

고속 CNC 선반의 동특성 해석과 채터 예측

이우석*, 이신영**, 이장무***

Dynamic Characteristics Analysis and Chatter Prediction in High Speed CNC Lathe

Woo Seok Yi*, Sin Young Lee**, Jang Moo Lee***

ABSTRACT

Vibrations in machine tools make many problems in precision, production efficiency, and machine performance. The relative vibration between a workpiece and a tool is very complicated due to many sources. In this study, the dynamic characteristics of a newly developed CNC lathe were analyzed and its chatter characteristics were predicted by a chatter analysis method using finite element analysis and 3 dimensional cutting dynamics. The simulated results showed very complex characteristics of chatter vibration and the borderline of limiting depth of cut was used as the stability limit. To check the validity of this method, cutting tests were done in the CNC lathe using a boring bar as a tool because boring process is very weak due to long overhang. The experimental results showed that the simplified borderline was too low to be considered as limiting depth of cut at which the chatter vibration starts and the stability limits depended on various cutting parameters such as cutting speed, feed and nose radius of tool.

Key Words : Dynamic characteristics (동특성), Chatter analysis (채터해석), Limiting depth of cut (한계절삭깊이), Finite element method (유한요소법), Cutting experiment (절삭실험), Simulation (모사), Boring bar (보링바)

1. 서론

공작기계의 진동 문제에 있어서, 진동 외력에 의한 공구와 피삭재 사이의 상대변위의 거동은 진동수에 따라 변화하는 만큼 정적, 열적 외력에 의한 경우에 비하여 복잡하다⁽¹⁾. 또 상대변위의 원인으로서의 진동에는 기계 내부의 회전부분이나 운동부분의 절삭력 등이 가진력으로 되는 강제진동과, 절삭점 주위의 구조에 따른 진동적인 성질과 절삭

기구와 절삭력이 관련되어 자연발생적으로 진동이 생기는 채터(chatter)로 나눌 수 있다. 어느 경우에도 형상, 거칠기 등의 정밀도에 관련되고 열화를 초래하므로 이에 대한 방진책이 필요하며 기계로서는 운전조건, 가공조건에 관계없이 이들 진동이 잘 생기지 않는 성능상의 설계가 요구된다. 한편, 채터에 대해서는 진동이 발생하는 조건의 관점에서 많은 연구 성과가 축적되어 왔다^(2, 3, 4). 채터는 가공능률을 저해하는 경향으로 나타나기 때문에 가공능

* 서울대학교 대학원

** 군산대학교 기계공학부

*** 서울대학교 기계항공공학부

를 낮추지 않고 제진효과를 향상시키는 적극적인 방진책이 여러 가지로 시도되고 있으나 지금까지는 실용적인 의미에서의 성공에는 아직 이르지 못하고 있다.

본 논문에서는 CNC 선반의 동특성을 해석하고 평가하기 위하여 유한요소법에 의하여 모달해석 및 구조동특성을 계산하고, 전단평면모델과 내부 및 외부 변조를 고려한 동적 모델을 사용하는 3차원 절삭이론에 의하여 절삭동력학을 구하며, 이들 특성을 조합하여 전체 공작기계의 동특성이라고 할 수 있는 채터를 예측하는 방법을 제안한다. 이 방법을 CNC 선반의 채터예측에 적용하고 또한 그 유효성을 확인하기 위하여 절삭실험을 실시하고 예측 결과와 비교하였다.

2. 구조동특성 해석

CNC 선반의 개략적인 구조는 공작물과 척 및 주축재로 이루어진 주축대와 공구 및 공구대로 이루어진 터릿대 부분이 베드에 고정되어 있는 것으로 볼 수 있다. 베드와 주축대 하우징을 전부 모델링하는 것은 계산시간이 오래 걸릴 뿐 아니라 베드의 모드는 실제 절삭시에도 큰 영향을 미치지 않으므로 강체로 가정할 수 있다.

터릿부는 크게 터릿, 보링바, 베어링 및 지지축으로 구성되어 있으며 특히 터릿부분의 커빅 커플링을 모델링에 고려하였다. 커빅 커플링의 자유도를 구속하지 않고 접촉 강성을 고려하여 모델링 하였으며, 실제 CNC 선반에서 절삭 시에 터릿을 고정시키기 위해 작동되는 유압력을 외력으로 주어서 적용하였다. 주축대 부분의 모델은 주축과 척, 공작물, 내장형 모터 및 유압실린더와 베어링 등을 유한요소 모델링 하였다. 내장형 모터는 집중질량으로 처리하였고 베어링은 등가의 강성스프링을 대입하여 계산하였다. 보링바를 사용하여 고속 CNC 선반에서 절삭할 때 주축과 터릿 및 보링바 등으로 구성된 전체 시스템을 유한요소 모델링한 각 부분의 주요 치수는 다음과 같다. 주축은 길이 275mm 최대직경 53mm, 공구터릿은 직경 400mm 두께 90mm, 보링바는 직경 40mm 길이 120mm이다. 위에서 제시한 제원 및 제작 도면을 이용하여 ANSYS로 모델링하고 해석하였고, Table 1은 유한요소 해석 결과이다. Fig. 1은 각각 터릿부의 1차와 6차 모드형상이고, Fig. 2는 각각 주축부의 1차 및

Table 1. Natural frequencies of each assembly (unit:Hz)

Mode No.	Turret assembly	Headstock assembly
1	216	158
2	678	163
3	707	269
4	731	281
5	909	443
6	1128	465
7	1129	703
8	1304	1039

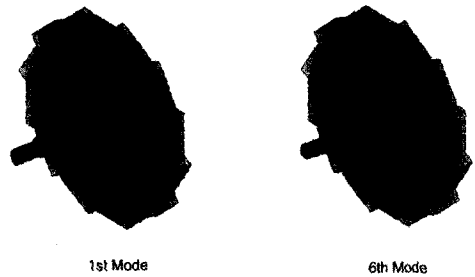


Fig. 1 First and sixth mode shape of turret assembly

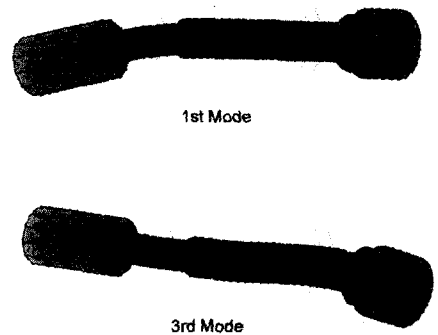
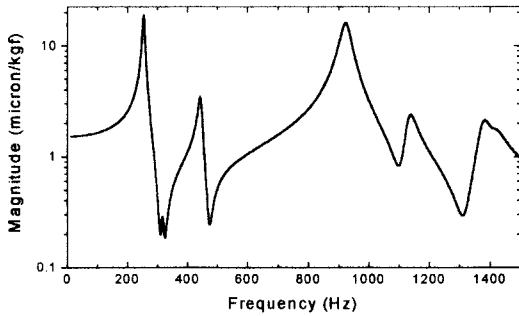
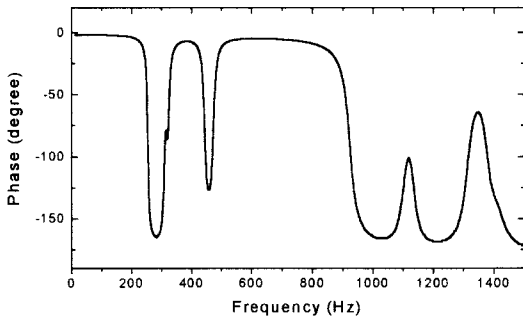


Fig. 2 First and third mode shape of headstock assembly

3차 모드형상이다. 위에서 구한 유한 요소 해석 결과를 통해서 절삭력을 1500N으로 가하고 강제진동해석을 하여 전체적인 전달함수를 계산하였다. Fig. 3은 전달함수의 크기와 위상을 나타낸다.



(a) Magnitude of transfer function



(b) Phase of transfer function

Fig. 3 Transfer function by finite element analysis

3. 절삭동특성과 채터안정성 해석

3차원 절삭에서 절삭기하학은 다음에 의하여 정해진다. 즉, 주절삭날각, 앞절삭날각, 노즈반지름, 직교경사각, 절삭날 경사, 절삭깊이, 이송과 공작물 표면에 수직인 공구 진동의 진폭 X_i 등에 의한다. 또한 절삭 중 칩배출 방향의 변화는 무시할 만하다고 가정된다. 그러면 절삭속도벡터 V 와 평균칩배출속도벡터 V_c 를 갖는 분할 평면 내에서 나타나는 動的 직교절삭 과정은 다음의 가정을 갖는 Das-Tobias이 전단평면모델⁽⁵⁾에 의해서 해석된다.

(가) 전단평면의 방향은 공구-공작물 진동의 상대 진동에 의한 영향을 받지 않는다.

(나) 절삭력은 전단평면의 면적에 순간적으로 비례한다.

(다) 절삭력의 기하학적 방위는 순간적인 절삭

방향에 항상 일정하게 경사진다.

이러한 가정에 기초하여, 분할된 요소에 대한 절삭력과 배분력성분의 증분치 dF'_c 와 dF'_i 는 푸리에(Fourier) 변환으로 수식화된다.⁽⁶⁾

또한 3차원 절삭에서 실제의 절삭합력 F 는 공구와 칩 사이의 마찰력 F_r 과 공구의 경사면에 수직으로 작용하는 힘 F_n 으로 이루어진다. $V_c - F$ 평면 내의 합력 F 는 다음과 같이 세 가지 성분의 벡터 합이라는 가정에 기초하여 동적절삭합력 F 가 얻어지게 된다. 이 가정에 기초를 두어 동적절삭합력의 크기와 방향이 결정되고, 절삭합력을 각 방향으로 분해하여 공구변위 X_i 로 나누어서 절삭, 이송 및 배분력 방향에서의 강성전달함수가 얻어진다.

채터진동은 공작기계 구조와 절삭과정의 상호 작용의 결과라는 것이 알려져 있으며, 동적 직교절삭의 경우에 대한 채터해석에 대하여 많은 연구가 행해졌다. 절삭강성계수를 K_c , 중첩계수를 μ , 내부 모듈레이션과 외부 모듈레이션 사이의 시간지연을 ϵ 이라 하고, 상점자 (o)는 외부 모듈레이션, 상점자 (i)는 내부 모듈레이션, P 를 공작기계-공작물계의 강성계수라고 한다. Fig. 4는 3차원 절삭계의 블록선도이다.⁽⁴⁾ 이 블록선도를 사용하여 식 (1)이 유도된다. $X^{(i)}$ 는 내부 모듈레이션에 기인하는 공구-공작물의 상대진동벡터, $K_c^{(i)}$ 는 절삭강성 전달함수에 대한 내부 모듈레이션의 기여도를 나타내고 $K_c^{(o)}$ 는 절삭강성 전달함수에 대한 외부 모듈레이션의 기여도를 나타낸다. $G^{-1}(s)$ 는 기계

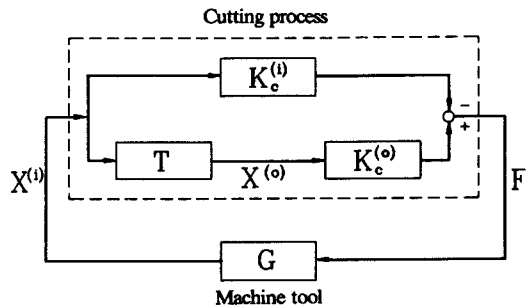


Fig. 4 A block diagram for the chatter loop

구조계의 강성전달함수로 G 는 $[P]$ 의 역행렬이다. 식 (1)로부터 식 (2)와 같은 특성방정식을 얻게 된다.

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

여기에서

$$T(s) = \mu \cdot e^{-js} \quad , \quad G^{-1}(s) = [P]$$

식 (1)이 해를 갖기 위한 조건으로부터

$$\det[A(s)] = 0 \quad (2)$$

여기에서

$$A(s) = [(K_c^{(o)}(s) T(s) - K_c^{(i)}(s)) - G^{-1}(s)]$$

해석을 간단히 하기 위하여 첫째, 공구-공작물의 굽힘 모드만이 공작기계 구조의 동적 특성을 지배하고, 둘째, 절삭방향에서의 공구-공작물 상대변위가 다른 방향의 절삭력의 변화에 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 이 두 가지 가정의 결과로부터, 공작기계 구조의 강성전달함수는 連成되지 않는다. 이러한 가정들을 수식화하여 정리하고, P_{zz} 가 무한히 크다고 하면, 다음 식 (3)과 같이 정리된다.

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

위의 식 (3)의 좌변은 배분력 방향에서 3차원 절삭과정의 직접강성 전달함수를 나타내고 우변은 같은 방향에서의 공작기계 구조의 직접강성 전달함수를 나타낸다. 주어진 절삭조건에 대하여 식 (3)이 만족되면 공작기계-가공물과 절삭과정은 채터의 경계선에 있다고 생각된다. 식 (3)을 만족시키는 절삭깊이를 한계절삭깊이라고 한다.

4. 채터시뮬레이션 및 절삭실험

4.1 채터시뮬레이션

CNC 선반의 동특성을 해석하고 평가하기 위하여 앞에서와 같이 유한요소 해석에 의하여 구조동특성을 계산하고, 2차원 절삭실험 데이터를 원용한 3차원 절삭이론에 의하여 절삭동력학을 구하며, 이 특성을 조합하여 전체 공작기계의 동특성이라고 할

수 있는 채터를 예측하는 채터안정성 해석을 수행하였다. 안정성 시뮬레이션시 적용된 절삭 조건은 Table 2와 같고, 이 때 공구각은 Table 3과 같이 설정하였다. 공작물의 절삭응력은 2차원 절삭 실험의 결과치인 주절삭응력 $117 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ 을 사용하였다. 각 절삭속도에 대하여 절삭깊이를 변경시켜가면서 불안정한 지점을 조사하고, 각 절삭속도에서의 불안정구역의 하한치 경계선을 표시하면 Fig. 5 ~ Fig. 10과 같다. Fig. 5 등에서 한계절삭깊이의 윗부분은 불안정구역, 아랫부분은 안정구역이 된다. 시뮬레이션한 결과를 검토하면, 전체적으로 보아 절삭속도 변화에 따른 안정한계는 톱니형을 하고 있으며, 이 톱니의 아랫부분만을 취하여 단순

Table 2 Cutting conditions used in chatter simulation

Item	Unit	Values
Spindle speed	M/min	90 ~ 160
Feedrate	mm/rev	0.2, 0.4, 0.5
Nose radius	mm	0.4, 0.8
Depth of cut	mm	0.1 ~ 2.5

Table 3 Tool geometry in chatter simulation

Item	Values(degree)
Side cutting edge angle	15
End cutting edge angle	15
Side rake angle	-6
Back rake angle	-10

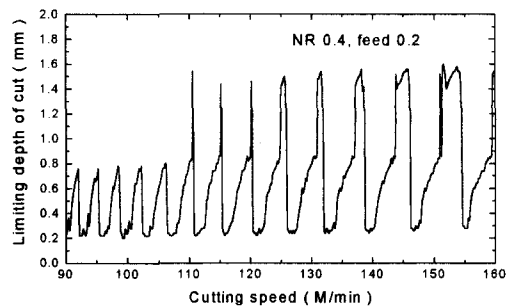


Fig. 5 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.4 mm, feed=0.2 mm/rev.

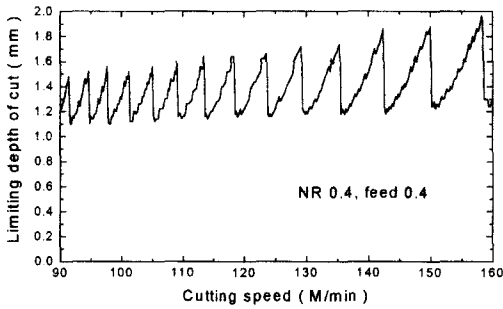


Fig. 6 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.4 mm, feed=0.4 mm/rev.

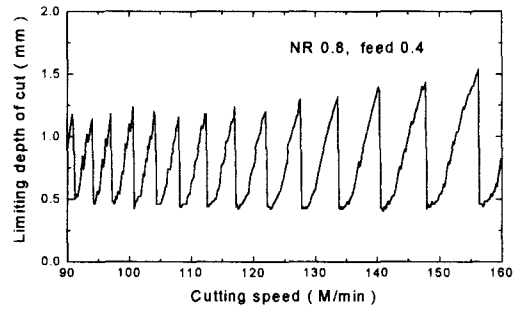


Fig. 9 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.8 mm, feed=0.4 mm/rev.

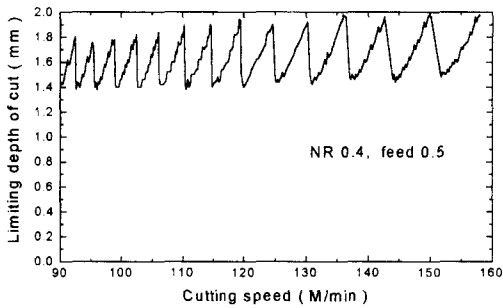


Fig. 7 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.4 mm, feed=0.5 mm/rev.

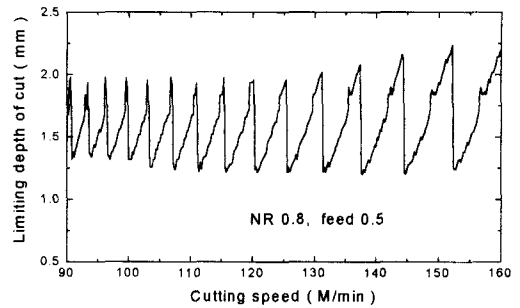


Fig. 10 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.8 mm, feed=0.5 mm/rev.

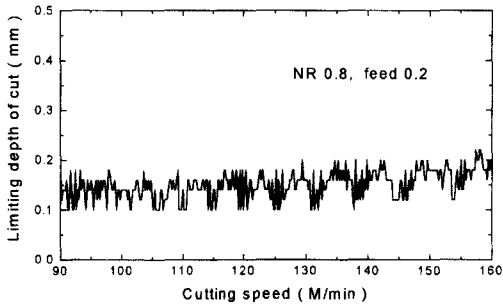


Fig. 8 Theoretical unstable borderline for nose radius=0.8 mm, feed=0.2 mm/rev.

하게 작도한 점근선과는 많은 차이를 나타내게 된다. 또한 이송의 증가에 따라 대체적으로 안정한계 절삭깊이가 증가하고 있고 공구의 노즈반지름이 증가한 경우 안정한계 절삭깊이는 현저하게 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 절삭실험 및 검토

보링바 S32U-PSKNR12를 사용한 절삭실험을 실시하였다. 시편의 크기는 직경 45 내지 50mm로 하였고 측정된 경도의 평균치는 Hv 273이었다. 보링바를 사용하여 원통형 공작물에 대한 절삭을 수행하면서 비접촉변위계로 진동을 측정하고 가공 후의 표면을 관찰하여 안정 또는 채터로 구분하였다. 공구의 노즈반지름 및 회전당 이송에 따른 안정/채

터의 그래프는 Fig. 11 ~ 16과 같다. Fig. 11~16에 서 가로축은 분당 절삭속도, 세로축은 절삭깊이를 나타낸다. Fig. 11 ~ 16은 각각 Fig. 5 ~ 10에 대응 하는 경우의 실험치로써, 그림들을 검토하여 보면 각 경우에 있어서 일률적으로 경계선(borderline)을 작도하는 것이 곤란한 것을 볼 수 있는 한편, 채터 안정한계에 있어서는 대체적으로 일치하는 경향을 보여주고 있다. 또한 동일한 조건에서는 절삭속도가 증가할수록 채터안정한계 절삭깊이가 증가하는 것을 볼 수 있고, 이송만 변화시키는 것을 고려하면 이송이 증가할수록 채터안정한계 절삭깊이가 증가하며, 노즈반지름의 경우에는 노즈반지름이 커짐에 따라 채터안정한계 절삭깊이는 감소한다.

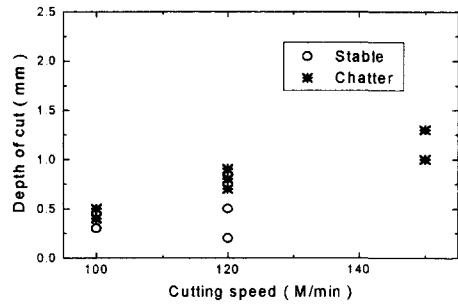


Fig. 13 Experimental stability limit for nose radius =0.4 mm, feed=0.5 mm/rev.

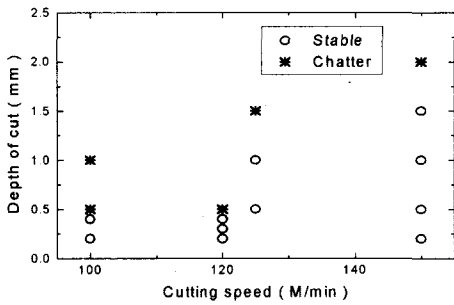


Fig. 11 Experimental stability limit for nose radius =0.4 mm, feed=0.2 mm/rev.

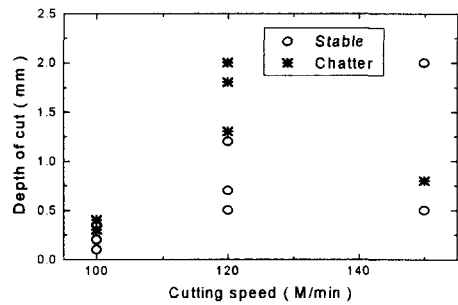


Fig. 14 Experimental stability limit for nose radius =0.8 mm, feed=0.2 mm/rev.

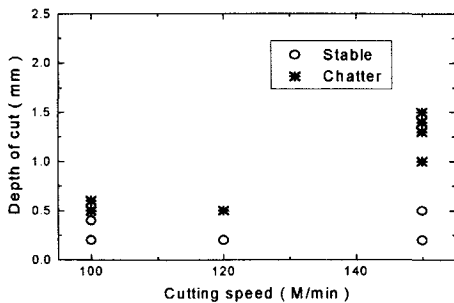


Fig. 12 Experimental stability limit for nose radius =0.4 mm, feed=0.4 mm/rev.

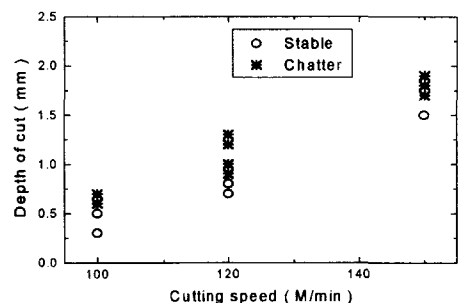


Fig. 15 Experimental stability limit for nose radius =0.8 mm, feed=0.4 mm/rev.

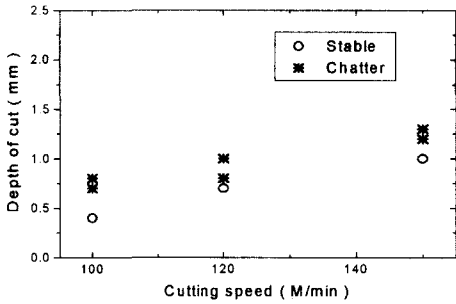


Fig. 16 Experimental stability limit for nose radius =0.8 mm, feed=0.5 mm/rev.

5. 결론

유한요소법에 의한 구조동특성 해석 및 3차원 절삭동역학을 이용하여 CNC 선반의 채터예측을 수행하였다. 시뮬레이션에 의한 채터안정한계 절삭깊이와 절삭실험에 의한 채터안정한계 절삭깊이는 대체적으로 일치하는 경향을 보여주고 있다. 동일한 조건에서는 절삭속도가 증가할수록 채터안정한계가 증가하는 것을 볼 수 있고, 이송만 변화시키는 것을 고려하면 이송이 증가할수록 채터안정한계가 증가하며, 노즈반지름의 경우에는 노즈반지름이 커짐에 따라 채터안정한계 절삭깊이는 감소한다.

참고문헌

1. 星鐵太郎, 機械加工の振動解析, 日本工業調査會, 1990.
2. Arnold, R.N., "The Mechanism of Tool Vibration in cutting of Steel," Proceedings of Inst. Mech. Eng., London, Vol. 154, pp. 261-284, 1946.
3. Doi, S., and Kato, S., "Chatter Vibration of Lathe Tools," Trans. ASME, Vol. 78, pp. 1127-1134, 1956.
4. Merrit, H.E., "Theory of Self-Excited Machine-Tool Chatter," J. of Engineering for Industry, Trans. of ASME, Vol. 87, pp. 447-454, 1965.
5. Das, M.K. and Tobias, S.A., "The Basis of a Universal Machinability Index", Proceedings of the 5th M.T.D.R., Birmingham, pp. 183-198, 1964.
6. 이신영, 이장무, "부분구조합성법을 이용한 NC 선반의 동적 설계," 한국정밀공학회지, 제6권, 제4호, pp. 126-135, 1989.
7. Sata, T., Inamura, T., and Matsushima, K., "Analysis of Three Dimensional Cutting Dynamics," J. of Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo (B), Vol. 33, pp. 31-43, 1975.