

〈論 文〉

正面 밀링 作業에서 動切削力의 解析

김희술* · 이상석** · 이병철**

(1992년 6월 9일 접수)

An Analysis of the Dynamic Cutting Force on Face Milling Operation

Hee-Sool Kim, Sang-Suk Lee and Byoung-Chul Lee

Key Words: Dynamic Cutting Force(동절삭력), Face Milling Operation(정면 밀링작업), Dynamic Components(동적성분)

Abstract

The vibratory model for the face milling operation is assumed as a multi degrees of freedom system. The parameters of the system are determined based on the cutting experiment. From the relative displacements of this system the dynamic cutting forces were derived and simulated by the double modulation principle. The simulated cutting forces and measured cutting forces have a good agreement in time and frequency domains.

1. 서 론

정면 밀링은 최근 고도의 능률을 요구하고 있는 생산현장에서 그 이용범위가 날로 증가하고 있으며, 인건비의 상승과 기능인력의 부족으로 인하여 자동화, 정밀화, 무인화가 급속히 추진되고 있다.

이러한 추세에 부응된 공작기계는 자동진단기능을 포함한 다양한 기능을 갖추어야 하기 때문에 대형화가 되어가고 있는 실정이다.

이러한 공작기계의 부품 및 공구의 설계와 효율적인 이용을 위해서는 가장 기본적으로 절삭력의 예측이 필요하다. 따라서 지금까지 절삭력 예측을 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 이들에 대한 연구들은 정절삭력 모델(static cutting force model)과 동절삭력 모델(dynamic cutting force model)로 크게 분류할 수 있다.

정절삭력 모델은 공구의 기하학적 형상과 절삭조

건에 의하여 결정되는 날 한 개당 절삭면적과 단위 면적당 절삭저항을 곱하여 절삭력을 예측하는 모델이다.^(4,5,6,7,8,19,20,21) 동절삭력 모델은 일반적으로 절삭과정에서 발생하는 공작기계의 진동에 의해 공구와 공작물간의 상대변위를 고려한 절삭력 변동 성분을 해석하여 절삭력의 동적인 특성을 고려한 모델이다.^(3,9,10,11,12)

정절삭력 모델은 계산이 비교적 간단하여 현장에서 이용하기에 편리한 점은 있으나, 오늘날과 같이 난삭재 가공이나 생산능률 향상을 위한 강력절삭 및 무인화를 위한 안정절삭 영역 등을 결정하는 데는 보다 정확한 절삭력 예측과 공구와 공작물간의 상대운동에 의한 동절삭력 성분을 고려한 모델 개발의 필요성이 날로 더해가고 있는 실정이다.

본 연구는 기존의 정절삭력 모델⁽²¹⁾을 이용하여 절삭과정에서 발생하는 동적인 특성과 공작기계의 구조적인 특성이 상호작용되어 발생하는 절삭력 변동성분들이 고려된 절삭력 모델 즉 동절삭력 모델을 개발하여서 이 모델로부터 예측된 절삭력과 절삭실험 결과를 비교, 분석하여 제시한 모델의 타당성 및 동절삭력 특성을 검토하고자 한다.

*정희원, 영남대학교 기계공학과

**영남대학교 기계공학과 대학원

2. 이론 해석

Das, Tobias, Nigm, Sadek^(3,9,13) 등에 의하면 절삭과정에서 발생하는 절삭력 변동에 의해 공작기계의 진동이 발생되어서 공구와 공작물간의 상대변위를 발생시키고, 이들의 변위에 기인된 부가적인 칩면적 변화로 인하여 절삭력의 변동이 발생된다고 하였다.

본 연구에서도 이러한 가정들을 기초로하여 다자유도 절삭시스템에서 절삭력 예측 모델을 유도하고자 한다. 기본 가정을 정리하면;

가정1) 정절삭력(static cutting force)은 절삭조건과 공구의 기하학적 형상에 의해 계산된 절삭 칩면적과 비절삭력 계수의 곱으로 계산된 절삭력이다.

가정2) 정지상태의 절삭시스템에 정절삭력에 의해 가진되기 시작한다.

가정3) 동적인 성분(dynamic component)은 재진동에 기인된 절삭력 변동성분만을 고려한다.

가정4) 동절삭력(dynamic cutting force)은 정절삭력과 동적인 성분의 합력이다.

2.1 정절삭력 모델

정절삭력은 절삭 칩면적과 실험에 의해 결정된 비절삭력 계수로 구하며, 일반 절삭시 동절삭력의 대부분을 구성하고 있다. 정절삭력 모델⁽²¹⁾을 유도하기 위하여 Martelloti⁽¹⁶⁾, Fu⁽⁴⁾, Gygax⁽¹⁴⁾, 및 Ruzhong⁽¹⁷⁾ 등의 기본 가정을 요약하면

(가) “한 인서트의 날끝이 그리는 체적은 커터의 중심에서 원과 같다.”

(나) “한 순간에서의 절삭력은 그 순간에서 절삭 작용을 하는 모든 인서트들의 합력과 같다.”

위와 같은 가정하에서 절삭조건과 공구의 형상에 의하여 한개의 인서트에 작용되는 힘의 성분들을 도식한 것이 Fig. 1이다. Fig. 1인 페이스 커터의 중심을 원점으로 하고 피이드 방향을 (-)Y, 이와 직각 방향을 X, 축방향을 Z축으로 직각 좌표계로 나타낼 때 F_T , F_R 및 F_A 는 각각 커터의 접선 방향, 반경방향 및 축방향의 성분을 표시한다.

Fig. 1에서 커터의 회전각이 Φ 이고 이송량이 f , 일때 i 번째 인서트에 의해 발생하는 순간 절삭칩 두께(instantaneous chip thickness), $C(\theta_i(\Phi))$, 순간 절삭깊이(instantaneous depth of cut), $D(\theta_i$

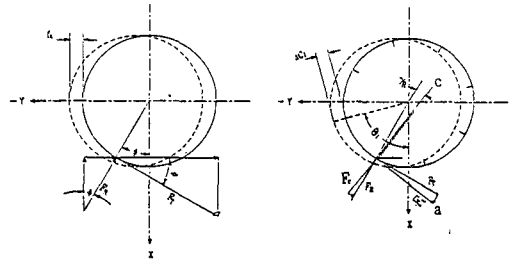


Fig. 1 Force components according to cut geometries in the X-Y-Z and a-b-c coordinate systems

(Φ), 및 순간 절삭면적(instantaneous uncut chip area), $A(\theta_i(\Phi))$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

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

Fu, Gygax, Kline, Ruzhong^(14,15,17,20) 등에 의하면 한 인서트에 의해 발생한 칩 단면에 작용하는 접선 방향의 힘(tangential force), $F_T(i, \Phi)$ 은 칩면적 $A(\theta_i(\Phi))$ 과 비절삭력 계수(specific cutting force coefficient), K_T 의 곱으로 표시할 수 있고, 반경방향의 힘(radial force), $F_R(i, \Phi)$ 은 접선 방향의 힘에 실험에 의해 결정되는 계수, K_R 의 곱으로 나타내었으며 식 (2. a)과 같이 표시할 수 있다.^(14,15,17)

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

식 (2a)에 포함된 계수 K_T , K_R 은 일반적으로 수직 절삭실험(orthogonal cutting experiment)에서 측정된 두방향의 평균 절삭력으로부터 결정되는 상수이기 때문에 축방향의 절삭력 특성이 배제되어 축방향의 성분(axial force component)을 예측하는데 큰 오차를 나타낸다. 경강이나 난삭재를 절삭할 경우 축방향의 힘이 크고 또한 이 방향의 힘은 가공정밀도에 중요한 영향을 미친다. 따라서 축방향의 예측정도를 향상시키기 위하여 축방향의 절삭력과 관련된 계수 K_A 를 도입하여 반경방향의 힘을 표시하는 것과 같은 방법으로 축방향의 힘 $F_A(i)$ 를 표시하면 다음과 같다.

$$F_A(i, \Phi) = K_A F_T(i, \Phi) \quad (2b)$$

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 할때, 이는 식(2)에 표시된 F_T , F_R 및 F_A 의 각 축 방향의 분력의 합으로 표시할 수 있으며 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} F_x(i, \Phi) &= F_T(i, \Phi) \cdot \sin(\theta i(\Phi)) \\ &\quad - F_R(i, \Phi) \cdot \cos(\theta i(\Phi)) \\ F_y(i, \Phi) &= F_T(i, \Phi) \cdot \cos(\theta i(\Phi)) \\ &\quad + F_R(i, \Phi) \cdot \sin(\theta i(\Phi)) \\ F_z(i, \Phi) &= F_A(i, \Phi) \end{aligned} \quad (3)$$

X-, Y- 및 Z- 방향의 순간절삭력 성분은 커터의 회전각이 Φ 일때 동시에 절삭작용을 하는 인서트수(Z_c)의 합으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x(\Phi) \\ F_y(\Phi) \\ F_z(\Phi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{Z_c} \begin{bmatrix} F_x(i, \Phi) \\ F_y(i, \Phi) \\ F_z(i, \Phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

공구각의 영향을 고려하기 위하여 인서트의 끝점을 원점으로 하고 인서트의 축방향 경사면에서 수직방향을 a , 커터의 피이드 방향을 c , 이와 직각방향을 b 로 하는 새로운 좌표계를 Fig. 2와 같이 취하고 a, b, c 방향의 힘의 성분을 각각 F_b, F_r 및 F_a 라 할때 i 번째 인서트의 각 방향의 힘의 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_t(i, \Phi) &= \frac{K_T Ai(\phi)}{\cos(\gamma_A) \cdot \cos(\gamma_R)} \\ F_r(i, \Phi) &= K_R \cdot F_t(i, \Phi) \\ F_a(i, \Phi) &= K_A \cdot F_t(i, \Phi) \end{aligned} \quad (5)$$

X-Y-Z 좌표계에서 표시된 F_T, F_R 및 F_A 는 $a-b-c$ 좌표계에 표시된 F_b, F_r 및 F_a 의 공구각에 의한 분력의 합으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_T(i, \Phi) = F_t \cdot \cos(\gamma_A) \cdot \cos(\gamma_R) + F_R \cdot \cos(\gamma_L)$$

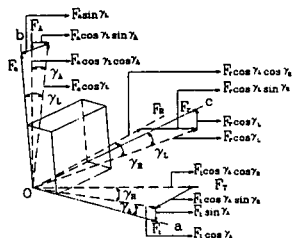


Fig. 2 Force components according to cutter geometries in the a-b-c coordinate system

$$\begin{aligned} &\sin(\gamma_R) + F_A \cdot \cos(\gamma_L) \cdot \sin(\gamma_A) \\ F_R(i, \Phi) &= F_t \cdot \cos(\gamma_A) \cdot \sin(\gamma_R) + F_r \cdot \cos(\gamma_L) \cdot \cos(\gamma_R) - F_a \cdot \sin(\gamma_R) \\ F_A(i, \Phi) &= F_t \cdot \sin(\gamma_A) + F_r \cdot \sin(\gamma_L) + F_a \cdot \cos(\gamma_L) \cdot \cos(\gamma_A) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\gamma_R, \gamma_A, \gamma_L$ 는 각각 반경방향, 축방향의 경사각 및 리이드각을 나타낸다. 식(6)은 절삭력 성분들이 절삭조건 및 공구의 형상에 따른 변화를 나타낸 것이다. 식(5)를 식(6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{bmatrix} = K_T \cdot Ai(\phi) \begin{bmatrix} \alpha_1 + \beta_1 K_R + \gamma K_A \\ \alpha_2 + \beta_2 K_R + \gamma_2 K_A \\ \alpha_3 + \beta_3 K_R + \gamma_3 K_A \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 매트릭스내의 계수들은 다음과 같다.

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

(3), (4)식으로 부터 (8)식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x(\phi) \\ F_y(\phi) \\ F_z(\phi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{Z_c} \begin{bmatrix} \sin(\theta i(\Phi)) & -\cos(\theta i(\Phi)) & 0 \\ -\cos(\theta i(\Phi)) & -\sin(\theta i(\Phi)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_T(i, \Phi) \\ F_R(i, \Phi) \\ F_A(i, \Phi) \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8)식으로 부터 정면커터의 기하학적 형상과 절삭조건에 의하여 결정되는 정절삭력을 예측할 수 있다.

2.2 동절삭력 모델

커터의 기하학적 형상과 절삭조건에 따라 발생하는 절삭력의 예측은 정절삭력 모델로서 가능하나 같은 절삭조건에서도 동작기계의 강성의 차이에 따라서 과부하 절삭이 될 수도 있고 너무 가벼운 절삭조건이 될 수 있다. 따라서 동작기계의 구조적인

특성이 절삭력 변동원이 될 수 있음은 이미 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다.

Das, Tobias, Nigm, Sadek, Ann, Opitz,^(1,4,9,10,13) 등에 의하여 재생진동(regenerative vibration)에 의한 절삭력의 변동성분은 이중 모듈레이션(double modulation)에 의해 표현될 수 있음을 보였다.

정면밀링에서 커터의 회전각이 ϕ 이고, i 번째 인서트에 의한 순간 안쪽 모듈레이션(inner modulation)은 이 인서트에 의해 발생하는 절삭면의 요철을 나타내는 것으로 커터의 순간변위를 $X_1(\phi)$, 공작물의 순간변위를 $X_2(\phi)$ 라고 할때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_m(i, \phi) = X_1(i, \phi) - X_2(i, \phi) \quad (9)$$

순간 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)은 바로 전 인서트에 의해 발생된 절삭면의 요철을 나타내는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$O_m(i, \phi) = I_m(i, \phi - T) \quad (10)$$

여기서 T 는 기 절삭된 절삭면의 요철과 현재 발생하는 절삭면과의 요철을 나타내기 위한 시간차(time delay)를 나타내는 것으로 여기서는 인서트와 인서트 간을 회전하는데 필요한 시간을 각도로 표시한 것이다.

$$T = \frac{2\pi N}{60 \cdot Z_n} \quad (11)$$

안쪽 모듈레이션과 바깥쪽 모듈레이션과의 차는 절삭시 발생하는 칩두께의 변화를 나타내며 이러한 칩두께 모듈레이션(chip thickness modulation)은 다음과 같다.

$$U(i, \phi) = I_m(i, \phi) - O_m(i, \phi) \quad (12)$$

순간 동적성분(instantaneous dynamic component)은 단위 절삭깊이에 대한 순간 칩두께 모듈레이션에 동절삭력 계수의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF(i, \phi) = K_c \cdot U(i, \phi) \quad (13)$$

순간 동절삭력(instantaneous dynamic component)은 가정4)에서 한순간에서 정절삭력과 동적성분의 합으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$DF(i, \phi) = F(i, \phi) + dF(i, \phi) \quad (14)$$

이 식에서 $F(i, \phi)$ 는 (8)식에 의해 예측된 정절삭력을 나타낸다.

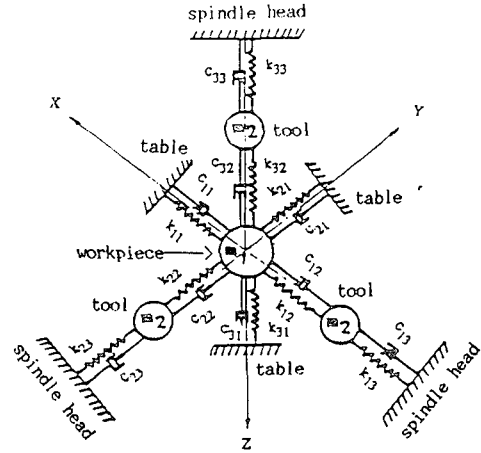


Fig. 3 Vibratory model in the three directional reference system

2.3 동절삭력 계산에

수직 밀링머신의 테이블과 스핀들 헤드를 완전 강체로 가정하고 공작물과 공구의 운동만을 고려한 정면 밀링시스템을 3축 방향으로 나타내면 Fig. 3 과 같은 6자유도계(6 degrees of freedom system)로 표시된다. 이 절삭계에서 K_{1i} , C_{1i} 은 각 축 방향으로 공작물과 테이블과의 강성 및 감쇠 계수를 나타내고, K_{2i} , C_{2i} 는 각각 공작물과 공구간의 강성 및 감쇠계수, K_{3i} , C_{3i} 는 각각 공구와 스핀들 헤드의 강성 및 감쇠계수를 나타낸다.

여기서 $i=1, 2, 3$ 이고 x, y, z 방향을 나타내는 변수이다. 이들 계수들은 절삭력 시험을 통하여 측정된 절삭력 및 변위신호를 분석하여 구한 고유진동수 및 감쇠비와 동일한 값을 갖도록 모델 파라메타들을 결정하였다.⁽²⁾ 본 실험에 사용된 공작기계의 경우 각 시스템 계수들은 Table 2와 같다.

이 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = \{F\} \quad (15)$$

여기서

$$X = \{x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2\}^T$$

$$F = \{F_x, o, F_y, o, F_z, o\}^T$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}$$

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

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

Table 1 Cutting conditions

Milling machine	Vertical Knee Type
Tool Dynamometer	KISTLER(Type 9275 A)
Workpiece	1095 Carbone steel
Spindle rotational speed	365 rpm
Milling type	Up-milling
Depth of cut	1.016 mm
Feed per tooth	0.2176 mm
width of workpiece	45.72 mm
Diameter of cutter	101.6 mm
Number of insert	8
Insert geometry($\gamma R \gamma A \gamma L$)	14°, 8°, 20°
Spindle eccentricity	0.1 mm
Sampling time	0.0005 second
K_T, K_R, K_A	2500, 0.67, 0.375
Number of data	1024

Table 2 Model parameters of the dynamic cutting system

parameters	values	parameters	values
m_1	3	m_2	1
$C_{11} C_{21} C_{31}$	400	$K_{11} K_{21} K_{31}$	1.4×10^7
$C_{12} C_{22} C_{31}$	200	$K_{12} K_{22} K_{32}$	1.2×10^7
$C_{13} C_{23} C_{44}$	400	$K_{13} K_{23} K_{33}$	1.8×10^7

3. 시뮬레이션 및 실험

모델로부터 예측된 변위 및 절삭력과 실측된 값들을 비교하기 위하여 동일 절삭조건에서 계산 및 절삭실험을 행하여 비교분석 하였다.

3.1 절삭실험장치

절삭 시험장치의 개략도는 Fig. 4에서 나타내었으며 실험에 사용된 측정기기와 절삭조건을 Table 1에 나타내었다.

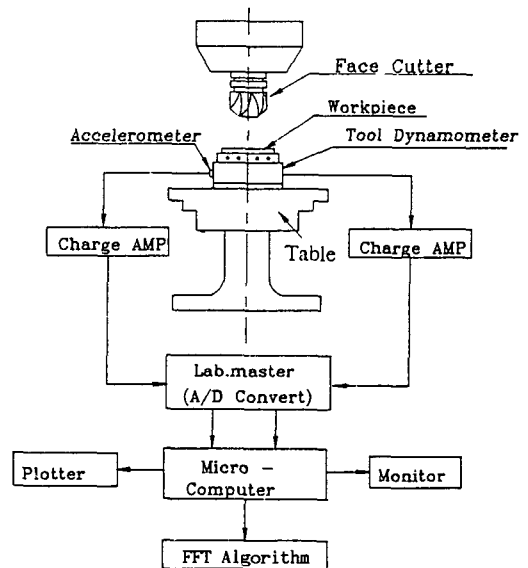


Fig. 4 Schematic diagram for experimental set-up

3.2 시뮬레이션 및 시험결과

식(15)로 부터 변위 계산을 위해 수치적분법, Wilson- θ 법을 이용하였으며, 초기 가진력 $[F]$ 는 식(8)로 부터 0.0005초 간격으로 계산된 정절삭력이 사용되었다. 수치적분법에 의해 계산된 변위들은 (9) 및 (10)식으로 부터 안쪽 및 바깥쪽 모듈레이션을 구하여 (13)식에 의해 동적성분을 구한 다음 (14)식으로 부터 동절삭력이 계산된다. 동절삭력 계산을 위한 흐름도는 Fig. 5에 도시하였다.

0.0005초 간격으로 계산된 X방향의 변위와 모듈레이션 변화를 Fig. 6에 도시하였으며 Fig. 7은 이를 고속푸리에변환(fast fourier transform)을 이용하여 주파수 영역으로 나타낸 것이다. 또한 칩두께 모듈레이션은 (13)식에서 나타낸 바와 같이 안쪽모듈레이션과 바깥쪽 모듈레이션의 차로 그림 8에 도시하였다. Fig. 7(c)와 (d)에 나타난 것과 같이 칩두께 모듈레이션에서 저주파수 영역의 성분들이 매우 낮은 값을 보이고 있는 것은 질량1과 질량2의 변위 성분들이 낮은 주파수 영역에서는 위상차가 거의 없어서 상대변위 성분이 작으나 고유진동수 부근에서 그 변위차가 크기 때문에 고유진동수 부

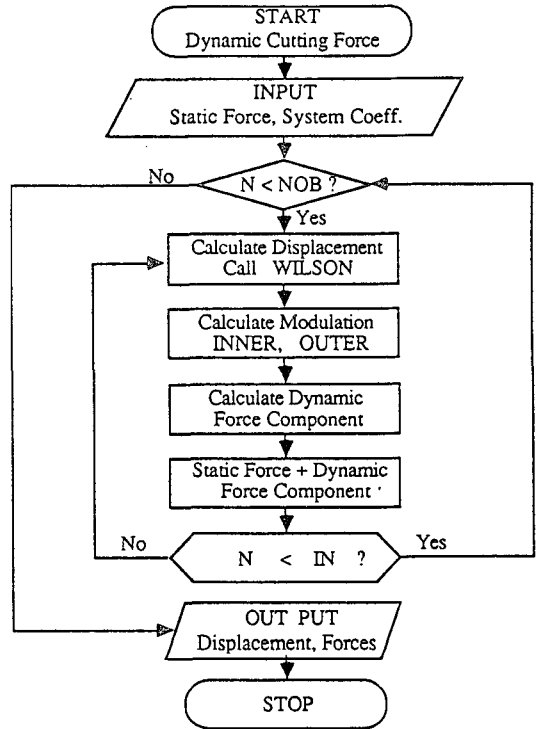


Fig. 5 Flow chart for dynamic cutting force

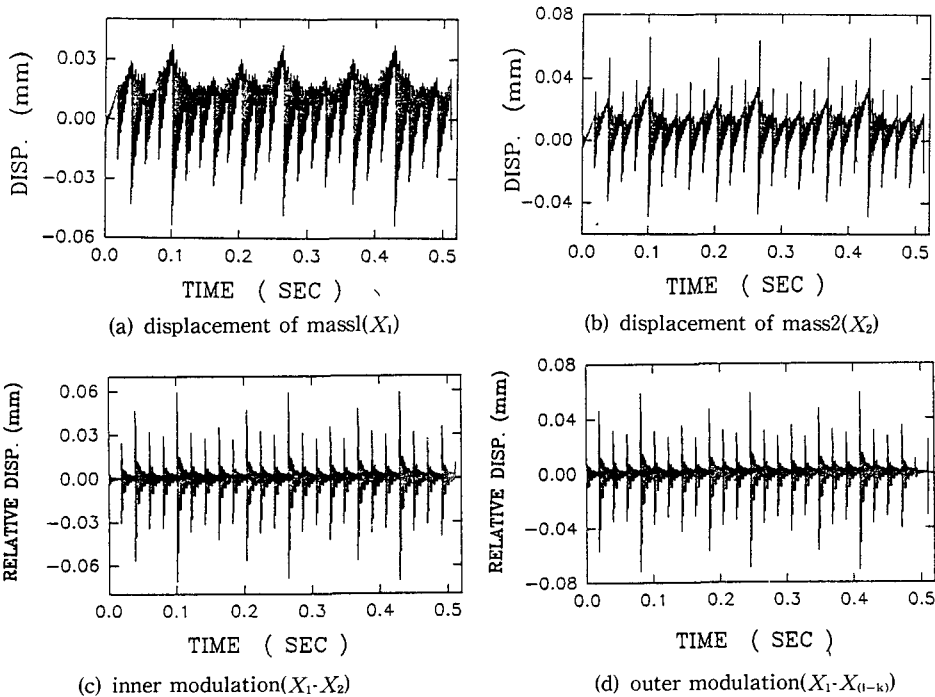


Fig. 6 Simulated displacements and modulations in X direction

근의 파워 값이 큰 것으로 사료된다.

정절삭력과 동절삭력 및 실측 절삭력을 Fig. 9~11에 도시하였다. 3축 방향의 절삭력은 모두 저주파수 영역에서 정절삭력, 동절삭력 및 측정치와 매우 유사함을 알 수 있으나 고주파수 영역에서는 정절삭력에서는 나타나지 않는 성분이 동절삭력과 측정 절삭력에서 나타난다. 이 성분들은 정절삭력

모델에서 고주파수 성분들을 제거하여 비교하기 때문에 정절삭력 모델에서는 고려되지 않는 성분들이다.

Fig. 9의 시뮬레이션에 의한 동절삭력(b)와 측정치(c)는 시간영역에서 피크 값들이 거의 비슷함을 볼 수 있으나 정절삭력(a)에서 (-)피크 값들은 상당한 차이를 보이고 있다. 이것을 주파수 영역에서

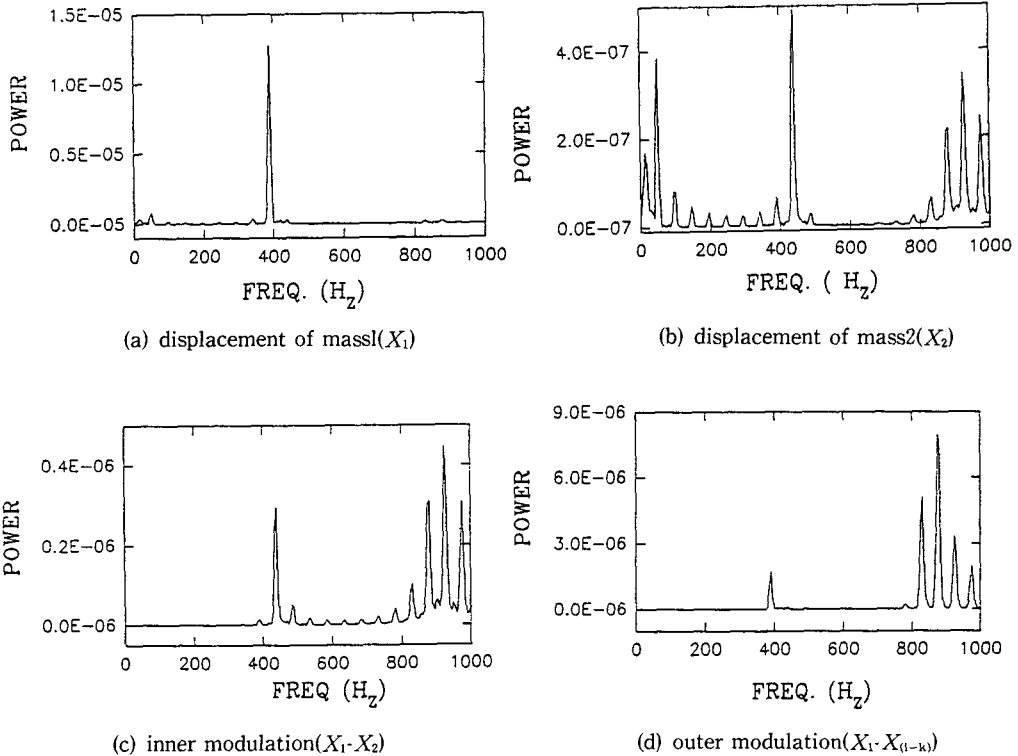


Fig. 7 Spectra of simulated displacements and modulations in X direction

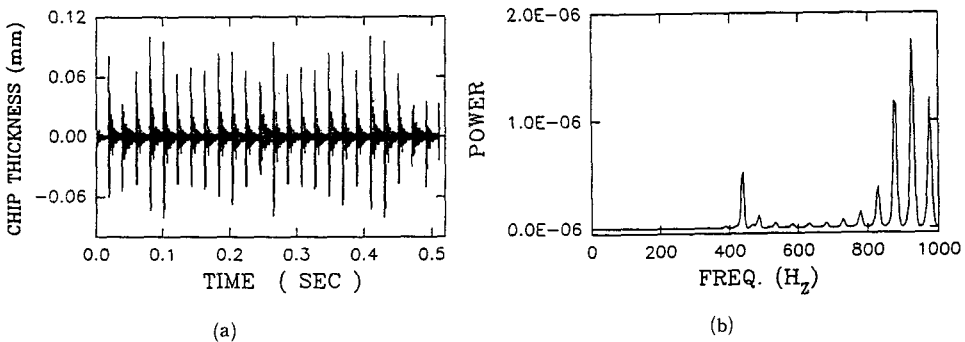
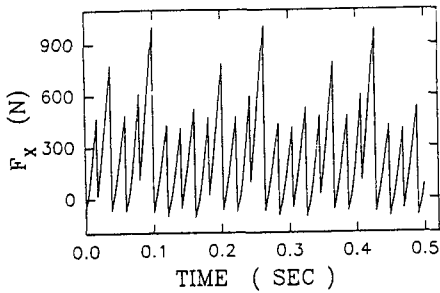


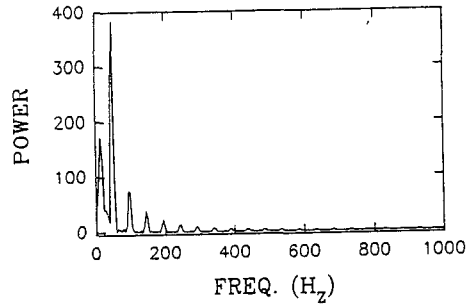
Fig. 8 Chip thickness modulations in time and frequency domains

비교해 보면 시뮬레이션에 의한 동절삭력(e)과 측정치(f)에서는 고주파수 성분이 있으나 정절삭력(d)에서는 나타나지 않고 있다. 이것은 동적인 성분이 주로 (-)방향에 크게 영향을 나타내는 것을 알 수 있으며 비록 상대적으로 고주파수 성분이 미미한 것 같으나 시간영역으로 볼때 피크치에는 매우 큰 영향을 나타내는 것을 알 수 있다. 시간영역에서의

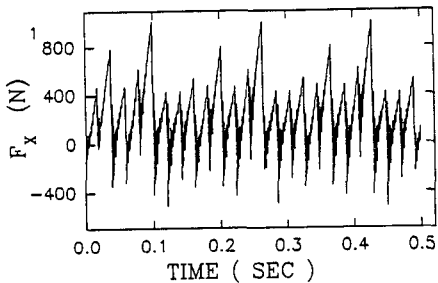
피크값들의 절대크기는 공작기계의 불안정이나 가공면의 조도에 매우 큰 영향을 끼친다는 것을 생각하면 동적인 성분은 매우 중요한 성분들이나 정적인 모델에서는 고주파수 영역의 동적인 성분들을 제거하는 결과가 되어 절삭력 특성을 파악하는데 문제가 되는 것으로 생각한다. 이러한 경향은 Fig. 10과 11의 Y 및 Z방향의 절삭력 성분들도 같은 현



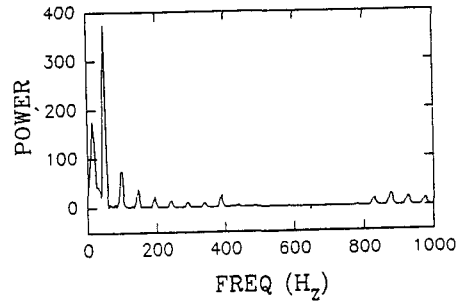
(a) simulated static cutting force



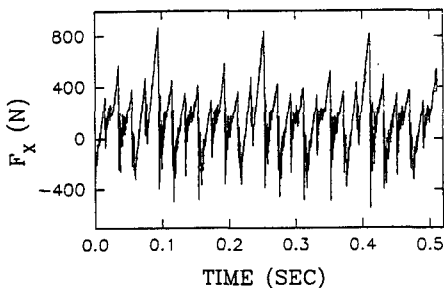
(d) simulated static cutting force



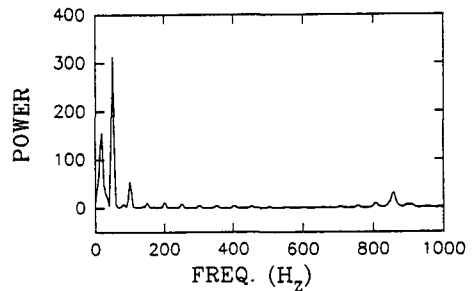
(b) simulated dynamic cutting force in time domains



(e) simulated dynamic cutting force in frequency domains



(c) measured cutting force in time domains.

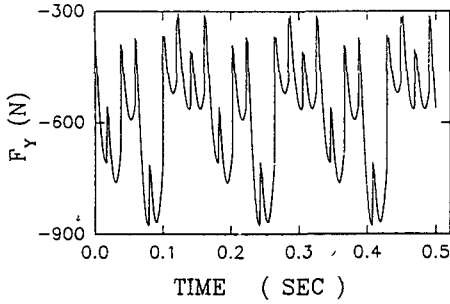


(f) measured cutting force in frequency domains

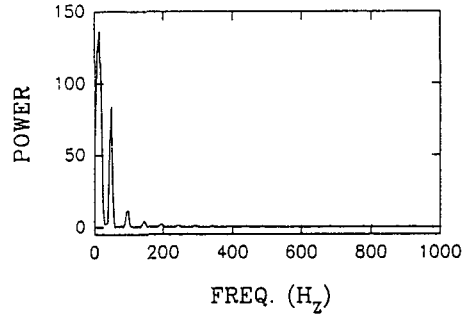
Fig. 9 X-direction cutting forces in time and frequency domains

상으로 나타나고 있다. Z방향의 성분이 그 영향이 가장 작게 나타나는데 이것은 3축 방향중에서 Z방향의 강성이 가장 커서 이 방향의 진동성분이 작기 때문에 동적인 성분의 발생이 가장 작게 발생된 것으로 생각된다. 일반적으로 경미한 절삭조건이나 가공이 용이한 소재의 절삭에는 동적인 성분이 경

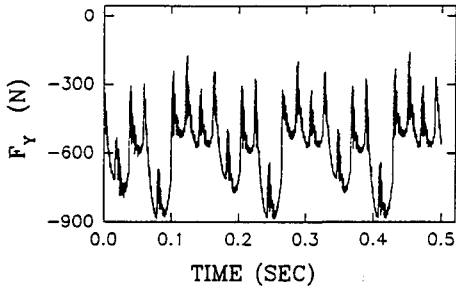
미하여 정절삭력의 예측만으로 충분할 경우가 많으나, 중절삭이나 난삭재의 가공에서는 공작기계의 변위가 크게 발생하여 동적성분인 고주파수 영역의 성분들이 시간영역에 큰 피크를 형성하여 공작기계의 안정성이나 가공면의 조도 등에 큰 영향을 끼칠 것으로 사료된다.



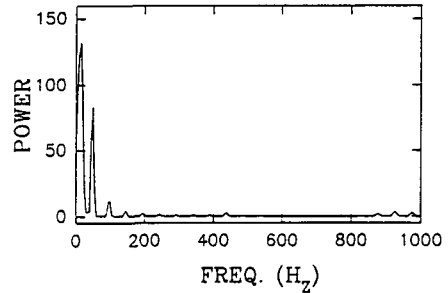
(a) simulated static cutting force in time domains



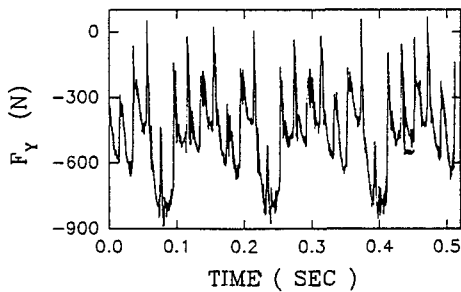
(d) simulated static cutting force in frequency domains



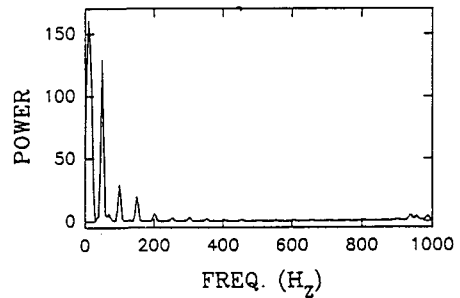
(b) simulated dynamic cutting force in time domains



(e) simulated dynamic cutting force in frequency domains

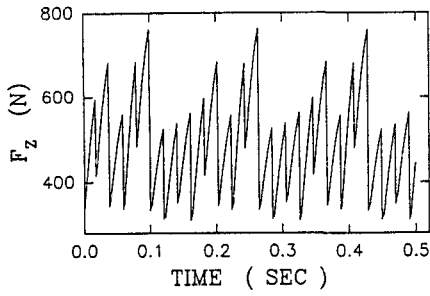


(c) measured cutting force in time domains

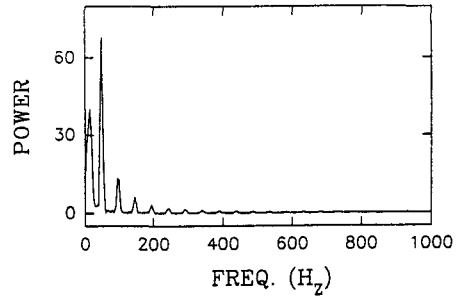


(f) measured cutting force in frequency domains

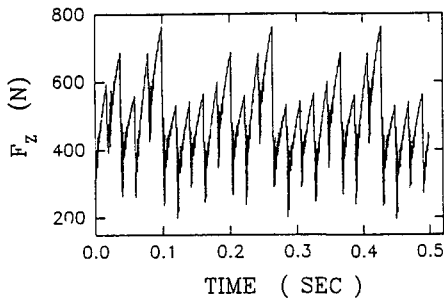
Fig. 10 Y-direction cutting forces in time and frequency domains



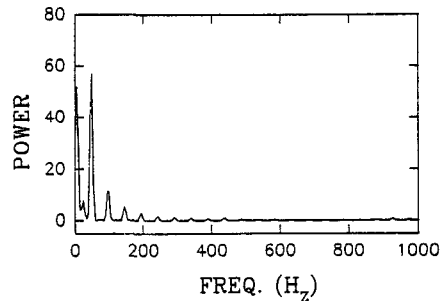
(a) simulated static cutting force in time domains



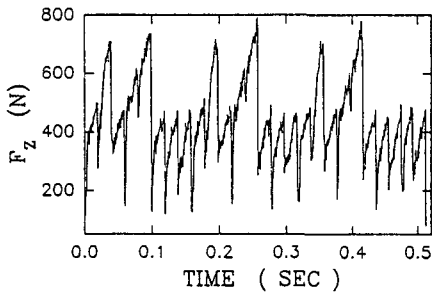
(d) simulated static cutting force in frequency domains



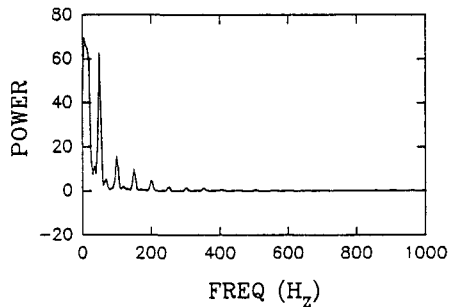
(b) simulated dynamic cutting force in time domains



(e) simulated dynamic cutting force in frequency domains



(c) measured cutting force in time domains



(f) measured cutting force in frequency domains

Fig. 11 Z-direction cutting forces in time and frequency domains

4. 결 론

폐회로 절삭시스템계(closed-loop cutting system)로 모델링하여 동절삭력을 해석하고 절삭시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 재생진동을 고려한 동절삭력 모델은 정절삭력 모델에 비하여 실측에 보다 근접함을 보였다.

(2) 가공정밀도나 공작기계의 안정성에 영향을 끼치는 시간영역에서 피크치의 크기는 동적성분이 매우 중요한 역할을 하며 동절삭력 모델에서 보다 정밀하게 나타난다.

(3) 칩두께 모델레이션은 저주파수 영역에 비하여 고유진동수 부근에서 크게 나타났으며 이는 두 질량 변위들의 위상차에 의한 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) Ann, T.Y., Eman, K.F. and Wu, S.M., 1986, "Identification of the Transfer Function of Dynamic Processes-A Comparative Assessment," *Int.J.of M.T.D.R.*, Vol.25, No.1, pp. 75~90.
- (2) Cho, D.W., 1986, "A New Multi-Input Analysis and Three Dimensional Cutting Dynamics Identification Method Applied to Milling Operations," Ph D, thesis, Uni. of Wisconsin-Madison.
- (3) Das, M.K. and Tobias, S.A., 1967, "The Relation Between The Static and The Dynamic Cutting of Metals," *Int.J. M.T.D.R. Vol.7*, pp. 63~89.
- (4) Fu, H.J., Devor, R.E. and Kapoor, S.G., 1984, "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.
- (5) Gygax, P.E., 1980, "Experimental Full Cut Milling Dynamic," *Annals of CIRP*, Vol.29, Jan., pp. 61~66.
- (6) Kirk, J.A., Anand, D.K. and Mckindra, C., 1977, "Matrix Representation and Prediction of Three Directional Cutting Forces," *ASME, J. of Engr. for Ind.*, Vol. 99, No.4, Nov., p. 828.
- (7) Kline, W.A. and Devor, R.E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in Milling," *J. of M.T.D.R.*, Vol.23, No.2/3, pp. 123~140.
- (8) Koenigsberger, F. and Sabberwal, J.P., 1961, "An Investigation into the Cutting Force Pulsations during Milling Operations," *Int.J. of M.T.D.R. Vol.1*, pp. 15~33.
- (9) Nigm, M.M., Sadek, M.M. and Tobias, S.A., 1977, "Determination of Dynamic Cutting Coefficients From Steady State Cutting Data," *Int. J. of M.T.D.R.*, Vol.17, pp. 19~37.
- (10) Opitz, H. and Bernardi, F., 1970, "Investigation and Calculation of the Chatter Behavior of Lathes and Milling Machines," *Annals of the C.I.R.P.*, Vol. XVII, pp.335~343.
- (11) Tlusty, J. and Moriwaki, T. and Goel, B.S., 1976, "The Dynamic Cutting Force Coefficient for Some Carbon Steels," P. of 4th NAMRC, May, pp. 287~294.
- (12) Tlusty, J. and Ismail, F., 1983, "Special Aspects of Chatter in Milling," *Trans. of ASME, J. of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in design*, Vol.105, Jan., pp. 24~32.
- (13) Tobias, S.A., 1965, "Machine Tool Vibration," John Wiley & Sons Inc., New York.
- (14) Gygax, P.E., 1979, "Dynamics of Single Tooth Milling," *Annals of CIRP*, Vol.28, pp. 65~71.
- (15) Lin, G.C.I., 1973, "Prediction of Cutting Forces and Geometry in Oblique Machining from Flow Stress Properties and Cutting Conditions," *Int. J.M.T.D.R. Vol.18*, pp. 117~130.
- (16) Martellotti, M.E., 1941, "An Analysis of the Milling Process," *Trans. ASME. Vol.63*, pp. 667~700.
- (17) Ruzhong, Z. and Wang, K.K., 1984, "Modeling of Cutting Force Pulsation on Face Milling," *Annals of CIRP*, Vol.32/1, pp. 21~26.
- (18) Usui, E. and Hirota, A., 1978, "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process, Part I; Basic Cutting Model and Energy Approach," *ASME, J. of Eng. for Ind.*, Vol.100, pp. 222~228.
- (19) 박희덕, 양민양, 1989, "불 엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제13권 제3호, pp. 433~422.
- (20) 이우영, 신효철, 1989, "전단유동응력에 의한 정면밀링의 절삭력 해석," *대한기계학회논문집*, 제13권, 제6호, pp. 1170~1182.
- (21) 김희술, 이상석, 1991, "3축방향의 비절삭계수를 이용한 정면밀링 절삭력 모델 개발," *한국정밀공학회지*, 제8권, 제1호, pp. 116~129.