도, 절삭깊이, 인서트의 각, 인서트의 수, 커터반경, 공작물의 폭, 샘플링 시간에 따른 커터의 회전각의 변화에 의한 매순간의 정적 상태의 인서트의 궤적으로부터 순간 미변형 칩단면적이 계산되고, 이러한 동적 상태의 순간 미변형 칩단면적에 평균 비절삭 저항 및 계수가 곱해짐으로서 3축방향의 예측 동절삭력이 출력된다.

### 3.2 시뮬레이션 과정 및 결과

정절삭력 모델에 적용되는 평균 비절삭저항 및 계수와 동절삭력 모델에 적용되는 절삭 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 얻기 위하여 Table 1과 같은 절삭조건을 선정하여 절삭실험을 수행하였다.

절삭과정중에 발생하는 공작기계의 고유진동수와 감쇠비를 얻기 위해 Fig. 5와 Fig. 6은 절삭속도 224.62m/min(715rpm), 날당 이송량 0.1181mm/tooth(507 mm/min), 절삭깊이 1.0 mm인 절삭조건에서의 측정절삭력 및 측정가속도를 도시한 것으로,

큰 절삭력 변동 성분이 초래되는 인서트가 공작물에 진입하거나 이탈되는 지점에서 가속도 변동 성분이 크게 일어남을 보여주고 있다. 측정절삭력 및 측정가속도로부터 칩의 단속절삭에 의한 강제진동 성분을 제거하기 위해 100Hz 이하의 저주파수 성분(low frequency component)을 필터링하여 얻어진 자려진동에 의한 동절삭력 성분을 입력으로 하고, 동적 가속도 성분을 출력으로 하여 MARV 모델에 적용하여 얻은 X, Y, Z축방향 고유진동수와 감쇠비를 Table 2에 나타내었다. 이 때 변위를 사용하지 않고 가속도를 사용한 이유는 가속도를 이용할 때 고유진동수와 감쇠계수의 계산이 보다 적합함을 시뮬레이션으로 확인 되었기 때문이다.<sup>(6)</sup>

절삭 시스템은 X, Y, Z축방향이 서로 연결되어 있어 해석이 어렵다. 따라서 X, Y, Z축방향에서 가장 취약한 한방향으로 일반적으로 절삭 시스템을 모델링한다. 본 논문에서도 X, Y, Z축방향이 서로 연결되어 있지 않다고 가정하고, 실험으로부터 구한 Table 2의 특성치를 가지도록 절삭 시스템의 파라미터를 정하였다. Table 2의 특성치로부터 특성방정식의 파라미터를 구하고, (5)식의 파라미터로부터 특성방정식의 파라미터를 구하였다. 이 파라미터들이 일치하면 Table

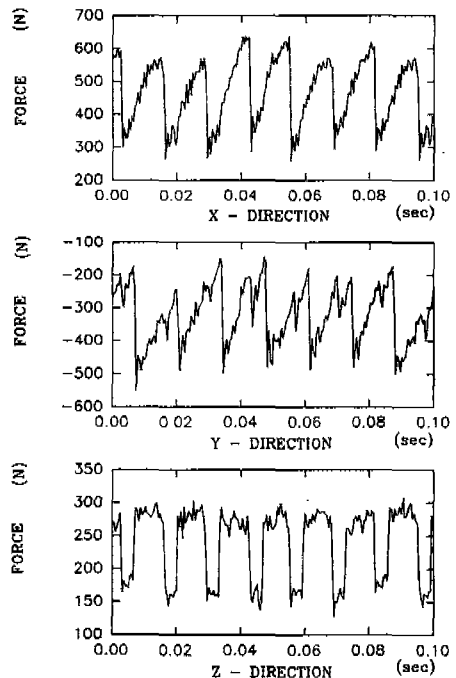


Fig. 5 Measured cutting forces in time domain. V:224.62(m/min), Ft:0.118(mm), d:1.0(mm)

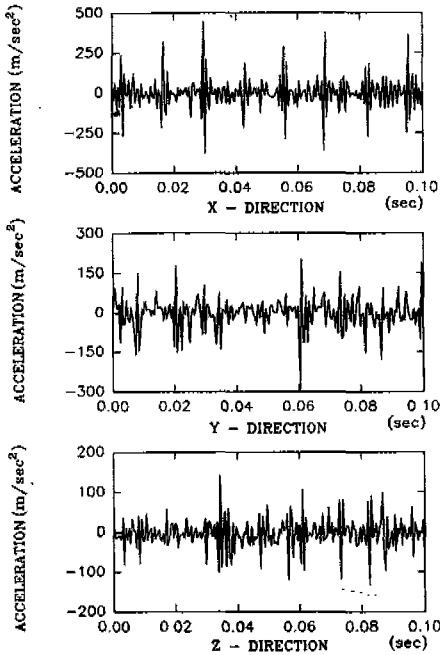


Fig. 6 Measured accelerations in time domain, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

2와 동일한 특성치를 갖는 절삭 시스템을 모델링할 수 있다.  $M_1$  (커터의 질량:4.2Kg)에 대한  $M_2$  (공구동력계의 질량:6.9Kg, 공작물의 질량:5.8Kg)의 질량비를 구하면 1:3이 되므로,  $M_1=1$ ,  $M_2=3$ 으로 하여 먼저 질량 행렬을 결정하고, 실험에서 구한 Table 2의 고유진동수와 감쇠비를 가지도록 강성행렬과 감쇠행렬을 결정하여, X, Y, Z축방향 각각의 절삭 시스템을 아래의 식과 같이 구하였다.

Table 2 Natural frequencies and damping ratios

Directions	1st mode		2st mode	
	$f_1$ (Hz)	$\zeta_1$	$f_2$ (Hz)	$\zeta_2$
X	822.63	0.1184	493.71	0.4365
Y	767.17	0.1151	416.98	0.2930
Z	795.39	0.1471	471.11	0.4337

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1(t) \\ \ddot{X}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 610 & -305 \\ -305 & 610 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \dot{X}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.54E7 & -1.49E6 \\ -1.49E6 & 3.54E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_X(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y}_1(t) \\ \ddot{Y}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 430 & -215 \\ -215 & 430 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_1(t) \\ \dot{Y}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.15E7 & -5.83E5 \\ -5.83E5 & 3.54E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1(t) \\ Y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_Y(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Z}_1(t) \\ \ddot{Z}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 697 & -348 \\ -348 & 697 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_1(t) \\ \dot{Z}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3.52E7 & -5.83E5 \\ -2.25E6 & 3.52E7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1(t) \\ Z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_Z(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Fig. 7과 Fig. 8은 모델링된 X, Y, Z축 절삭 시스템에 공구 및 공작물 각각에 정절삭력(static force)을 각 방향으로 가진하여 얻은 공구 및 공작물의 진동변위

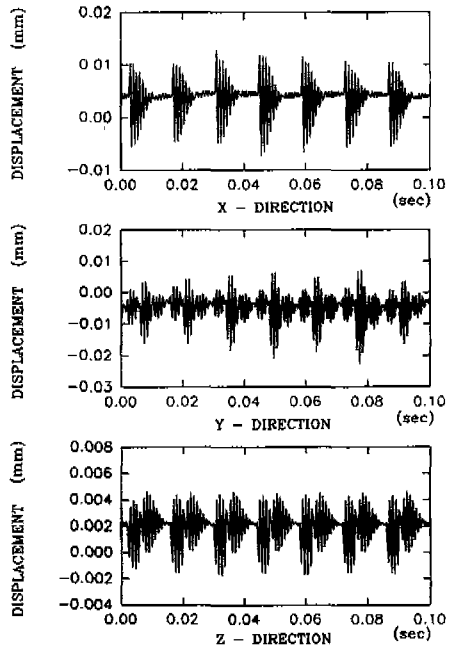


Fig. 7 Simulated tool displacements, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

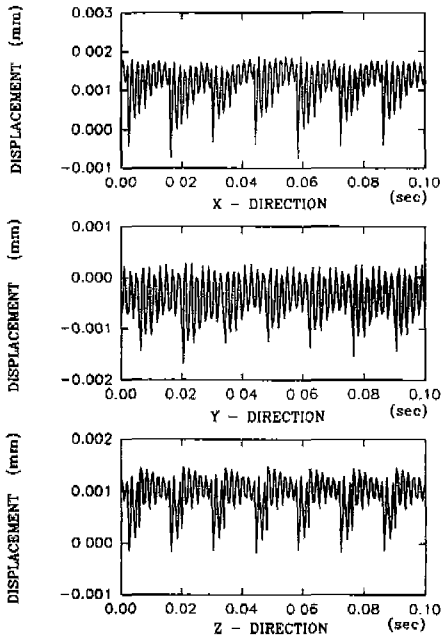


Fig. 8 Simulated workpiece displacements,  
 $V:224.62(m/min)$ ,  $ft:0.1181(mm)$ ,  $d:1.0(mm)$

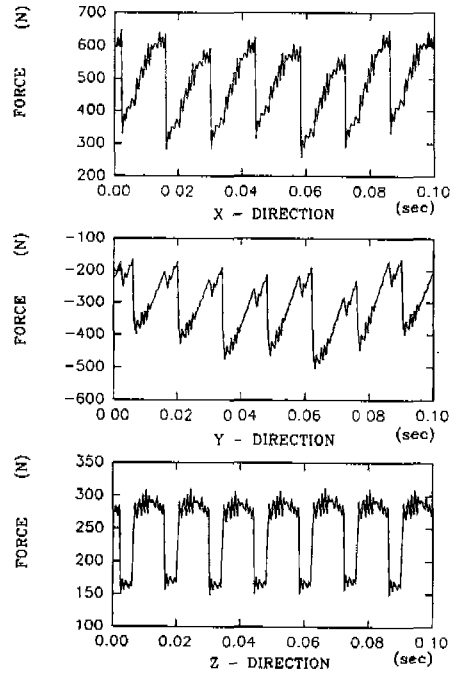


Fig. 10 Simulated dynamic cutting forces,  
 $V:224.62(m/min)$ ,  $ft:0.1181(mm)$ ,  $d:1.0(mm)$

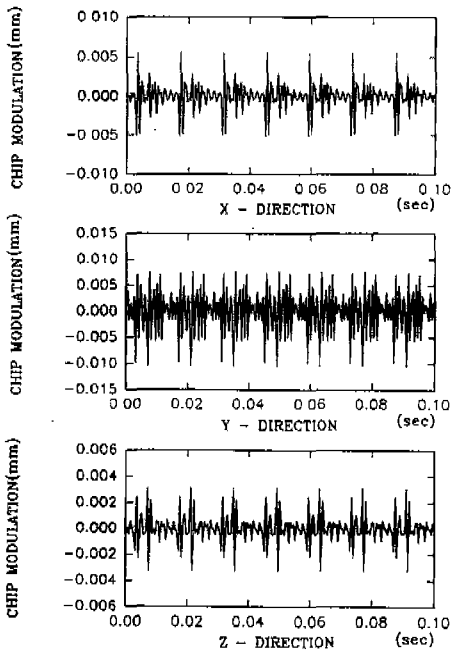


Fig. 9 Simulated chip thickness modulations,  
 $V:224.62(m/min)$ ,  $ft:0.1181(mm)$ ,  $d:1.0(mm)$

를 나타낸 것이다. Fig. 9는 칩두께 모듈레이션을 나타낸 것이고, Fig 10은 개발된 동절삭력 모델 (10), (11)식으로 부터 0.0005초 간격으로 시뮬레이션한 동절삭력을 도시한 것으로, Fig. 5의 측정절삭력과 비교적 잘 일치하고 있으며, Fig. 9의 X축방향 칩두께 모듈레이션이 작은곳에서 Fig. 10의 X축방향 동절삭력 성분이 크게 일어나고 있는 것과 같이 한축방향의 동절삭력 성분은 동일축방향의 칩두께 모듈레이션에만 영향을 받고 있지 않음을 나타내고 있다.

#### 4. 실험

##### 4.1 시험편 및 실험조건

본 실험에 사용된 시험편은 정면 밀링 작업에 널리 사용되고 있는 기계구조용·탄소강재 (SM 45C)로 선택하였으며, 설정한 실험 조건은 Table 3과 같으며, 공작물과 공구의 절삭위치는 Fig. 11과 같다.

##### 4.2 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머신인



Table 3 Experimental conditions

Experimental condition	Range
Cutting speed (m/min)	87.92, 116.18, 169.56, 224.62
Feed per tooth (mm/tooth)	0.051, 0.062, 0.075, 0.079, 0.082 0.064, 0.111, 0.118, 0.159, 0.168
Depth of cut (mm)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
Diameter of cutter (mm)	100
Number of insert	6
Sampling frequency (Hz)	2000
Number of data	1024
Workpiece	SM 45 C
Width of workpiece (mm)	78
Cutting type	Symmetric cutting

고, 실험장치의 개략도는 Fig. 12와 같다. 개략도에서와 같이 테이블 위에 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 압전식(piezo electricity type) 절삭력 센서인 공구동력계(tool dynamometer)를 부착하고, 공구동력계 위에 X, Y, Z축방향 각각의 가속도를 측정할 수 있는 3개의 가속도계가 부착된 공작물을 장착한 치구를 설치한다. 이 때 커터에 삽입된 각 인서트의 런 아웃은 Tool Free Set을 이용하여 최소화 시켰다. 절삭과정 중의 인서트의 마모를 고려하여 매 절삭조건마다 인서트를 교환하면서 Table 3과 같은 실험조건으로 절삭실험을 행하고, 공구동력계로 부터 발생되는 절삭력 신호 및 각각의 가속도계로 부터 발생되는 가속도 신호를 전자

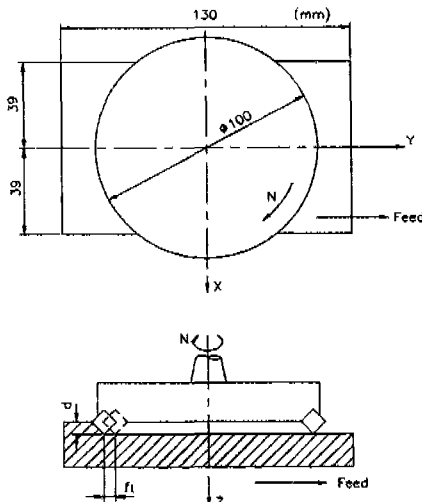


Fig. 11 Cutting configuration

증폭기 (charge amplifier)에서 증폭시켜 오실로스코프 (oscilloscope)를 통해 모니터링 (monitoring)함과 동시에 A/D 변환기(analog/digital converter)를 통해 퍼스널 컴퓨터에 저장하였다. 이 때에 X, Y, Z축방향의 절삭력 및 가속도를 2000Hz로 샘플링하고, 한 샘플 (sample)당 데이터의 수는 0.52초 동안 1024개를 획득하여 퍼스널 컴퓨터에 저장하였다. Table 4는 본 실험에 사용된 기계 및 계측기의 제원을 나타낸 것이다.

### 5. 결과 및 고찰

정면 밀링 작업은 여러 개의 인서트에 의하여 단속절삭이 수행되므로, 인서트가 공작물로 부터 이탈되거나 진입할 때 큰 절삭력의 변동을 초래하고, 이러한 절삭력의 변동이 공작기계의 구조물을 가진하여 칩두께 모듈레이션을 생성한다. 본 실험조건에서는 2개의 인서트가 절삭 작업에 관여하다가 1개의 인서트가 공작물로부터 이탈되는 순간, 절삭 작업에 관여하고 있는 나머지 1개의 인서트의 위치각은  $81.26^\circ$  ( $141.26^\circ$ )이다. 또한 1개의 인서트가 절삭 작업에 관여하다가 다른 1개의 인서트가 절삭 작업에 동시에 관여되는 순간, 절삭 작업에 관여하는 2개의 인서트의 위치각은 각각  $38.74^\circ$ 와  $98.74^\circ$ 이다. Fig. 13은 절삭속도 224.62m/min (715rpm), 날당 이송량 0.1181mm/tooth (507 mm/min), 절삭깊이 1.0 mm인 절삭조건에서의 커터의 회전각  $30^\circ \sim 150^\circ$  사이의 시뮬레이션한 X, Y, Z축방향 칩두께 모듈레이션을 도시한 것이다. Fig. 13에서 도시된 바와 같이 인서트가 이탈되는 순간, 절삭 작업에 관여하고 있는 1개의 인서트의 위치각  $81.26^\circ$  및 인서트가 진입하는 순간, 절삭 작업에 관여하고 있는 2개의 인서트의 위치각  $38.74^\circ$ ,  $98.74^\circ$ 에서 큰 칩두께 모듈레이션이 발생함을 보여주고 있다.

Table 5는 인서트의 위치각  $10^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $170^\circ$ 에서의 X, Y축방향의 칩두께 모듈레이션을 임의의 값으로 가정하여 동절삭력 모델의 식 (7)에 의해서 계산된 순간 미변형 칩두께 변화량을 나타낸 것이다. Table 5에서 나타난 바와 같이 X, Y축을 기준으로한 칩두께 모듈레이션의 크기가 동일하더라도 인서트의 절삭위치에 따라 순간 미변형 칩두께의 변화량은 달라진다는 것을 보여 주고 있으며, 인서트의 절삭위치  $45^\circ$  및  $135^\circ$ 를 기준으로  $90^\circ$ 에 가까와 질수록 Y축방향의 칩두께 모듈레이션이,  $0^\circ$  또는  $180^\circ$ 에 가까와 질수록 X축방

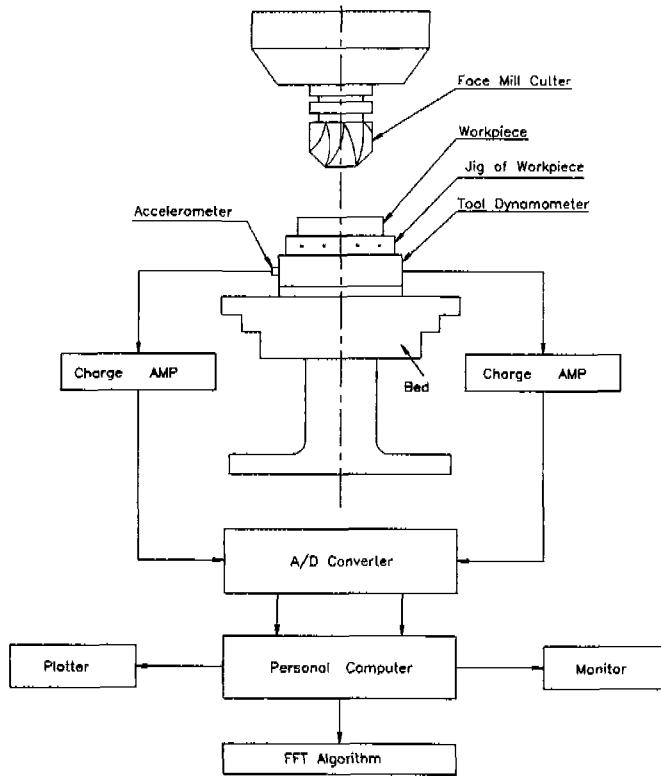


Fig. 12 Schematic diagram for experimental setup

향의 칩 두께 모듈레이션이 미변형 칩두께의 변화에 지배적 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

본 실험조건에서는 한 절삭 주기(38.74°~98.74°) 동안의 동절삭력 성분은 38.74°~81.25° 사이에는 절삭 작업에 관여되는 인서트의 수가 2개이므로 38.74°~81.26°, 98.74°~141.26° 사이의 각각의 미변형 칩두께 변동량의 합에 의해 나타나고, 81.26°~98.74° 사이에는 절삭 작업에 관여되는 인서트의 수가 1개 이므로 그 위치각에서의 미변형 칩두께 변동량에 의해 나타난다. 따라서 본 실험조건에서는 Y축방향의 칩두께 모듈레이션이 동절삭력 성분에 지배적 영향을 미치고 있다.

한축방향의 칩두께 모듈레이션이 다른축방향의 동절삭력 성분에 미치는 영향을 알아보기 위해, Fig. 14는 Fig. 13의 Y, Z축방향의 칩두께 모듈레이션은 일어나지 않는 것으로 하고, X축방향의 칩두께 모듈레이션만을 고려한 X, Y축방향 동절삭력을 나타낸 것이며, Fig. 15는 Fig. 13의 X, Z축방향 칩두께 모듈레이션은 일어나지 않는 것으로 하고, Y축방향의 칩두께 모듈

레이션만을 고려한 X, Y축방향 동절삭력을 나타낸 것이다. Fig. 14와 Fig. 15에서 나타난 바와 같이 X축방향의 칩두께 모듈레이션이 Y축방향 동절삭력 성분을, Y축방향 칩두께 모듈레이션이 X축방향 동절삭력 성분을 발생 시키고 있으며, X축방향의 칩두께 모듈레이션이 X, Y축방향의 동절삭력 성분에 미치는 영향은 작으나, Y축방향 칩모듈레이션이 X, Y축방향 동절삭력 성분을 지배하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 16은 정절삭력 모델(6)로부터 시뮬레이션한 정절삭력을 도시한 것이고, Fig. 17은 기존의 동절삭력 모델에 의한 Fig. 16의 정절삭력을 모델링된 X, Y, Z축방향 절삭 시스템의 공구 및 공작물을 가진하여 얻어진 칩두께 모듈레이션과 동절삭계수를 곱하여 구한 시뮬레이션한 동절삭력 성분을 도시한 것이며, Fig. 18도 기존의 동절삭력 모델에 의한 Fig. 16의 정절삭력과 Fig. 17의 동절삭력 성분을 중첩한 시뮬레이션한 동절삭력을 도시한 것이다. Fig. 5의 측정 절삭력과 비교해 보면 측정절삭력의 동적 성분의 절대값  $|dF_x| = 41N$ ,

Table 4 Specification of experimental setup

Instrument	Specification
Milling machine	HWA CHUN (WMV-1100)
Tool dynamometer	KISTLER (type 9257-A)
Accelerometer	KISTLER (type 8628-A5)
A/D converter	Lab MASTER conversion rate: 30 KHz resolution : 12 bit input range : ±10 V
Computer	32 bit LOGIX compatible PC
Oscilloscope	TEKTRONIX (2201 Digital Storage Oscilloscope)
Charge amplifier	KISTLER (type 5008 EDPM-2300)
Filter	KISTLER
Cutter	KOREA TUNGSTEN (MI15SP 04R/L-12)
Insert	KOREA TUNGSTEN (SPKN 1203 EDR/L)

Table 5 Chip thickness modulations according to insert cutting positions

$\phi$ (degree)	R (mm)	S <sub>x</sub> (mm)	S <sub>y</sub> (mm)	$\theta_s$ (degree)	dc (mm)
10	50	0.02	0.02	10.0185	0.02357
		0.02	0.04	10.0411	0.02684
		0.04	0.02	10.0145	0.04335
45	50	0.02	0.02	45.0000	0.02828
		0.02	0.04	45.0161	0.04243
		0.04	0.02	44.9838	0.04243
90	50	0.02	0.02	89.9770	0.02000
		0.02	0.04	89.9771	0.04000
		0.04	0.02	89.9541	0.02002
135	50	0.02	0.02	134.9675	-0.00006
		0.02	0.04	134.9513	0.01407
		0.04	0.02	134.9513	-0.01401
170	50	0.02	0.02	169.9734	-0.01642
		0.02	0.04	169.9508	-0.01306
		0.04	0.02	169.9694	-0.03615

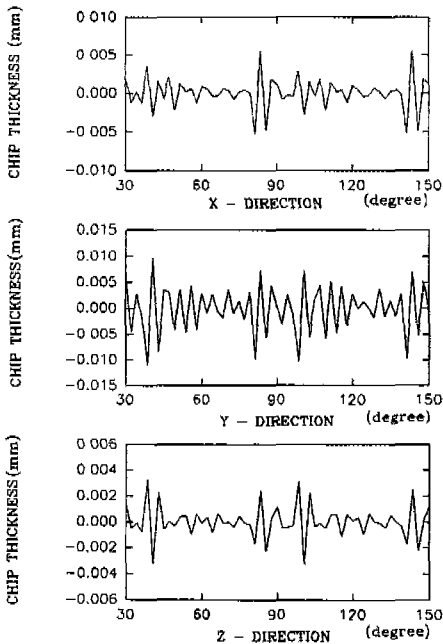


Fig. 13 The chip thickness modulations according to rotation angle of cutter, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

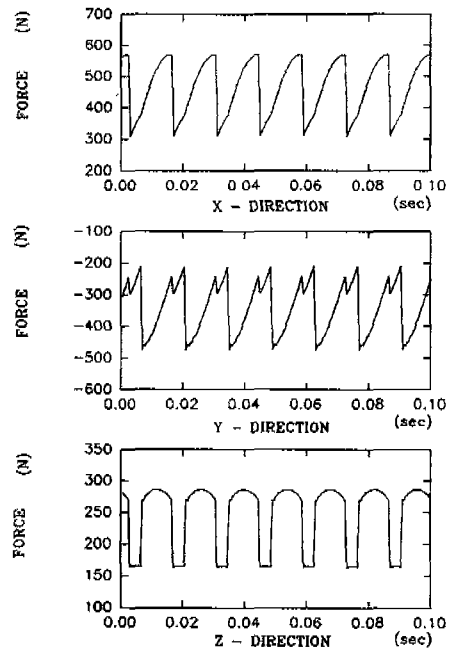


Fig. 14 The dynamic cutting forces resulted from x-dir. chip thickness modulation, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

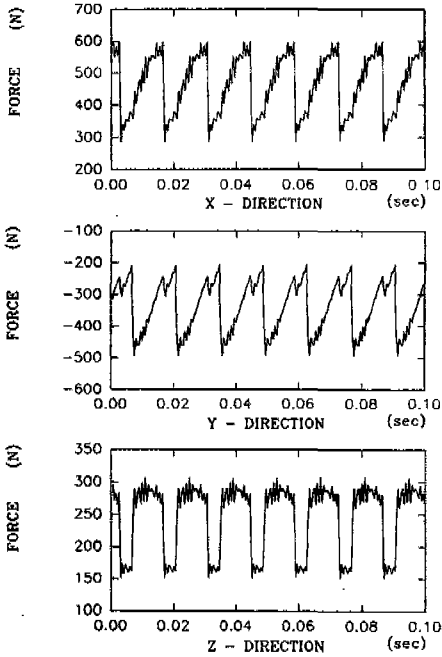


Fig. 15 The dynamic cutting forces resulted from y-dir. chip thickness modulation, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

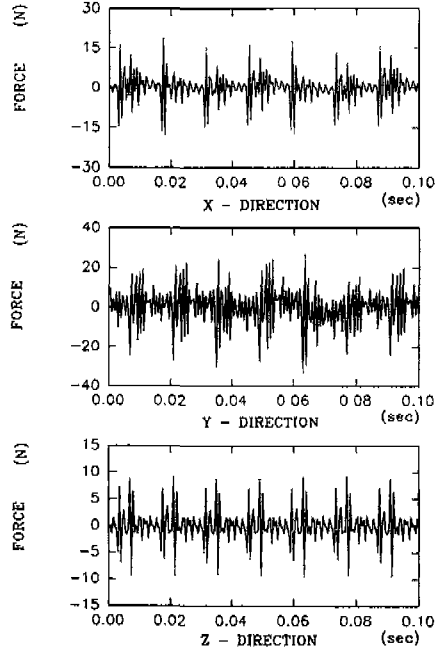


Fig. 17 Simulated dynamic cutting force components resulted from existing model, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

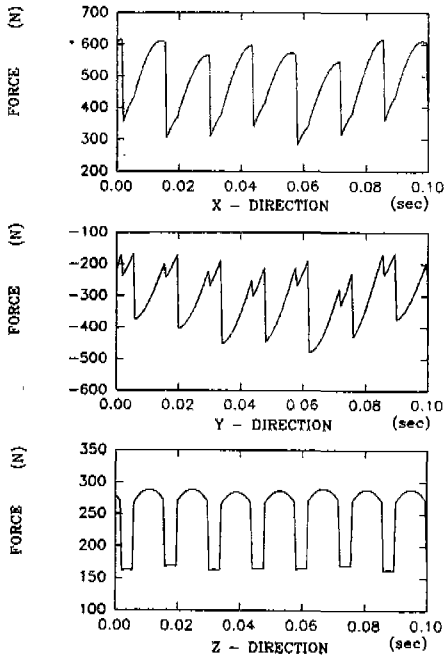


Fig. 16 Simulated static cutting forces, V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

$|dF_x| = 46N$ ,  $|dF_y| = 39N$ ,  $|dF_z| = 27N$  이고, Fig. 18의 기존의 동절삭력 모델로 부터 시뮬레이션한 동절삭력의  $|dF_x| = 4N$ ,  $|dF_y| = 33N$ ,  $|dF_z| = 8N$  으로 새로운 동절삭력 모델이 기존의 동절삭력 모델보다 절삭력 예측 정밀도가 우수한 모델임을 보여주고 있다. 이것은 기존의 동절삭력 모델에서는 한 축방향의 칩두께 모델레이션과 일정한 값을 갖는 동절삭계수의 곱으로 한축방향의 동절삭력 성분을 구하고 있어, 앞서 설명한 바와 같이 절삭 작업에 관여하는 인서트의 수에 따른 미변형 칩두께의 변화량을 고려하지 못하고 있으며, 각 축방향의 절삭력은 절삭순간에 발생되는 접선, 반경, 축방향 절삭력 분력의 합으로 나타나므로 인서트의 절삭위치에 따라 그 크기가 달라진다. 따라서 기존의 동절삭력 모델은 실제의 측정절삭력을 모델링하는데 있어서 오차를 나타낸다.

Fig. 19는 Y축방향의 절삭력을 주파수 영역으로 나타낸 것으로 a)는 정절삭력, b)는 동절삭력 성분, c)는 시뮬레이션한 동절삭력을, 그리고 d)는 측정절삭력

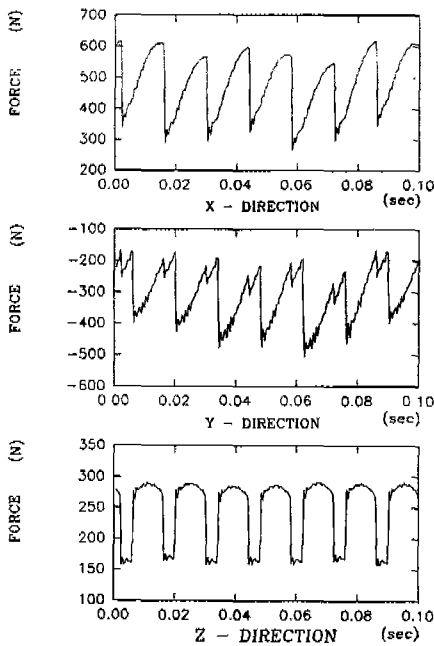


Fig. 18 Simulated dynamic cutting forces resulted from existing model,  
 V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

을 각각 주파수 분석(Fourier transforms)하였다. Fig. 19의 c)의 시뮬레이션한 동절삭력과 d)의 측정절삭력이 주파수 영역에서 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 19의 b)의 동절삭력 성분은 공작기계 구조의 고유진동수 부근에서 나타나고 있는데, 이 동절삭력 성분은 정밀가공에 있어서 공작기계를 불안정하게 하고 가공물의 표면조도를 나쁘게 하는 요인이 되는데, 주파수 영역에서 볼때는 인서트 주파수(insert frequency)에 비해 매우 작은 값에 불과하나, 절삭력에 있어서는 Fig. 16의 시뮬레이션한 정절삭력과 Fig. 10의 시뮬레이션한 동절삭력을 비교할 때 시간 영역에서 볼 때는 피크값에 있어 큰 차이를 나타내고 있다.

## 6. 결 론

정면 밀링 작업시에 발생하는 동절삭력을 예측할 수 있는 절삭력 모델을 개발함과 아울러 절삭조건에 따른 절삭과정의 동적 특성을 해석하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 개발된 동절삭력 모델은 시뮬레이션과 실험 결과

를 비교 분석한 결과 기존의 동절삭력 모델에 비해 절삭력 예측 정밀도가 향상된 모델임이 입증되었다.

2. 한축방향의 공구와 공작물의 상대 진동변위는 동일축방향의 절삭력에만 변동성분을 유발하는 것이 아니라 3축방향의 절삭력 각각에 변동 성분을 유발하며, 각 축방향의 절삭력 변동성분의 크기는 절삭작업에 관여하는 인서트 수 및 절삭점의 위치에 따라 변화됨이 입증되었다.

3. 동절삭력 성분은 인서트의 절삭 위치가 0° (180°)에 가까울수록 X방향 칩두께 모델레이션에, 90°에 가까울수록 Y방향 칩두께 모델레이션에 지배 된다.

## 참 고 문 헌

1. Das, M.K. and Tobias, S.A., "The Relation between the Static and Dynamic Cutting of Metals," Int. J. MTRD, Vol.7, pp.63-89, 1967.
2. Nigm, M.M., Sadek, M.M. and Tobias, S.A., "Determination of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data," Int. J. MTRD, Vol.17, pp.19-37, 1977.
3. Tlustý, J., "Analysis of the State of Research in Cutting Dynamics," CIRP Annals, Vol.27, No.2, pp.583-589, 1978.
4. Wu, D.W. and Liu, C.R., "An Analytical Model of Cutting Dynamics. Part1: Model Building," Trans, ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.107, May, pp.107-111, 1985.
5. Wu, D.W. and Liu, C.R., "An Analytical Model of Cutting Dynamics. Part2: Verification," Trans, ASME, J. of Eng. for Ind., Vol.107, May, pp.112-118, 1985.
6. 이 병철, 황 정철, 백 대균, 김 희술, "정면밀링의 절삭력 해석을 위한 평균비절삭저항 모델의 개발," 한국정밀공학회지, 제11권, 제4호, pp.13-25, 1994.
7. H.S.Kim, "Milling Dynamics in Closed Loop System," Ph D. Thesis, University of Wisconsin - Madison, 1987.
8. Cho, D.W., "A New Multi-Input Analysis

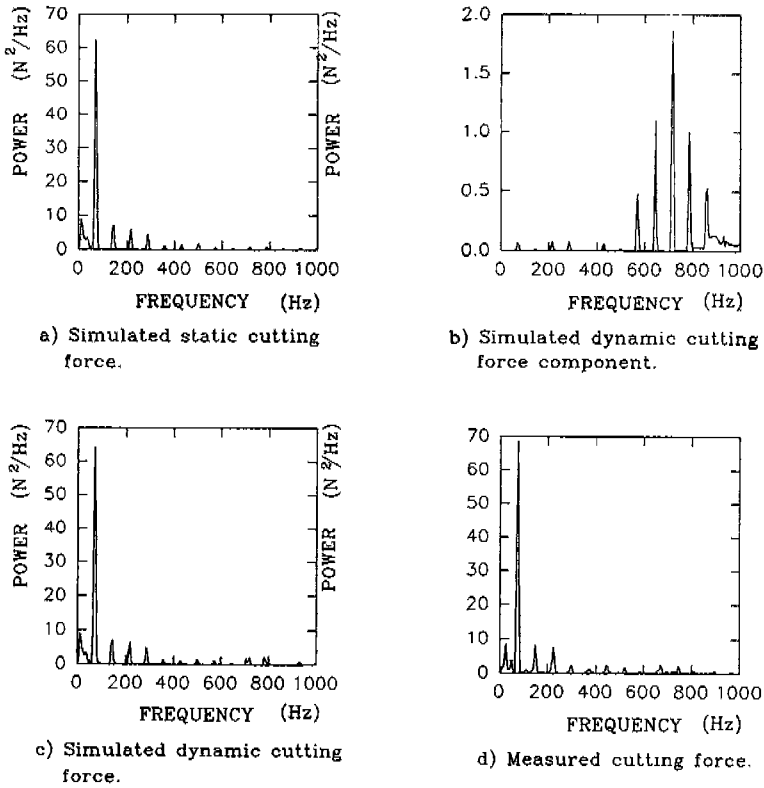


Fig. 19 Spectral density in Y-direction  
 V:224.62(m/min), ft:0.1181(mm), d:1.0(mm)

and Three Dimensional Cutting Dynamics Identification Method Applied to Milling Operations," Ph D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1986.

9. 백대균, 김정현, 김희술, "자기회기 벡터모델을 이용한 정면밀링의 동절삭력 모델해석," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제12호, pp.2949-2961, 1993.
10. Ahn, T. Y., Eman, K. F. and Wu, S. M., "Dynamic Cutting Process Identification by Dynamic Data System Models," 10th North American Manufacturing Research Proceedings, 1982.
11. Ahn, T. Y., Eman, K. F. and Wu, S. M., "Identification of the Transfer Function of Dynamic Cutting Process Comparative

Assessment," Int. J. MTDR, Vol.25, No.1, pp.75-90, 1985.

12. Pandit, S. M. and Wu, S. M., "Time Series and System Analysis with Application," Jhon Wiley & Sons, 1983.
13. Burney, F. A., Pandit, S. M. and Wu, S. M., "A Stochastic Approach to Characterization of Machine Tool System Dynamics under Actual Working Conditions," Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, pp.708-714, 1977.
14. 김희술, 이상석, 이병철, "정면 밀링 작업에서 동절삭력의 해석," 대한기계학회 논문집, 제16권, 제12호, pp.2268-2278, 1992.
15. 이장무, 김광준, "절삭공작기계의 동특성," 대광문화사, 1985.