

선반가공시 발생하는 채터 현상의  
시뮬레이션에 관한 연구  
A Study on the Regenerative Chatter Simulation  
in Turning Operation

홍민성\* 김종민\*\*

\* 아주대학교 기계 및 산업공학부

\*\* 아주대학교 기계공학과 대학원

**Abstract :**

In metal cutting, chatter is an unstable cutting phenomenon which is due to the interaction of the dynamics of the chip removal process and the structural dynamics of machine tool. When chatter occurs, it reduces tool life and results in poor surface roughness and low productivity of the machining process.

In this study, the experiments have been conducted to investigate phenomenon of the chatter in CNC lathe without cutting fluid. In the experiments, two accelerometers were attached at the tail stock and tool holder and the signals were caught. In order to observe the effect of chatter on the surface roughness profiles, surface roughness profiles were generated under the ideal condition and the occurrence of the chatter based on the surface simulation model using surface-shaping system.

Finally, the result of experiment and simulation have been compared.

**Key words:** surface roughness(표면 거칠기), surface-shaping system(표면 형상 예측 시스템)

**1. 서론**

금속 절삭 가공에서, 채터는 절삭 공정의 동적인 상호 작용과 공구의 구조적인 움직임 때문에 발생하는 불안한 절삭 현상이다. 채터의 중요한 형태 중 하나는 재생하는 채터(Regenerative Chatter)라고 부르는 것으로 이것은 대개 표면의 재생 효과를 발생시킨다. 재생하는 채터가 발생하면, 일반적으로 절삭력이 큰 진폭과 주파수로 빠르게 진동한다. 이러한 이유 때문에 공작물의 표면 거칠기를 악화시키며, 공작 기계의 베어링의 수명을 단축시키고 공구를 쉽게 마멸, 파손시키는 등의 제품의 품질 저하, 치수의 부정확성과 기계 수명의 단축을 초래 할 수 있다. 가공물의 동적 반응은 최종 가공물 표면에 직접적인 영향을 미치므로 채터의 예측은 중요하다. 또한, 효율적인 채터 예측을 위해서는 정확하고도 신뢰성 있는 채터 모델이 필요하다.

지금까지 많은 연구가 가공 중에 발생하는 채터의 원인, 메커니즘, 모델링과 안정성 한계에 대해서 수행되어왔다. 이에 관련하여 많은 연구자들은 가공 공정을 선형적으로 모델링하였다. Kato와 Marui는 가공의 선가공에 의한 표면 기복이 있는 표면과 현가공면 사이의 위상지연에 의해 발생된다고 발표하였다.<sup>[1]</sup> Tlusty와 Ismail

은 회전 시스템의 비선형성 모델을 개발하여 채터가 발생하는 진폭에 관한 모의 실험을 하였다.<sup>[2]</sup> Kondo 등은 다중 재생효과를 고려하여 채터가 시작된 후의 시스템 동적 거동을 해석하였다.<sup>[3]</sup> 이 연구에서는 공구와 가공물 사이의 상대 운동에 의한 저항력은 낮은 절삭 속도에는 안정성을 향상시킨다는 사실과 채터 발생 후 채터 진폭이 일정하다는 것을 보여 주었다. Kaneto 등은 가공공정에서 발생하는 한정된 진폭의 진동과 저항력 현상을 입증하였다.<sup>[4]</sup> 그리고 가공물의 매 회전 시 발생하는 진동 위상차와 관계없이 진동 주파수가 약간 변함에 따라 가공물 표면 현상이 변함을 보여 주었다. Marui 등은 회전시 공구면과 가공물의 마찰력에 의해 진동에너지가 증가하여 지기 발생적 진동이 생성될 수 있음을 지적하였다.<sup>[5]</sup>

본 논문에서는 채터 발생을 수학적으로 모델링하여 채터가 발생 할 때의 가공에 영향을 미치는 진동의 변동량을 예측하고, 채터가 실제 가공에 어느 정도의 영향을 미치며, 표면 형상이 어떠한 지에 관해서 표면 형상 예측 시스템을 사용하여 표면 형상을 시뮬레이션하여, 실제 가공에서 채터가 발생하였을 때 표면 형상과 비교·분석하였다. 또한 실험에서는 채터가 발생할 때와 발생하지 않았을 때의 진동의 크기를 알아내기 위하여 선반의 공구 부분과 심압대 부분에 가속도계를 설치하여 이에 따른 데이터를 획득하였다.

## 2. 이론 배경

### 2.1 일반적인 채터의 특성

채터의 근본적인 원인은 절삭과정과 공작기계구조물의 동적 상호작용에 있다. 절삭하는 동안의 힘은 공구와 공작물 사이에 발생하고 절삭표면에 작용한다. 절삭력의 크기는 공구와 가공물 접촉과 절삭 깊이에 크게 의존한다. 절삭력은 구조물을 탄성적으로 변형시키고, 공구와 공작물의 상대 변위를 일으키며, 또한 상대 변위는 공구-가공물 접촉(미변형 칩 두께)을 바꾸는 원인이 된다. 따라서, 절삭 가공시 공작기계는 폐루프 시스템(Close-loop feed-back system)이 된다.

예를 들면, 가공재료의 단단한 지점은 구조물 변형의 원인이 될 수 있고, 그로 인해 미변형 칩 두께도 변하게 되고, 이로 인해 절삭력을 변화시킨다. 고유 진동모드로 진동하는 기계에 있어서 위와 같은 초기 진동은 스스로 유지되거나 커질 수도 있다. 이러한 불안정한 페루프 절삭 과정 구조는 진동속도에 의한 메커니즘, 재생효과(regenerative-effect) 그리고 모드연성(mode-coupling) 등의 3가지 메커니즘으로 구성되어 있지만, 본 논문에서는 채터에서 가장 영향을 크게 주고 있는 재생하는 채터 메커니즘에 관해서만 살펴보기로 한다.

### 2.2 재생하는 채터 메커니즘

재생불안정은 연속적으로 공구경로가 중첩되는 경우, 즉 공작물의 회전, 또는 이전의 절삭경로에서 절삭된 표면을 공구가 제거할 때 일어날 수 있다.

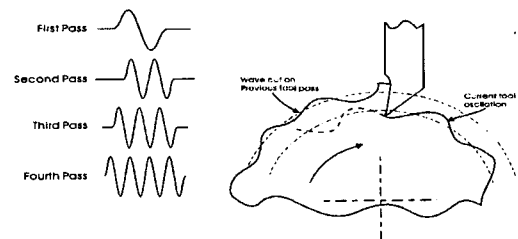


Fig. 1 재생적인 채터의 불안정성

Fig. 1에 나타나 있듯이 절삭과정에서의 외란(disturbance)은 가공될 공작물의 파형 변화를 생기게 한다. 공구의 다음경로에서 미변형 칩 두께는 공구의 현재 운동과 이전 경로에서 표면에 생긴 파형에 의해 결정된다. 이러한 절삭표면의 파형들 사이의 위상에 따라서 절삭력 변동은 연속적인 공구의 진행 후에 증가 될 수 있으며, 진동 주기 중에 공구가 공작물로부터 떨어지는 등의 비선형 현상에 의해 제한을 받을 때까지 진동이 커질 수 있다.

### 2.3 가공 시스템 모델(The Machining System Model)

공작 기계 구조물은 아래 Fig. 2에서 보여지

는 것과 같이 2차 미분 시스템으로써 1-자유도를 갖는 구조 동력학적 모델링으로 표현 할 수 있다. 이 시스템은 X축 방향으로 진동한다. 가진 함수는 자유도에서 절삭력의 요소이다. 재생하는 체터는 시간 지연에 의해서 모델링된다.

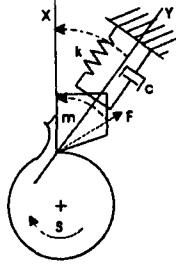


Fig. 2 1-자유도의 기계 구조물

#### 2.4 구조 방정식(Structure Equation)

공작 기계 구조물의 이송 함수로 모델링 된 2차 미분 방정식은 1-자유도를 갖는 진동시스템으로써 공작 기계구조물을 표현함으로써 식(1)과 (2)로 유도할 수 있다.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_x(t) \quad (1)$$

$$m\ddot{x}(t) + 2\xi\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = F_x(t) \quad (2)$$

여기서,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ ,  $\xi = \frac{c}{2\sqrt{k/m}}$  이다.

위의 식을 라플라스 변환을 적용시키면, 공작기계의 이동함수는 주파수 영역에서 얻을 수 있다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{F_x(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} = \frac{1/m}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

여기서,  $s = j\omega$ . 공작기계의 이동 함수는 구조물의 동적 진동에 의해서 결정된다.

절삭력  $F_x$ 는 절삭 과정의 동적 요소에 의해 순간 칩두께  $h(t)$ 와 관련이 있다.

$$F_x(t) = K_c b h(t) \quad (4)$$

여기서,  $b$ 는 절삭 폭,  $K_c$ 는 매 순간 양의 X축

방향으로 절삭력이 투영됨에 따라서 얻어지는 이송속도, 인서트의 기하학, 재료의 물성치 등이 영향을 미치는 절삭력 계수이다.

Fig. 3에서 보여주듯이, 순간 칩 두께  $h(t)$ 는 X축 방향은 칩 두께의 변화로 표면의 파동으로 생성되는데 같은 방향으로 공작물로부터 공구가 이동하는 방향으로 감소한다. 만약 현재 가공 경로가  $x(t)$ 이고 이전 가공 경로가  $x(t-T)$ 라면 두 경로간의 위상차는  $\phi$  이다. 순간 칩 두께  $h(t)$ 는 식(5)로 표현할 수 있다.

$$h(t) = h_0 + x(t) - \mu x(t-T) \quad (5)$$

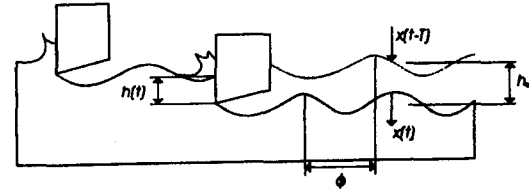


Fig. 3 위상지연에 의한 재생적인 체터

여기서  $h_0$ 는 평균 칩 두께이고,  $\mu$ 는 오버랩 인자이다. 오버랩 인자는 연속적인 패스의 겹쳐지는 수를 나타낸다. 이것은 현재 가공의 오버랩이 이전 가공과의 비를 정의한다. 대부분 가공에서의  $\mu$ 는 1이다. 이러한 상황은 강한 재생 효과(regenerative effect)를 갖는다

#### 2.5 시뮬레이션에 적용된 식

2.3절에서 언급한 진동 시스템을 시뮬레이션에 적용하기 위해 2차 미분 방정식의 해법으로 2계 Runge-Kutta 미분방정식의 풀이법을 이용하여 변위  $x$ 를 구한다. 하지만, 우변항에 시간의 함수에 시간 지연  $T$ 를 쉽게 풀이하기 위하여 시간 지연 효과를 가지는 2개의 sine 함수로 변환하여  $h(t)$ 를 다음과 같이 전개하여 해석하였다.

$$h(t) = h_m - x_{\text{Previous Cut}} + x_{\text{Present Cut}} \quad (6)$$

여기서,  $x_{\text{Previous Cut}} = A_{p1} \sin(\omega t - \phi)$ ,  $x_{\text{Present Cut}} = A_{p2} \sin(\omega t)$  이다.

### 3. 표면 형상 예측 시스템

이 시스템은 공작기계의 기구학과 절삭 공구의 기하학, 공작물과 절삭된 표면의 형상을 예측하기 위한 목적으로 절삭 공구 위의 표면 가공점과 공작물의 상관관계를 포함하는 시스템 모델을 나타내는데 사용된다. 이 시스템은 절삭 운동뿐만 아니라 가공 시 공구의 런-아웃(runout), 기계의 변형, 진동, 고차원 운동까지도 포함되어 있다. 그러므로, 이 모델은 제조 공정의 표면 특성 예측을 위한 일반적인 수학적 모델을 지원한다.<sup>[9][10]</sup>

표면 형상 예측시스템의 모델은 다음 식을 포함한다.

$$r_0 = B_{0,n} B_T e^{\delta} \quad (9)$$

여기서  $r_0$ 는 기본좌표계에서 절삭날까지의 벡터이고  $B_{0,n}$ 과  $B_T$ 는 각각 공구와 공작물간의 기구학적 좌표변환과 공구 좌표계에서 절삭날까지의 기하학적 좌표 변환이다.  $e^{\delta}$ 는 공구좌표계의 원점을 나타내는 벡터이다. Fig. 4는 단인 공구(single-point tool)로서 선반 가공에서의 표면 가공 시스템을 나타낸다. 기본 좌표계  $\{S_0\}$ 에서 절삭날 위의 표면 가공점  $P_k$  벡터  $r_0$ 는 아래와 같이 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$r_0 = B_{0,5} r_5 = {}^N A^6(\theta) {}^N A^1(x) {}^N A^2(y) {}^N A^3(z) {}^E A^1(e_{dx}) r_5 \quad (10)$$

$$r_5 = {}^N A^5(\psi) {}^N A^1(\rho) {}^N A^2(p_{y,k}) e^{\delta} \quad (11)$$

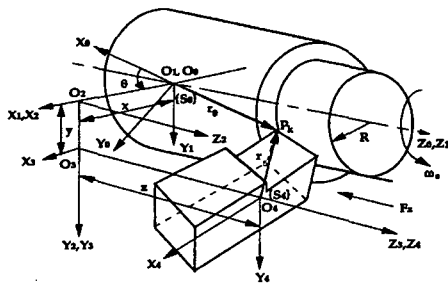


Fig. 4 surface-shaping system of the turning process

### 4. 시뮬레이션과 실험 결과

#### 4.1 시뮬레이션 결과

채터 방정식을 이용하여 채터가 발생할 때의 변위를 획득하고 표면 형상 예측 프로그램에 기반을 두어 식을 적용시켜서 3차원 표면 형상을 얻어내어 표면 거칠기를 얻는 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 이 때 얻어낸 표면 형상을 보았다. 2개의 시뮬레이션을 수행하는데 있어서 채터식에서 사용된 기본적인 변수는 Table 1에 나타내었다. Table 2의 값은 대우 CNC 선반(PUMA6-3A)에 Carbide Insert를 사용했을 때 B&K 장비로 측정했을 때 나오는 값들이다.

Table 1 시뮬레이션의 가공 조건

Cutting Speed (m/min)	200
Feed (mm/rev)	0.1
Depth of Cut(mm)	0.5
Major Cutting Edge Angle(°)	45
Minor Cutting Edge Angle(°)	45
Tool Radius	1.2

Table 2 Tool & tool holder modal test

Natural Frequency (Hz)	1007
Damping Ratio	0.0155
Mass (Kg)	0.725
Damping (N-s/m)	2.9 X 10 <sup>4</sup>
Stiffness (N/m)	142

채터 방정식을 통하여 얻어낸 변위를 이용하여 표면 형상 예측 시스템에 적용하였을 경우 이상적인 경우의 2차원 표면 형상(Fig. 5-a)에 나타내었다. 채터 발생을 적용하였을 때의 2차원 표면 형상(Fig. 5-b)에 나타내었다.

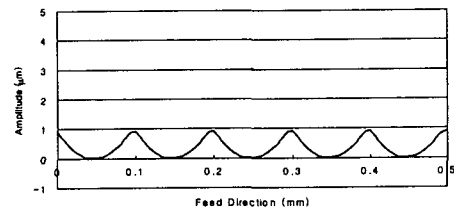


Fig. 5-a 시뮬레이션을 통한 2차원 표면 거칠기 형상 (채터가 발생하지 않았을 때)

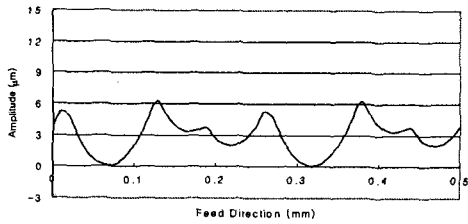


Fig. 5-b 시뮬레이션을 통한 2차원 표면 거칠기 형상 (채터가 발생했을 때)

또한, 이상적인 경우에 3차원 표면 형상은 Fig. 6에 나타내었으며, 채터가 첨가된 후에 3차원 표면 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

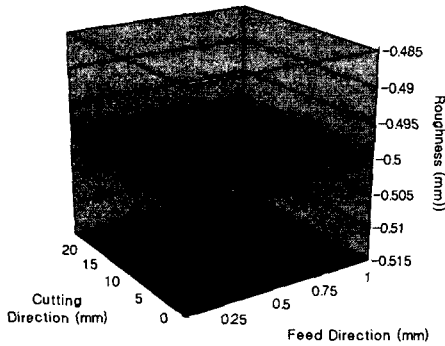


Fig. 6 이상적인 경우의 3차원 표면 형상

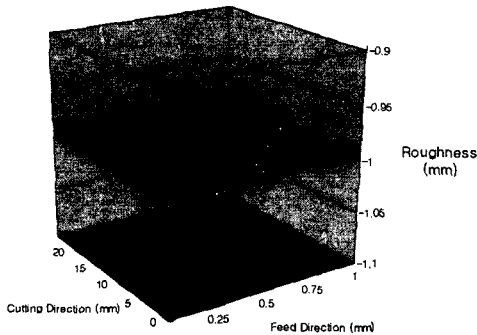


Fig. 7 채터가 첨가된 후의 3차원 표면 형상

시뮬레이션을 통해서 살펴 본 결과 이상적인 경우의  $S_a$ (표면 거칠기 값)는  $0.31 \mu\text{m}$ , 채터가 발생했을 경우는  $3.22 \mu\text{m}$ 로 채터가 발생하지 않았을

때 보다 채터가 발생했을 때의 표면 거칠기는 대략 10배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다.

#### 4.2 실험을 통한 검증

가공시 채터로 인한 표면 거칠기에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 피드와 공구의 노우즈 반경 그리고 절삭깊이이다. 공작기계의 진동이나 특히 채터가 발생한다면, 채터에 의한 표면 거칠기는 크게 영향 받는다. 실험에서는 시뮬레이션과 같은 조건으로 가공하였으며, 이 중 공구의 노우즈 반경이 가장 잘 반영된 공작물의 표면 거칠기 데이터를 취했다. 표면 거칠기의 측정은 Mitutoyo의 SURFTTEST SV-600을 사용하여 측정하였다.

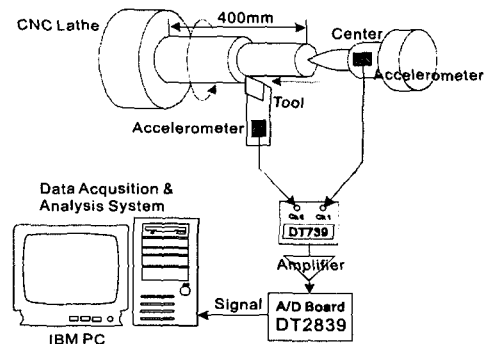
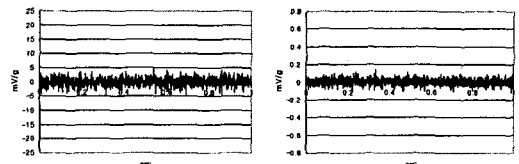


Fig. 8 실험 장비 Block Diagram

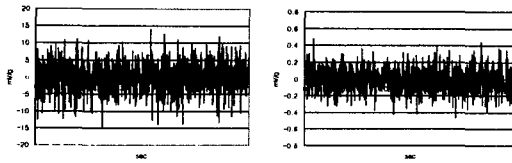
#### 4.2.1 심압대와 공구에서 획득한 가속도계 값

Fig. 9와 10은 CNC 선반에 심압대와 공구부분에 가속도계를 부착하여 A/D 보드에서 획득한 데이터로 샘플링 시간은 초당 1000번으로 각 시편을 구간별로 6초씩 측정하였다.



(a) 심압대 (b) 공구 홀더

Fig. 9 채터가 발생하지 않았을 때



(a) 심압대 (b) 공구 홀더

Fig. 10 채터가 발생했을 때

공구보다 심압대의 떨림이 더 심했는데 이것은 심압대의 베어링 회전 오차 문제가 된 것 같다. 채터가 발생하지 않은 시편에서는 진동이 별로 크지 않지만 채터가 발생한 시편에서는 매우 증가 됐고 가공 시 큰 소음을 내면서 가공되는 것을 실험을 통해서 알 수 있었다.

#### 4.2.2 실제 표면 형상 측정 결과

이상적인 형태의 표면 형상은 Fig. 11에 나타내었다. 실제적으로 진동이나 열변형 등의 요소를 배제하는 이상적인 표면 형상은 얻을 수는 없으나 어느 정도 외부 요인들을 배제한 표면 형상으로 볼 수 있다. 그러나 Fig. 12의 Fig. 11에 비해서 이송 방향으로 계단 형상을 띄면서 골이 생긴 것을 알 수 있고, 2차원 표면 형상에서도 보여주었듯이 일정한 골이 생기지 않았음을 알 수 있었다.

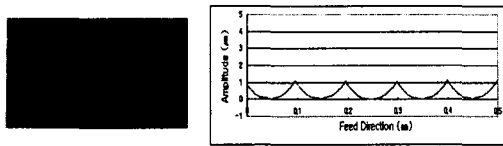


Fig. 11 이상적인 표면 형상

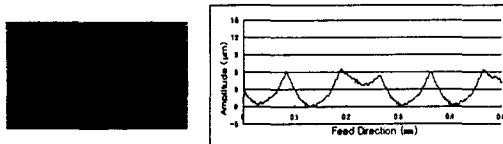


Fig. 12 채터가 발생한 표면 형상

#### 5. 시뮬레이션과 실험 결과 비교 및 고찰

채터가 발생하지 않은 Fig. 5-a와 Fig. 11를

비교해 보면, 시뮬레이션의 결과와 거의 동일하게 나타난다. 또한, 채터가 발생한 경우의 Fig. 5-b와 Fig. 12의 두 그림을 비교해 보면 표면 형상은 약간 다른 형상을 띄고 있지만, 위상지연에 의해 발생한 채터의 형상을 뚜렷이 나타내고 있음을 알 수 있다. Scallop Height 값도 거의 동일하다.

채터가 발생할 경우 발생하지 않았을 때 보다 표면 거칠기가 크게 증가됨을 알 수 있었으며 실제 채터가 발생한 가공물의 형상을 살펴보면 양방향의 방향성을 가지고 있음을 알 수 있는데, 시뮬레이션을 통한 결과 또한 양방향으로 방향성을 갖음을 알 수 있었다.

#### 6. 결론

절삭 공정에서 채터는 절삭 과정 중의 동적 불안정으로 인해 생성된다. 절삭 시 발생하는 채터는 공작물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻었을 수 있었다.

- (1) 절삭실험을 통해서 채터가 발생하는 절삭조건들을 확인하였다. 가속도계에서 얻는 신호 분석을 통해 채터가 발생했을 때가 채터가 발생하지 않았을 때보다 더 큰 피크가 생성되는 것을 관찰하였다.
- (2) 표면형상 예측 시스템을 이용해 채터가 발생했을 때와 채터가 발생하지 않았을 때의 표면 형상들을 실제 실험과 비교·분석해 본 결과 일치함을 알 수 있었다.
- (3) 표면 형상 예측 시스템을 이용해 하나의 모델로써 채터 발생과 채터가 표면 형상에 미치는 영향을 쉽게 예측할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Kato, S. and Marui, E., "On the Cause of regenerative chatter due to workpiece deflection", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol 96 No1. 1974, pp 179-186,
- [2] Tlustý, J., Ismail, F., "Basic Non-Linearity Machining Chatter", Annals of the CIRP, Vol

30, 1981, pp 299-304

[3] Kondo, Y., Kawano, O. and Sato, H., "Behavior of self-excited chatter Due to multiple regenerative effect", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol 103, 1981, pp 324-329

[4] Kaneko, T., Sato, H., Tani, Y. and O-hori, M., "self-excited chatter and its marks in turning". ASME Journal of Engineering for Industry, Vol 106, 1984, pp 222-228

[5] Marui, E., Ema, S., and Kato, S., "ChatterVibration Lathe Tools Part 2: On the Mechanism of Exciting Energy Supply", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol 105, 1983. pp 107-113,

[6] Geoffrey Boothrayd, Winstiom A. Knight, "Fundamentals of Machining and Machine Tools", Marcel Dekker, INC, 1989, pp 239-279

[7] Tarng, Y. S., Hseih, Y., Li, W. T. C. "Automatic Selection of Spindle Speed for Suppression of regenerative Chatter in Turning", Journal of Material Processing Technology, 1996, pp 12-17

[8] Koenigsberger, F., Thusty, J., Structure of Machine Tools, Pergamon Press, Oxford, 1971

[9] Hong, M. S., "Generation, Characterization and Synthesis of Engineering Surfaces," Ph. D. Dissertation, Northwestern University, 1994.

[10] Hong, M. S., and Ehmann, K. F., "Generation of Engineering Surfaces by the Surface-Shaping System," Int. J. Machine Tools Manufacture, Vol. 35, No. 9, pp. 1269-1290, 1995.