

# 만능형 머시닝센터의 진동실험 및 절삭안정성 예측

이신영\*, 김종원†

## Vibration Experiment and Stability Prediction of a Universal Machining Center

Sin-Young Lee\*, Jong-Won Kim

### Abstract

There have been many researches on machine tool vibration and chatter to obtain assessment procedure and more productivity. In this paper chatter limit is predicted on a universal machining center which used a parallel mechanism. The prediction method uses the combination of structural dynamic characteristics and cutting dynamics. So the dynamic characteristics were obtained by vibration experiments. We showed the unstable cutting conditions, and from them we could plot the unstable borderlines.

**Key Words :** Universal Machining Center(만능형 머시닝센터), Dynamic characteristics(동특성), Cutting Dynamics(절삭동역학), Chatter(채터)

### 1. 서론

공작기계의 채터를 해석하고 성능을 개선하기 위하여 많은 연구들이 행하여지고 있다<sup>(1-3)</sup>. ISO committee TC39/SC2는 공작기계의 정적 및 동적 거동에 대한 일반적으로 받아들여질만한 조건을 검토하였다<sup>(4)</sup>. 그러나 모든 공작기계의 동적 성능에 대하여 손쉽게 적용할 만한 이러한 인 평가기준은 아직 수립되지 않고 있다.

이 논문에서는 구조의 동특성과 절삭동역학의 조합에 의하여 새롭게 제작된 만능머시닝센터에 대한 채터를 예측하고자하였다. 구조의 동특성은 진동이론에 의한 충격실험법에 의하여 구하였다. 절삭동역학은 3차원 절삭동역학<sup>(5)</sup> 이론 및 칩유동각에 대한 최소에너지 이론<sup>(6)</sup>을 이용하여 해석되었다. 채터해석 결과는 한 조건의 안정/불안정으로 판별되고 이들 결과를 조합함으로써 안정한계 경계선을 구하는 방법을 사용하였다.

\* 발표자, 군산대학교 기계공학부 (sinylee@kunsan.ac.kr)  
주소: 573-701 전북 군산시 미룡동 산68

† 서울대학교 기계항공공학부

## 2. 만능형 머시닝센터

최근에 만능형 머시닝센터가 서울대학교에서 설계 제작되었다. 이 CNC기계는 이클립스에 기초한 것으로, Fig. 1과 같은 쾌속 병렬기구에 기초한 것이다.

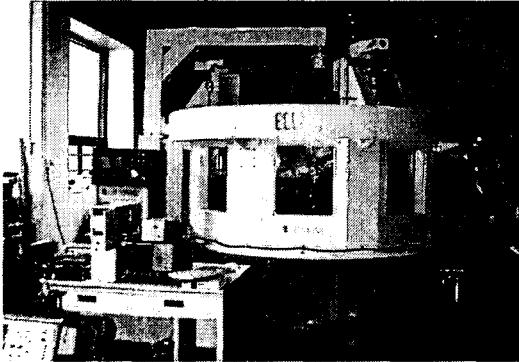


Fig. 1 An universal machining center

이 만능형 머시닝센터의 가공시간을 최소화하기 위하여 5면 가공을 수행할 수 있을 것과 밀링, 선삭 및 연삭과 같은 복합가공이 가능할 것과 같은 목표가 요구되었다.

보통의 머시닝센터는 1면가공을 수행하고, 수직과 수평의 두 그룹으로 분리된다. 본 기계는 보통의 기계에 비하여 설치시간을 줄일 수 있고, 주축을 90도까지 기울여서 공작물을 한번 설치한 후 5면 가공을 수행할 수 있다.

보통의 머시닝센터는 밀링, 선삭 및 연삭 중에서 한 가지의 기능을 수행할 수 있는데 비하여, 본 머시닝센터는 밀링, 선삭 및 연삭을 수행할 수 있다. 선삭 공정을 수행하기 위하여 공구 스핀들은 90도로 기울여지고 수직 공작물 스핀들은 회전한다. 위에 언급한 두 가지 목표를 수행하기 위하여 스핀들 유닛이 완전히 90°까지 기울임각을 갖는 6 자유도 기구를 필요로 한다. 대부분의 병렬형 머시닝센터는 스핀들 기울임각이 30°를 초과하지 않는다. 본 머시닝센터는 일반적인 머시닝센터의 이러한 결점을 갖지 않는다.

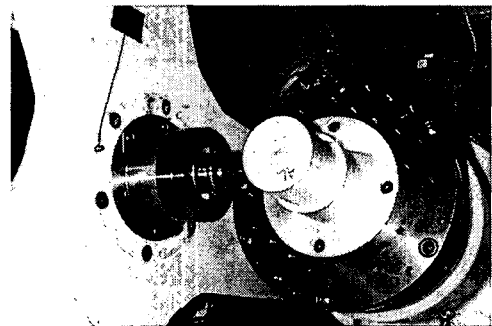
본 만능형 머시닝센터는 6 자유도와 8개의 독립적인 구동 조인트를 갖는다. 세 개의 칼럼으로 이루어져 있고 각 칼럼은 원형 가이드 상에서 독립적으로 구동된다. 이 구동은 서보모터, 링기어와 피니언 기구를 통해서 이루어진다. 각 칼럼은 캐리지를 갖추고, 칼럼 위의 직선 안내면을 따라 수직으로 운동한다. 각 캐리지는 핀 조인트를 통하여 고정 링크가 부착되어 있다. 고정 링크의 다른쪽 끝은 볼-소켓 이

음을 통하여 공구 스핀들 플레이트와 연결된다. 본 머시닝센터는 3 개의 원형 이음과 3 개의 직선 이음을 독립적으로 운동시켜 6 자유도를 구현한다. 공구 스핀들 유닛은 0에서 90도까지 기울여질 수 있고 공작물 주위로 360°회전할 수 있다.

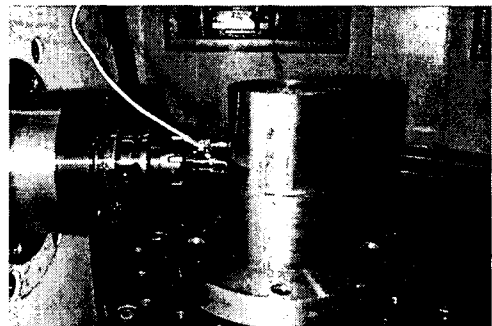
## 3. 구조 동역학

주어진 절삭조건에 의하여 절삭이 수행될 때 절삭력이 발생하고 이 절삭력이 공작물과 공구의 배치에 어떤 변화를 만들기 때문에 공작기계의 전체적인 성능은 구조동역학과 절삭과정의 절삭동역학의 조합에 의하여 지정된다<sup>(5, 7-9)</sup>.

공구에 가해진 외력은 링크와 조인트에 변형을 초래하고, 이 변형에 의해 기구의 전체 정밀도가 영향을 받는다. 그러므로 기구의 강성해석을 주의깊게 수행하여야 한다. 본 논문에서 전체 시스템의 구조동특성을 구하기 위하여 모달테스팅<sup>(10-13)</sup>이 충격 해머, 가속도계, 비접촉변위계 등을 사용하여 Fig. 2와 같이 행해졌다. Figure 3은 공구 스핀들 플레이트의 모드 형상을 나타낸다. Figures 4는 공구 스핀들에

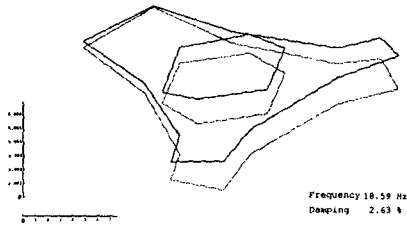


(a) Accelerometer

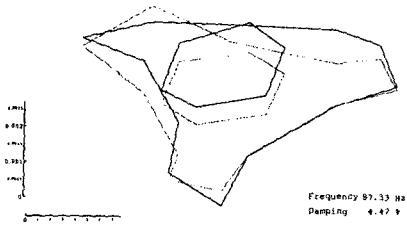


(b) Displacement meter

Fig. 2 Workpiece, tool and sensor in experiment

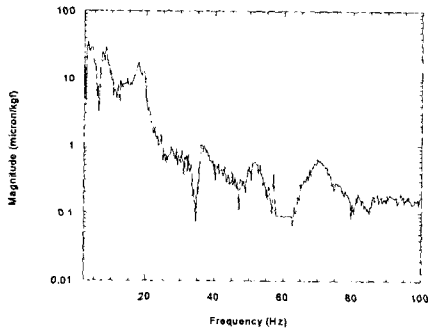


(a) Mode shape at 18.6 Hz

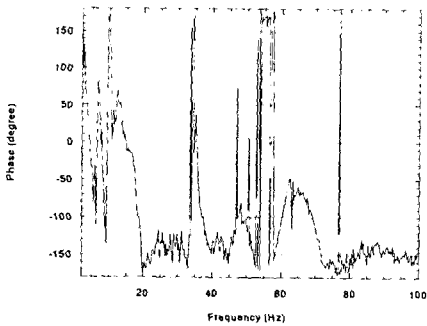


(b) Mode shape at 87.3 Hz

Fig. 3 Mode shapes of the tool spindle plate



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 4 Frequency response functions between a tool and a steel workpiece

장착된 공구와 공작물 테이블에 장착된 공작물 사이의 주파수응답함수를 나타낸다. 이들로부터 다른 형태의 공작기계와 동특성이 다소 다르며 저주파 영역에서 보통의 공작기계보다 큰 것을 볼 수 있다.

## 4. 절삭안정성 예측

### 4.1 한계절삭깊이

공구와 공작물 사이의 상대 진동은 주파수에 의존하므로 복잡하다. 공작물의 기하학적 정밀도 및 표면거칠기에 악영향을 미치므로 피하거나 감소하여야 한다<sup>(7, 8, 14)</sup>. 절삭강성계수를  $K$ , 중첩계수를  $\mu$ , 절삭에서 내부 모듈레이션과 외부 모듈레이션 사이의 시간지연을  $\epsilon$ , 외부를 첨자  $o$ , 내부를 첨자  $i$ , 공작기계의 구조강성계수를  $P$ 라고 한다. Figure 5는 3차원 절삭계의 블록선도를 나타낸다<sup>(8)</sup>.  $T(s)$ 는  $\mu \cdot e^{-j\epsilon}$ 이다.  $X_i$ 는 내부 모듈레이션에 기인하는 공구-공작물의 상대진동벡터,  $K_c^{(i)}$ 는 절삭강성 전달함수에 대한 내부 모듈레이션의 기여도를 나타내고  $K_c^{(o)}$ 는 외부 모듈레이션의 기여도를 나타낸다<sup>(9)</sup>. 이 블록선도는 식 (1)과 같다.

$$[(K_c^{(o)}(s) \cdot T(s) - K_c^{(i)}(s)) - P(s)]X_i(s) = 0 \quad (1)$$

해석을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

(1) 공구-공작물의 굽힘 모드가 공작기계 구조의 동특성을 지배한다.

(2) 절삭방향에서의 공구-공작물 상대변위가 다른 방향의 절삭력의 변화에 영향을 끼치지 않는다.

위의 두 가지 가정에 의해 공작기계 구조의 강성전달함수는 연성되지 않는다. 이러한 가정들을 정리하면 특성방정식은 다음 식 (2)와 같이 된다.

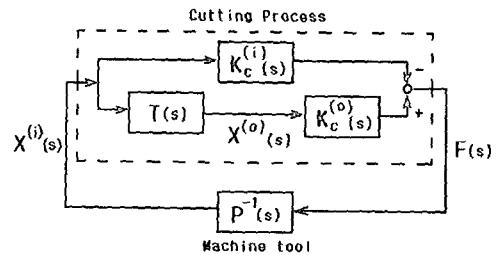


Fig. 5 A block diagram for the chatter loop

$$\begin{aligned} & [(K_{czz}^{(o)}\mu e^{-j\omega\tau} - K_{czz}^{(i)}) - P_{xx}(j\omega)] \\ &= \frac{[K_{czz}^{(o)}\mu e^{-j\omega\tau} - K_{czz}^{(i)}][K_{czz}^{(o)}\mu e^{-j\omega\tau} - K_{czz}^{(i)}]}{[(K_{czz}^{(o)}\mu e^{-j\omega\tau} - K_{czz}^{(i)}) - P_{zz}(j\omega)]} \quad (2) \end{aligned}$$

$P_{zz}$ 가 무한히 크다고 하면 식 (2)의 우변은 0이 된다.  
즉,

$$K_{czz}^{(o)}(j\omega) \cdot \mu \cdot e^{-j\omega\tau} - K_{czz}^{(i)}(j\omega) = P_{xx}(j\omega) \quad (3)$$

위의 식 (3)의 좌변은 배분력 방향에서 3차원 절삭과정의 직접강성 전달함수를 나타내고 우변은 같은 방향에서의 공작기계 구조의 직접강성 전달함수를 나타낸다. 주어진 절삭 조건에서 식 (3)이 만족되면 공작기계-공작물과 절삭과정은 체터의 경계선에 있다고 고려된다. 식 (3)을 만족시키는 절삭깊이를 한계절삭깊이라 한다<sup>(9)</sup>.

## 4.2 절삭안정성 예측

진동실험 또는 해석으로부터 구조동특성이 주어지고 절삭동역학이 구해지면 절삭안정성을 해석할 수 있다. 체터 시뮬레이션에서 사용한 절삭 조건은 Table 1과 같다. Figures 6~11은 주어진 절삭조건에 대한 체터안정성을 나타낸다.

식 (3)으로부터 주어진 절삭조건에서의 안정 및 불안정을 판별할 수 있고, 각각의 절삭조건에 대한 결과로부터 Fig. 6 등과 같은 불안정 경계선을 작도할 수 있다. 이 경계선은 절삭속도, 이송속도, 노즈반경 등의 절삭조건에 의존하며, 노즈반경이 감소할수록, 이송이 증가할수록 안정한

Table 1 Cutting conditions in simulation

| Item                    | Unit   | Values        |
|-------------------------|--------|---------------|
| Spindle speed           | m/min  | 50 ~ 150      |
| Feedrate                | mm/rev | 0.1, 0.2, 0.4 |
| Depth of cut            | mm     | 0.1 ~ 4.0     |
| Nose radius             | mm     | 0.4, 0.8      |
| Side cutting edge angle | degree | 45            |
| End cutting edge angle  | degree | 45            |
| Side rake angle         | degree | 0             |
| Back rake angle         | degree | -7            |

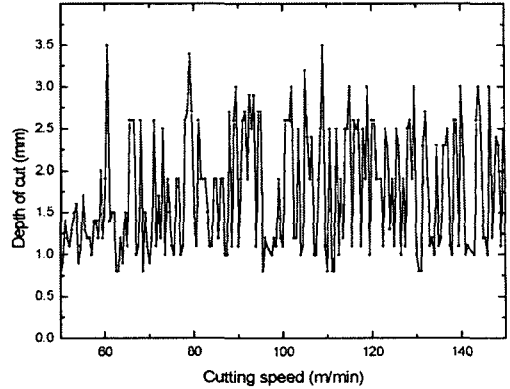


Fig. 6 Unstable borderline for nose radius 0.8 mm, feed 0.1 mm/rev

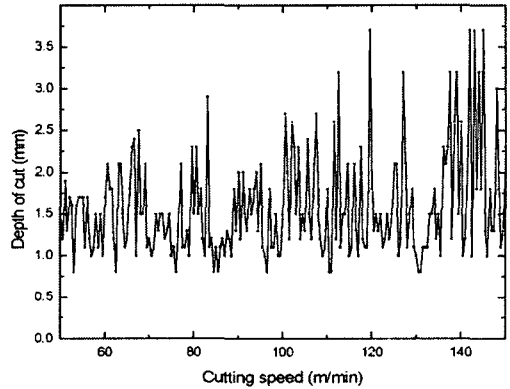


Fig. 7 Unstable borderline for nose radius 0.8 mm, feed 0.2 mm/rev

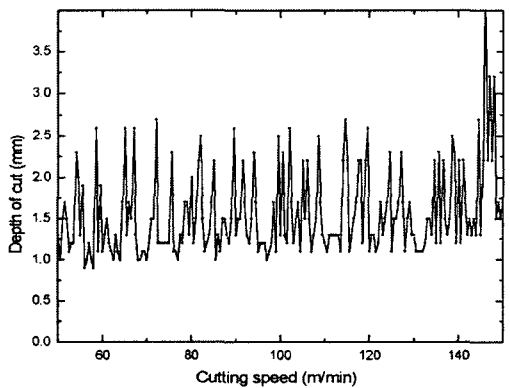


Fig. 8 Unstable borderline for nose radius 0.8 mm, feed 0.4 mm/rev

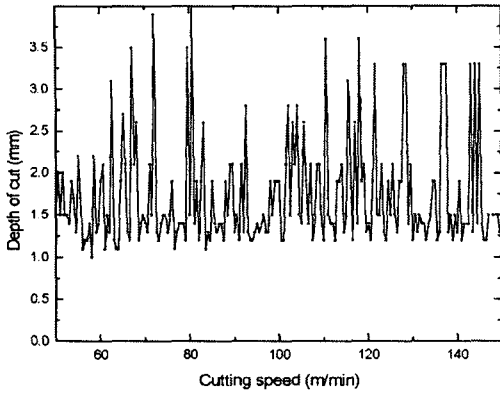


Fig. 9 Unstable borderline for nose radius 0.4 mm, feed 0.1 mm/rev

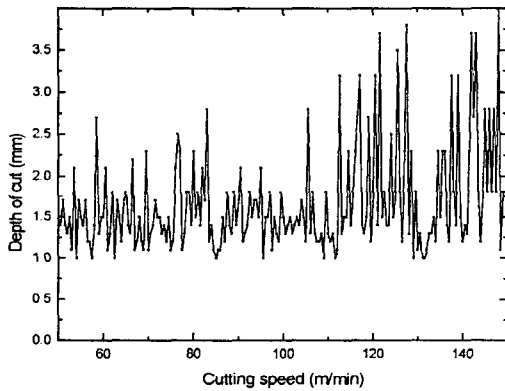


Fig. 10 Unstable borderline for nose radius 0.4 mm, feed 0.2 mm/rev

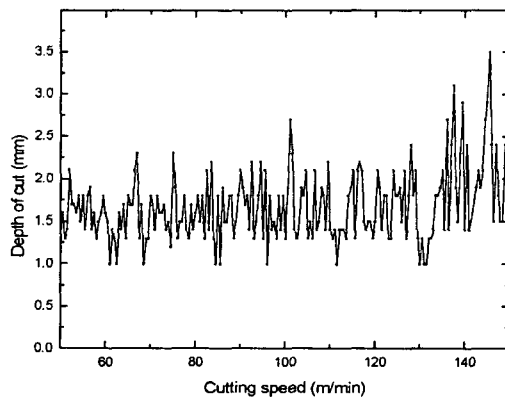


Fig. 11 Unstable borderline for nose radius 0.4 mm, feed 0.4 mm/rev

절삭깊이는 증가한다. 구조동역학이 주파수에 의존하므로 절삭속도가 증가할 경우는 안정성이 다양하다. Figures 6~12에 주어진 결과를 보면 이 chatter 시뮬레이션으로부터 새롭게 개발된 만능형 머시닝센터가 다른 보통 공작기계와 같이 강의 다듬질 가공에 잘 사용될 수 있다.

## 5. 결론

주어진 절삭조건에 의하여 절삭이 행해질 때 절삭력이 발생하고 이 절삭력은 공작물과 공구의 배치에 변화를 초래하므로, 공작기계의 전체 성능은 구조동역학과 절삭동역학의 조합에 의하여 정해진다. 본 논문에서는 실험모드해석 방법에 의하여 만능형 머시닝센터의 구조동역학을 조사하였고, 이 결과와 절삭동역학 자료에 의하여 전체적인 성능을 평가하였다. 불안정한 절삭조건을 구하였고 불안정 경계선을 작도하였다. 절삭안정성 시뮬레이션으로부터 새롭게 개발된 만능형 머시닝센터가 다른 보통 공작기계와 같이 강의 다듬질 가공에 잘 사용될 수 있다고 할 수 있다.

## 참고 문헌

- (1) Weck, M., and Teipel, K., 1978, "Assessing the Chatter Behavior of Machine Tools," *Annals of the CIRP*, Vol. 27, pp. 333~338.
- (2) Nigm, M. M., 1981, "A Method for the Analysis of Machine-Tool Chatter," *Int. J. Machine Tool Des. & Res.*, Vol. 21, pp. 251~261.
- (3) Rahman, M., and Ito, Y., 1981, "Some Necessary Considerations for the Dynamic Performance Test proposed by the MTIRA," *Int. J. Machine Tool Des. & Res.*, Vol. 21, pp. 1~10.
- (4) Moriwaki, T., and Iwata, K., 1976, "In-Process Analysis of Machine Tool Structure Dynamics and Prediction of Machining Chatter," *J. of Engg. for Ind., Trans. ASME*, pp. 301~305.
- (5) Sata, T., Inamura, T., and Matsushima, K., 1975, "Analysis of Three Dimensional Cutting Dynamics," *J. of Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo(B)*, Vol. 33, pp. 31~43.

(6) Usui, E., 1971, *Cutting · Grinding Theory (in Japanese)*, Kyoritsu Publishing Co., Tokyo.

(7) Doi, S., and Kato, S., 1956, "Chatter Vibration of Lathe Tools," *Trans. ASME*, Vol. 78, pp. 1127~1134.

(8) Merrit, H.E., 1965, "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter," *J. of Engg. for Ind., Trans. ASME*, Vol. 87, pp. 447~454.

(9) Ssengonzi, J.B., Lee, J. M., and Yum, Y. H., 1982, "A Study on the prediction of the Limiting Depth of Cut in Dynamic Cutting of a Tapered Workpiece," *Trans. KSME*, Vol. 6, pp. 271~281.

(10) Ewins, D. J., 1984, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies press.

(11) Nagamatsu, A., 1993, *Introduction to Modal Analysis (in Japanese)*, Corona Co., Tokyo.

(12) McConnell, K. G., 1996, *Notes on Vibration Frequency Analysis*, Society for Experimental mechanics.

(13) Blake, M. P., and Mitchell, W. S., 1972, *Vibration and Acoustic Measurement Handbook*, Spartan Books, New York.

(14) Arnold, R. N., 1946, "The Mechanism of Tool Vibration in Cutting of Steel," *Proc. Inst. Mech. Engg.*, London, Vol. 154, pp. 261~284.