

# 절삭과정에서 발생하는 동적인 거동 해석

허만성\*

김희술

영남대 대학원

영남대 공대

## I. 서론

최근 컴퓨터 및 제어 기술의 도움으로 기계 가공 분야에 있어 자동화, 정밀화, 그리고 무인화가 급속히 추진되고 있다. 이에 따라 대형화되고 복잡해지는 공작기계의 구조 해석과 정밀가공의 필요에 의해 동절삭 과정에 대한 관심이 더 한층 높아지게 되었다.

동절삭 과정은 Fig.1에 나타난 것과 같이 절삭과정을 공작기계의 구조적인 특성과 순수절삭과정의 특성이 상호작용을 하는 폐회로 시스템으로 표현할 수 있다.<sup>(11)</sup>

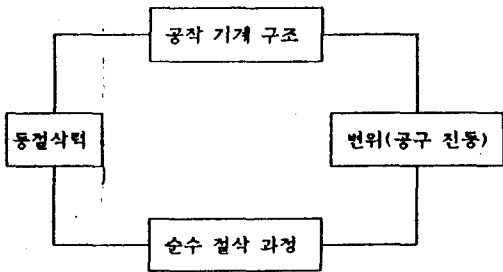


Fig.1 절삭 과정의 폐회로 시스템

공작기계 구조의 특성에 대한 연구는 고유 진동수, 감쇠비(damping ratio), 진동 모우드형태 (Mode Shape) 등을 해석한다.<sup>(6,8)</sup> 순수 절삭과정의 특성에 대한 연구는 지금까지 두가지 용어 즉 동절삭력 계수(dynamic cutting force coefficients)와 절삭과정의 전달 함수(transfer function)에 관하여 연구한다.<sup>(2,5,9)</sup> 동절삭력 계수들은 절삭력 실험에서 공구와 공작물의 상대변위와 절삭력을 측정하여 변위에 대한 절삭력 변동성분을 각 주파수 별로 나타내어 변위에 대한 동절삭력 발생계수(transfer function of cutting process)를 구한 것이다.<sup>(5,10)</sup> 따라서 순수절삭과정을 연구함으로써 동절삭력의 본질을 파악할 수 있다.

본 연구에서는 절삭과정을 폐회로 시스템으로 가정하여 알고 있는 공작기계의 구조적인 모델을 적용하여 순수절삭과정(Cutting Process)의 동적인 거동을 파악하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

공구와 공작물 사이의 순수 절삭 과정을 단순 절삭계(Zero Order System), 1차 절삭계(First Order System)로 가정하여 강성력(K-Force), 감쇠력(C-Force) 및 절삭력 등의 변화를 관찰하여 순수 절삭과정의 동적인 특성을 이론 및 실험을 통하여 해석하는 방법을 제시하고자 한다.

## II. 순수절삭과정의 모델 해석

### 2-1. 단순 절삭계

동절삭력 성분이 단순히 공구와 공작물간의 상대운동에 기인되는 절삭칩의 변동에 의한다고 가정하면 순수 절삭과정은 Fig.2와 같이 단순화 시킬수 있고, 이 모델로부터 절삭과정에서 발생하는 동절삭력 성분 중 절삭강성효과에 대한 거동이 고려된다.

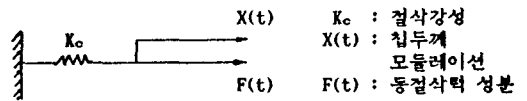


Fig.2 단순 절삭계

단순 절삭계는 동절삭력 성분이 공구와 공작물 사이의 상대 변위에 단순히 비례한다고 가정한다. 따라서 동절삭력 성분은 식(1)과 같이 절삭강성에 칩두께 모듈레이션의 곱으로 나타낼 수 있고, 절삭강성은 평균 비정절삭력과 같이 실험적으로 결정될 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$dF(t) = K_c X(t) \quad (1)$$

동절삭력에 관한 이 모델은 동절삭력을 나타내는 간단한 형태이지만 이론적으로는 가장 빈번하게 사용되며 다음에 이러한 모델에서 발생하는 동절삭력과 절삭실험한 결과를 비교분석하였다.

## 2-2. 1차 절삭계

단순 절삭계로부터 동절삭력에 대한 절삭강성 효과들을 관찰할 수 있으며, 이 계를 토대로 공구와 공작물사이의 절삭 중에 발생하는 마찰 등에 기인되는 절삭감쇠(Cutting process damping)를 고려한다면 절삭계는 Fig.3과 같은 1차 절삭계로 표시할 수 있다.

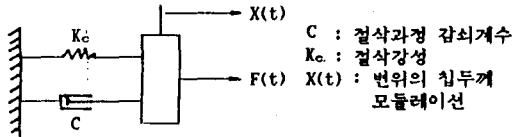


Fig.3 1차 절삭계

Fig.3 에서 동절삭력에 관한 절삭과정 감쇠와 절삭강성을 구할 수 있고, 동절삭력 성분은 식(2)에서 구할 수 있다.

$$F(t) = C\dot{X}(t) + K_0X(t) \quad (2)$$

변위 \$X(t)\$의 칩 두께 모듈레이션은 단순계와 같은 방법으로 얻을 수 있으며, 속도 모듈레이션 \$\dot{X}(t)\$는 질량 1의 속도와 질량 2의 속도차로 나타난다. 절삭 강성력(K-force)은 절삭강성과 칩두께 모듈레이션의 곱으로 구하며, 절삭 과정 감쇠력(C-force)은 절삭과정 감쇠계수와 속도 모듈레이션의 곱으로 구한다.

(2)식은 절삭과정의 감쇠에 의해 발생하는 절삭력 성분과 절삭강성에 의해 발생하는 절삭력 성분과 동절삭력과의 관계식이다. 여러가지 절삭강성력(K-force)과 감쇠력(C-force)의 구성비에 따른 동절삭력 성분변화에 대한 이론해석 결과와 실험한 결과를 비교분석함으로써 감쇠력(C-Force)에 대한 특성을 규명할 수 있다.

## 2-3. 이중 모듈레이션 원리에 의한 동절삭력 모델 (Dynamic force model by double modulation principle)

이중 모듈레이션에 의한 칩 두께의 변화는 공구와 공작물간의 상대 변위에 의하여 결정되는 안쪽 모듈레이션(inner modulation)과 커터의 회전속도와 날수에 의하여 결정되는 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)에 의하여 결정된다.<sup>[1]</sup> Fig.4는 2 자유도인 절삭 시스템을 나타낸 것으로, 본 논문에서는 범용수직 밀링머신에서 \$M\_1\$은 공작물이고 \$M\_2\$는 공구를 나타낸다.

스핀들-완전강체라고 가정하면 스핀들과 공구사이의 강성계수 및 감쇠계수를 \$K\_3, C\_3\$로 나타낼 수 있고 테이블의 강성이 무한히 크다고 가정할 때 테이블과 공작물간의 강성계수 및 감쇠계수를 \$K\_1, C\_1\$으로 나타내고 공구와 공작물간의 강성 및 감쇠계수를 \$K\_2, C\_2\$라고 한다.

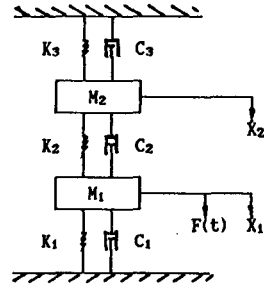


Fig.4 The Cutting system as a two degree of freedom system.

순수절삭과정은 \$M\_1\$과 \$M\_2\$ 사이에서 발생하는 정절삭을 \$M\_1\$에 가하여 변위 및 동절삭력 성분을 시뮬레이션을 통하여 분석할 수 있다.

공구의 회전각이 \$\phi\$ 일때 커터의 순간 변위를 \$X\_1(\phi)\$, 공구의 순간 변위를 \$X\_2(\phi)\$라고 할 때 순간 안쪽 모듈레이션 \$X\_1(\phi)\$는 다음과 같다.

$$X_1(\phi) = X_1(\phi) - X_2(\phi) \quad (3)$$

순간 바깥쪽 모듈레이션 \$X\_0(\phi)\$는 순간 안쪽 모듈레이션으로부터 인서트 한 개의 시간차에 의하여 계산되어지는데 식(4)와 같다.<sup>[4]</sup>

$$X_0(\phi) = X_1(\phi - \frac{2\pi n}{60 Z n}) \quad (4)$$

여기서 \$n\$은 커터의 회전수(rpm)며, \$Zn\$은 정면 커터(face cutter)의 날 수를 나타낸다. 순간 동절력 성분 \$dF(\phi)\$는 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$dF(\phi) = K_0[X_0(\phi) - X_1(\phi)] \quad (5)$$

여기서 \$K\_0\$는 동절삭력 계수를 나타내며, 동절삭력은 정절삭력 성분과 동절삭력 성분의 중첩으로써 구할 수 있다.

## III. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 공작기계는 범용 수직 밀링머신이며, Fig.2와 같이 테이블 위에 시편을 고정시킨 공구동력계를 부착하고 Charge AMP 와 A/D Converter 그리고 Micro-Computer에 연결하였으며 공구동력계 옆면에는 Accelerometer를 부착하였다. 시편 및 공구는 Table.1에 나타낸 바와 같다.

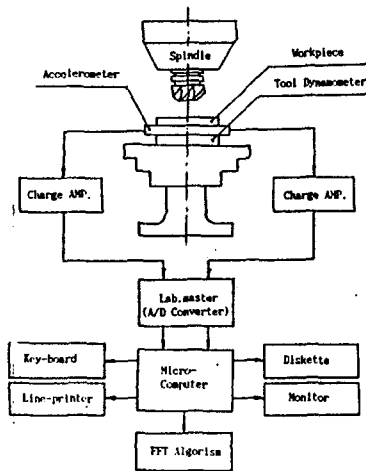


Fig. 5 Schematic diagram for experimental set-up

Table.1 Specification of experimental set-up.

Instrument	Remark
Milling machine	WMV-1100(1100×280(mm <sup>2</sup> ))
Workpiece	S45C(150×100×50×50(mm <sup>3</sup> ))
Face cutter	대한중석 KT식 Cutter
Tool-Dynamometer	KISLER Type 9257A
Accelerometer	One Sokki, VP-36, 9257A
Oscilloscope	Tektronix(2201 Digital storage oscilloscope)
A/D converter	Conversion rate : 30KHz Resolution : 12 bit Input range : ± 10[V]
Micro-Computer	16bit, IBM-pc AT
Charge Amplifier	KISLER Type 5008E DPH-2300

실험방법은 Face Cutting을 행한 후 절삭력물의 Analog값을 Charge Amplifier에서 증폭시킨 후 A/D Converter에서 디지털 값으로 바꾸어 컴퓨터에 저장하였다. 컴퓨터에 저장된 Data의 절삭력 성분의 크기 및 형태를 Time 영역에서 분석하였고, 또한 FFT(Fast Fourier Transfer) analyzer를 이용하여 동절삭성분의 주파수를 분석한 후 모델에서 발생하는 동절삭력성분과 비교분석하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 4-1. 단순 절삭계

Fig. 6, 7은 시뮬레이션에 의한 변위와 칩두께 모듈레이션

을 시간(Time)영역과 주파수(Frequency)영역에서 나타낸 것으로 Fig. 6 (A)에서 (a)와 (b)는 질량 1 과 질량 2 의 변위를 나타낸 것이고, Fig. 6 (B)의 (a)-(d)는 질량 1 과 질량 2 의 변위 및 모듈레이션을 주파수로 나타내었다. Fig. 6 (B)에서 (a) 와 (b)는 질량 1과 2의 변위를 각각 도시한 것으로서 두 질량의 변위 성분은 거의 같은 경향을 보인다. 여기서 20Hz, 50Hz, 300Hz, 900Hz 피크치로 나타났으며 50Hz 성분은 인서트의 절삭주파수로서 스피들의 회전수가 370rpm인 경우의 인서트의 주파수는 50Hz로 나타난다. 300Hz 및 900Hz 성분은 질량 1 및 질량 2의 고유진동수이며 20Hz 성분은 동시에 절삭되는 인서트 수에 의해 발생된 성분으로 생각된다. 안쪽 모듈레이션(inner modulation)과 바깥쪽 모듈레이션(outer modulation)의 주파수는 주 변위 성분이 단지 고주파수에서만 나타나고 저주파수 성분은 매우 적음을 Fig. 6 (B)의 (c)와 (d)에서 알 수 있다. 이러한 현상은 질량 1 과 질량 2 의 변위가 고주파수 영역에서는 위상차가 존재하여서 상대변위가 크게 나타나고 저주파수 영역에서는 위상차가 거의 없기 때문에 두 질량의 상대변위인 안쪽 및 바깥쪽 모듈레이션 값이 낮은 것으로 생각된다. 18 및 50 Hz 성분은 스피들의 회전 및 인서트의 절삭작용에 의해 발생하는 강제 진동에 기인 된 것으로서 두 질량의 변위는 위상차가 적을 것으로 생각된다. Fig. 7 은 칩두께 모듈레이션을 시간 및 주파수 영역으로 나타낸 것으로서 고주파수 영역의 성분들이 주가 힘을 볼수 있다. 이것은 안쪽 및 바깥쪽 모듈레이션에 있어서 설명한 바와 같이 두 질량간의 변위간의 위상차에 의한 것으로 생각된다. Fig. 8, 9는 시뮬레이션한 절삭력을 시간영역과 주파수영역에서 나타낸 것으로 Fig. 8은 정절삭력과 동절삭력 성분 및 동절삭력을 나타낸 것이며 Fig. 9는 정절삭력과 동절삭력 성분 및 동절삭력을 주파수영역에서 나타낸 것이다. 단순 절삭계 시스템에서 정절삭력의 주 힘 성분은 50Hz에서 발생하는데 이것은 인서트의 진동수이며, 동절삭력의 주 힘 성분은 고유진동수 부근에서 발생함을 Fig. 9 (c)에서 알 수 있다. 따라서 동절삭력 성분은 칩 두께 모듈레이션에 비례하며 동절삭력 성분의 주파수 성분은 칩 두께 모듈레이션과 유사함을 알 수 있다. 칩 두께 모듈레이션은 질량 1 과 질량 2 의 상대변위로 얻을 수 있으며 Fig. 6 (B)의 (b)에 잘 나타나 있다. 따라서 동절삭력 성분의 주 힘 성분은 절삭 시스템의 고유 진동수 부근에서 발생하며 절삭공구와 공작물 사이의 위상차에 기인된 것으로 생각된다.

##### 4-2. 1차 절삭계

순수 절삭과정에서 발생하는 절삭강성 및 절삭명칭에 의한 동절삭력의 변화를 관찰하기 위하여 절삭강성과 절삭과정의 감쇠력의 상이한 비율에 따라서 시뮬레이션한 동절삭력 성분들은 Fig. 10 ~ Fig. 14에서 시간영역과 주파수영역으로 구분하여 나타내었다.

다. 이것은 1차절삭계에서 절삭강성력(K-force)과 감쇠력(C-force)비를 다르게 함으로써 순수절삭과정의 특성을 쉽게 파악하기 위함이다.

Fig. 10의 (a)-(d)와 Fig. 11 (a) -(d)는 아래와 같은 조건에서의 동절삭력성분을 시간영역 및 주파수영역에서 나타낸 것이다.

- (a) K-force 90 % C-force 10 %
- (b) K-force 50 % C-force 50 %
- (c) K-force 30 % C-force 70 %
- (d) K-force 10 % C-force 90 %

Fig. 11은 동절삭력 성분의 저주파수 성분이 절삭과정의 감쇠력이 증가될수록 증가하였는데 이는 Fig. 10에 나타난 시간영역의 동절삭력 성분의 진동이 원인인 것으로 생각되며 동절삭력 성분의 저주파수 영역의 성분은 절삭명칭에 의해 발생됨을 알 수 있다. Fig. 12은 절삭강성과 절삭과정의 감쇠력의 다른 비율에 따른 절삭력을 주파수영역으로 나타내었다. Fig. 12에서 감쇠력의 비율이 증가 할수록 저주파수 성분이 증가하는것을 관찰할 수가 있다.

Fig. 13은 절삭과정의 감쇠력이 증가될 때 동절삭력과 동절삭력 성분을 도시한 것이다. Fig. 13에서 동절삭력 성분의 진폭은 절삭강성비가 증가할수록 최소가 되었으며, 절삭과정의 감쇠력이 감소할수록 동절삭력의 피크치는 증가하였고 동절삭력의 진폭은 절삭강성과 절삭과정의 감쇠비가 같을 때까지는 큰 변화가 나타나지 않다가, 절삭과정의 감쇠비가 절삭강성 보다 훨씬 클 때 진폭과 피크치는 증가됨을 알 수 있다. 또한 절삭과정의 감쇠력이 증가될 때 동절삭력과 동절삭 성분에 있어서 850Hz의 동절삭력 성분은 절삭강성과 감쇠력비가 유사할 때 최소가 되었으며 절삭강성과 감쇠력비의 차이가 클수록 증가됨을 알 수 있다. 이것은 절삭강성과 절삭과정의 감쇠력이 서로의 특성상 동절삭력 성분을 상쇄시킴으로써 동절삭력의 피크치 변화의 원인으로 생각된다. 즉 절삭강성과 절삭과정의 감쇠력비의 구성비율의 차이가 클때 피크치가 크게된 원인으로 생각 된다.

Fig. 14 (A), (B)는 측정치와 이론치를 시간영역 및 주파수영역에서 나타낸 것으로서 Fig. 14 (A)의 (a)는 절삭강성력 70%, 절삭과정의 감쇠력 30%을 고려한 시뮬레이션한 절삭력이며 (b)는 측정된 절삭력을 나타낸 것이다. Fig. 14 (B)의 (a)는 절삭강성력 10%, 절삭과정감쇠력 90%인 경우의 절삭력을 나타낸 것이고 (b)는 절삭강성 70%, 절삭과정 감쇠력 30%인 경우의 절삭력이며 (c)는 측정된 절삭력을 나타낸 것이다. Fig. 14(B)그림에서 저 주파수성분을 고려하며 절삭강성력 70%, 절삭과정의 감쇠력 30%인 비율에서 측정치와 잘 일치함을 알 수 있다.

## V. 결 론

밀링머신에서 순수절삭과정에 대한 이론해석과 실험을

행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대부분의 동절삭력 성분은 절삭 시스템의 고유 진동수 부근에서 발생하며, 절삭공구와 공작물 사이의 상태 변화가 고유 진동수 부근에서 가장 크게 발생하고 상이한 위상차에 기인된 것으로 생각된다.
2. 동절삭력의 성분의 크기는 절삭강성과 감쇠력비가 유사할 때 감소하였으며, 절삭강성과 감쇠력비의 차이가 클수록 증가됨을 알 수 있었다.
3. 절삭강성과 절삭과정 감쇠력 비율을 변화시켜본 결과 저주파수 성분의 변화는 절삭과정 감쇠력 비율이 낮아질수록 감소하다가 절삭강성 70%, 절삭과정 감쇠력 30%일때 측정치와 유사하였다..
4. 이 결과를 절삭력 모델에 고려하면 절삭력의 예측 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## 參考文獻

1. Das, M.K. and Tobias, S.A., "The Relation between the Static and Dynamic Cutting of Metals," Int. J. MTR, Vol. 107, pp. 63-89, 1967.
2. Nigm, M.M., Sadek, M.M., Tobias, "Dimensional Analysis of the Steady state Orthogonal Cutting Process", J. of MTR, Vol. 17, pp. 1-19, 1977.
3. Nigm, M.M., Sadek, M.M., Tobias, "Dimensional of Dynamic Cutting Coefficients from Steady State Cutting Data" Int. J. MTR, Vol. 17, pp. 19-37, 1977
4. Tobias, S.A., Machine-tool Vibration, Blacki and Son, 1965.
5. Nigm, M.M., and Sadek, M.M., "Experimental Investigation of the Characteristic of Dynamic Cutting Process", Trans, ASME, J. of Eng. for ind. 1977.
6. Inamura, T. and Sata, T., "Stiffness and Damping Identification of the Element of a Machine Tool Structure" Annals of the CIRP Vol. 28, Jan., pp. 235 - 239, 1979.
7. Shumsherrudin, A.A., "Dynamic Orthogonal Metal Cutting" Univ. Birmingham, Ph.D. Thesis, 1964.
8. Kals, H.J.T., "On the Calculation of Stability Charts on the Basis of the Damping and the Stiffness of the Cutting Process" Annals of CIRP Vol. 4, pp. 297-303, 1971.
9. Peters, J., Vanherck, P., "Machine Tool Stability Tests and Incremental Stiffness", Annals of CIRP, Vol. 17 pp. 225-232, 1969.
10. TAI YOUNG, AHN., "Dynamic cutting process identification by dynamic data system(DDS) models", Univ. Wisconsin, Ph.D., 1985.

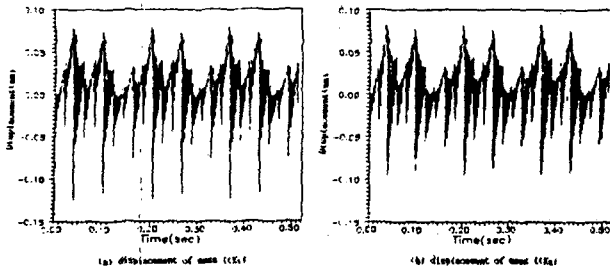


Fig.6(A) Simulated displacements in time domain.

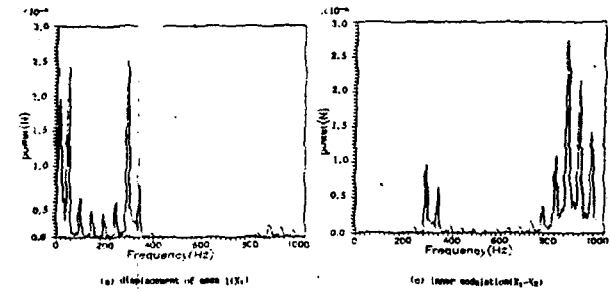


Fig.6(B) Spectrum of simulated displacements in time domain.

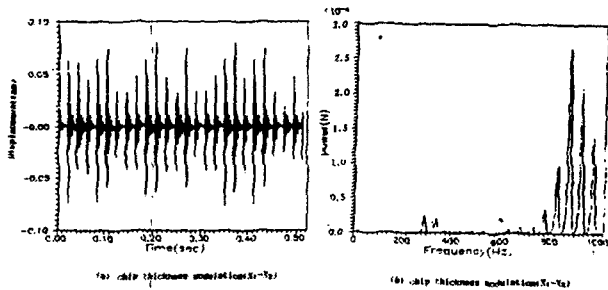


Fig.7 Simulated chip thickness modulation in time domain and frequency domain.

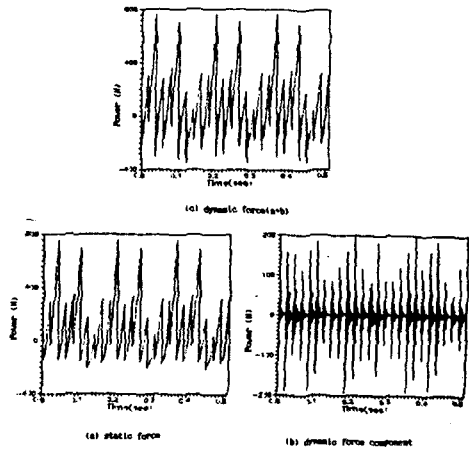


Fig.8 Simulated cutting forces in time domain.

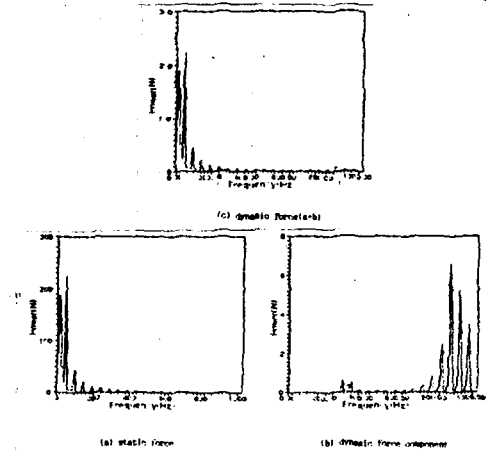


Fig.9 Spectrum of simulated cutting forces.

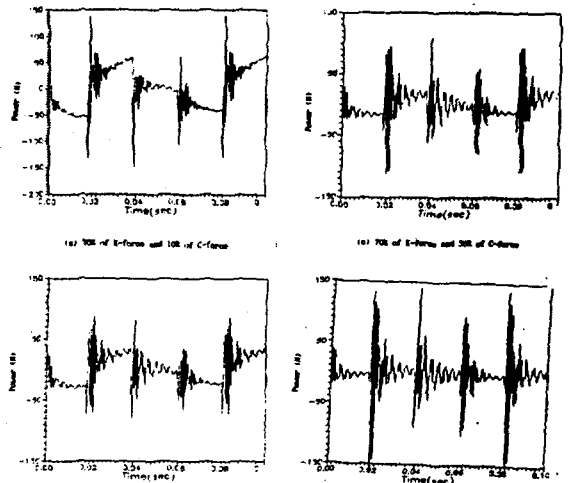


Fig.10 Simulated dynamic force component according to various ratio of the cutting stiffness and cutting process damping force.

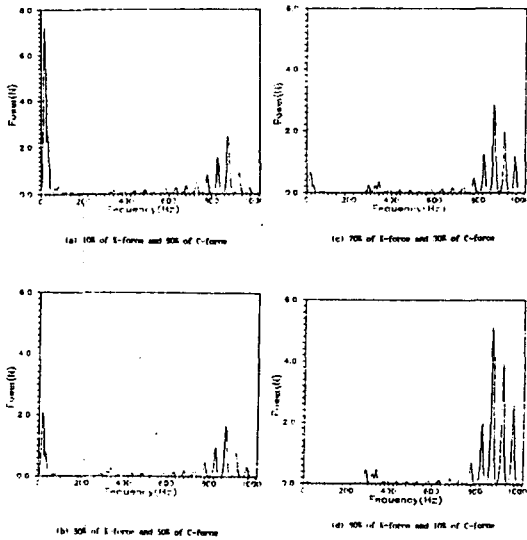


Fig.11 Spectrum of simulated dynamic force component according to various ratio of the cutting stiffness and cutting process damping force.

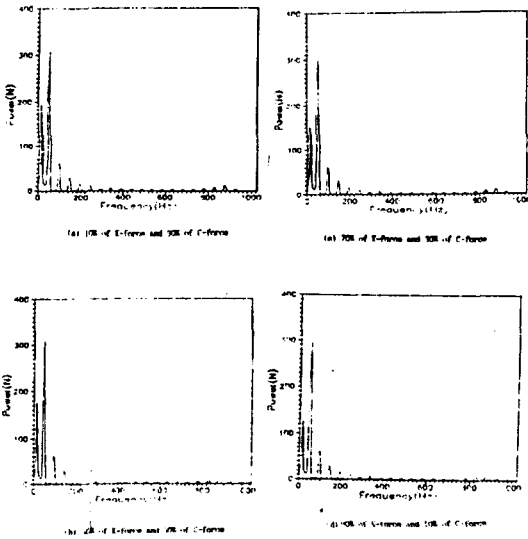


Fig.12 Change of cutting force according to variations of proportions of cutting stiffness and damping forces.

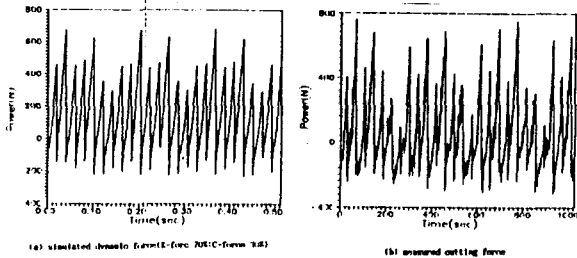


Fig.14(A) Measured and simulated cutting forces in time domain.

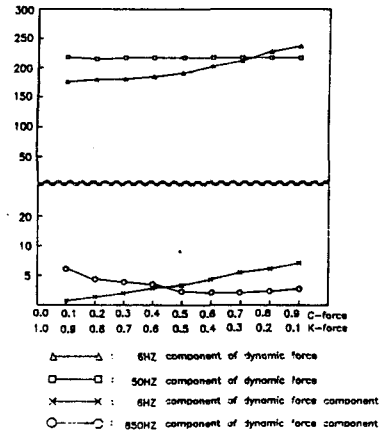
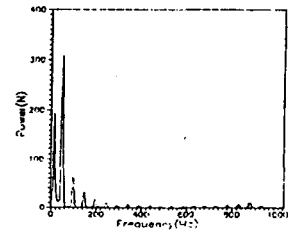
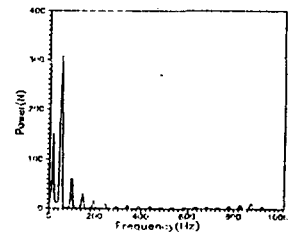


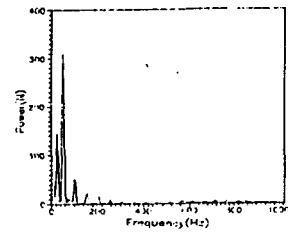
Fig.13 Change of frequency components according to variations in proportions of cutting stiffness and damping forces.



(a) simulated dynamic force (E-force 10% C-force 90%)



(b) simulated dynamic force (E-force 70% C-force 30%)



(c) measured cutting force

Fig.14(B) Spectrum of measured and simulated cutting force.