

선반가공시 채터로 인한 표면 형상의 시뮬레이션에 관한 연구

홍민성**, 김종민*

Simulation of the Chatter Surface on the Turning Operation

Hong Min Sung, Kim Jong Min

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 vibration and chatter occurs, it reduces tool life, results in poor surface roughness and low productivity of the machining process.

In this study, the experiments were conducted in CNC lathe without cutting fluid to investigated phenomenon of the chatter. In the experiments, accelerometers were set up at the tail stock and tool holder and the signals were picked up. In order to observe the effect of chatter on the surface roughness profiles, in this paper, surface roughness profiles will be generated under the ideal condition and the occurrence of the chatter based on the surface simulation model.

1. 서론

금속 절삭 가공에서, 채터는 절삭 공정의 동적인 상호작용과 공구의 구조적인 움직임 때문에 발생하는 불안한 절삭 현상이다. 채터의 중요한 형태는 재생하는 채터(regenerative chatter)라고

부르는 것인데, 이것은 대개 표면의 재생 효과를 발생한다. 재생하는 채터가 발생하면, 일반적으로 절삭력이 큰 진폭과 주파수로 빠르게 흥분한다. 이러한 이유 때문에 공작물의 표면 거칠기를 좋지 않게 하며, 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 최종가공물 표면에 직접적인 영향을 미치므로 채터의 예측은 중요하다. 또한, 효율적인 채터 예측을 위해서는 사용될 정확하고도 신뢰성 있는 채터 모델이 필요하다.

지금까지 많은 연구가 가공 중에 발생하는 채터의 원인, 메커니즘, 모델링과 안정성 한계에 대해서 수행되어 왔으며, 많은 연구원들은 가공 공정을 선형적으로 모델링하였다. Kato와 Marui는 가공의 선가공에 의한 표면 기복이 있는 표면과 현가공면 사이의 위상 지연에 의해 발생된다고 보고하였다.^[3] Tlusty와 Ismail은 회전 시스템의 비선형성 모델을 개발하여 채터가 발생하는 진폭에 관한 모의 실험을 하였다.^[4] Kondo, Kawano와 Sato는 다중 재발생효과를 고려하여 채터가 시작된 후의 시스템 동적 거동을 해석하였다. 이 연구에서는 공구와 가공물 사이의 상대 운동에 의한 저항력은 낮은 절삭 속도에는 안정성을 향상시킨다는 사실과 채터 발생후 채터 진폭이 일정하다는 것을 보여 주었다.^[5] Marui, Ema와 Kato는 회전시 공구면과 가공물의 마찰력에 의해 진동에너지가 증가하여 자기 발생적인 진동이 생성될 수 있음을 지적하였다.^[6] Kaneto, Sato, Tani와 O-hori는 가공공정에서 발생하는 한정된 진폭

** 아주대학교 기계공학과

* 아주대학교 기계공학과 대학원

의 진동과 저항력 현상을 입증하였다. 그리고 가공물의 매 회전 시 발생하는 진동 위상차와는 관계없이 진동주파수가 약간 변함에 따라 가공물 표면 현상이 변함을 보여 주었다.^[7]

2. 채터 이론

기본적으로 공작기계에서 발생하는 진동에 대해서 알아보고, 특히 채터에 관한 일반적인 내용에 대해서 알아보려고 한다.

일반적인 공작 기계, 절삭공구, 공작물은 복잡한 동적 특성을 가지는 한 개의 구조물을 형성한다. 특정 조건 하에서 구조물은 진동을 할 수가 있으며, 다른 기계류들과 마찬가지로 구조물의 진동은 다음의 세 가지 기본 유형으로 첫 번째는 자유 및 과도 진동(free and transient vibrations), 두 번째는 강제 진동(forced vibration), 마지막으로 세 번째는 자력 진동(self-excited vibration)으로 나눌 수 있다.

공작기계 진동은 절삭 과정과 공작기계의 구조물 사이의 상호작용 때문에 발생한다. 이러한 진동은 가공면, 공구 등에 악영향을 끼치며, 자극적인 소음을 발생시키므로 진동은 억제 시켜야 한다. 자유 및 강제 진동의 원인과 제어는 일반적으로 잘 알려져 있고, 진동원을 제거하거나 기계가 작동하는 동안은 회피할 수 있다. 그러나 채터 진동은 다른 진동에 비하여 제어하기가 어렵고, 금속 제거율은 기계 조작자가 절삭깊이 또는 이송량 감소와 같이 절삭 조건을 변화시키기 위하여 기계를 중지 시켜야 하기 때문에 자주 제한을 받는다.

채터의 근본적인 원인은 절삭과정과 공작기계구조물의 동적 상호작용에 있다. 2차원 절삭작업이 Fig. 1에 도식적으로 나타나 있는데, 절삭 공구와 공작물의 탄성 구조물로 결합되어 있다. 절삭하는 동안 힘 F_r 은 공구와 공작물 사이에 발생하고 절삭표면에 어떤 각도로 작용한다. 이 절삭력의 크기는 공구-가공물 물림과 절삭깊이에 크게 의존한다. 절삭력은 구조물을 탄성적으로 변형시키고, 공구와 공작물의 상대 변위를 일으키며, 또한 상대 변위는 공구-가공물 물림(미변형 칩 두께)을 바꾸는 원인이 된다. 따라서, 절삭가공동안 공

작기계는 Fig. 2에 나타난 것처럼 close-loop feedback system이 된다. 절삭과정에서의 외란-예를 들면, 가공재료의 단단한 지점-은 구조물 변형의 원인이 될 수 있고, 그로 인해 미변형 칩 두께도 변하게 되며, 또한 절삭력을 변화시킨다. 고유 진동모드로 진동하는 기계에 있어서 위와 같은 초기 진동은 스스로 유지(불안정)되고 커질 수도 있다.

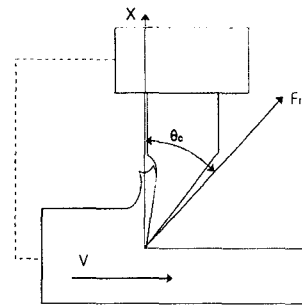


Fig. 1 Idealized orthogonal cutting process

아래의 그림과 같은 페루프 절삭 과정 구조는 진동을 보전시킬 수 있는 에너지를 구조물 내에 전달하는 기구가 존재한다면 불안정하게 될 것이다. 두 가지 중요한 영향이 불안정의 원인이 될 수 있는데, 원인인 진동속도에 의한 메커니즘, 재생효과(regenerative effect) 그리고, 모드 커플링(mode coupling) 세가지 메커니즘으로 구성되어 있다.

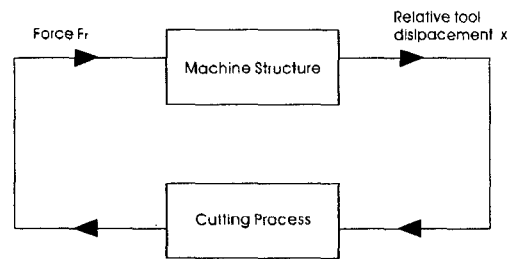


Fig. 2 Closed-loop representation of the machine tool and cutting process system

3. 구조 방정식(Structure Equation)

공작 기계 구조물의 이송 함수로 모델링 된 2차 미분 방정정식은 하나의 자유도를 갖는 진동 시스템으로써 공작 기계구조물을 표현함으로써

유도할 수 있다.

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

위의 식은 아래의 식(2)와 같이 다시 쓸 수 있다.

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

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

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

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

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

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

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

여기서, b 는 절삭 폭, K_c 는 매 순간 양의 X 축 방향으로 절삭력이 투영됨에 따라서 얻어지는 이송속도, 인서트의 기하학, 재료의 물성치 등이 영향을 미치는 절삭력 계수이다.

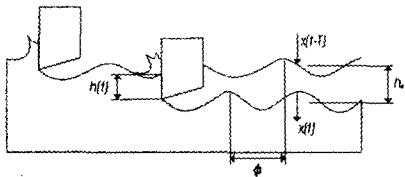


Fig. 3 Phase shift of regenerative chatter

위의 Fig. 3에서 보여주듯이, 순간 칩두께 $h(t)$ 는 X 축 방향은 칩 두께의 변화와 표면의 파동으로 생성되는데 같은 방향으로 공작물로부터 공구가 이동하는 방향으로 감소한다. 만약 현재 가공

경로가 $x(t)$ 이고 이전 가공 경로가 $x(t-\tau)$ 라면 두 경로간의 차이는 시간 τ 이다. 순간 칩 두께 $h(t)$ 는 아래와 같은 식(5)으로 표현할 수 있다.

$$h(t) = h_m + x(t) - \mu x(t-\tau) \quad (5)$$

여기서 h_m 는 평균 비절삭 칩두께이고, μ 는 오버랩 인자이다. 오버랩 인자는 연속적인 패스의 겹쳐지는 수를 나타낸다. 이것은 현재 가공의 오버랩이 이전 가공과의 비를 정의한다. 대부분 가공에서의 μ 는 1이다. 이러한 상황은 강한 재생 효과(regenerative effect)를 갖는다

3. 표면 형상 예측 시스템 (Surface Shaping System)

이 시스템은 공작기계의 기구학과 절삭 공구의 기하학 및 가공된 표면의 형상을 예측하기 위한 목적으로, 절삭날 위의 표면 가공점과 공작물과의 상관관계를 나타낸다. 표면 형상 예측 시스템은 절삭공구의 기본운동뿐만 아니라 가공 시 발생하는 공구의 런아웃(runout), 기계의 변형, 진동, 고차원 운동까지도 포함되어 있다. 그러므로, 이 시스템은 제조 공정의 표면 특성 예측을 위한 일반적인 수학적 모델을 제시한다.

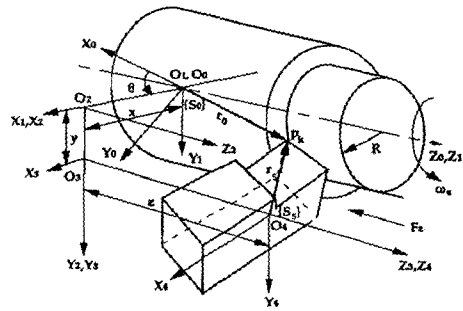


Fig. 4 Surface-shaping system of the turning process

Fig. 4에서는 단인 공구(single-point tool)를 이용한 선반 작업에서의 표면 가공 시스템을 나타낸다. 기본 좌표계 (S_0) 에서 절삭날 위의 표면 가

공점 P_k의 벡터 r₀는 아래와 같이 나눌 수 있다.

$$r_0 = B_{0,5} r_5 \quad (6)$$

$$= {}^N A^6(\theta) {}^N A^1(x) {}^N A^2(y) {}^N A^3(z) {}^E A^1(e_{th}) r_5$$

여기서 ${}^N A^6(\theta)$ 는 Z축에 의한 {S₁} 좌표계의 회전을 나타내는 변환행렬이고, ${}^N A^1(x)$, ${}^N A^2(y)$, ${}^N A^3(z)$ 는 X, Y, Z 방향에서의 좌표변환을 나타낸다. 또한 ${}^E A^1(e_{th})$ 는 열변형을 나타내는 오차항이다. r₅는 {S₅} 프레임에서 공구의 기하학적 벡터를 나타내는 것이며 식 (9)와 같다.

$$r_5 = {}^N A^5(\psi) {}^N A^1(\rho) {}^N A^2(-p_{yk}) e^4 \quad (7)$$

여기서, ${}^N A^5(\psi)$ 는 Y축을 중심으로 ψ 만큼의 회전을 나타내며, ${}^N A^1(\rho)$ 와 ${}^N A^2(p_{yk})$ 는 좌표계 {S₅}에서 각각 X와 Y축 방향에서 r₅의 ρ 와 p_{yk} 만큼 이동을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과 검증

4.1 시뮬레이션에 적용된 식

공작 기계 구조물은 하나의 자유도를 갖는 2차 미분 방정식 진동 시스템으로써 공작 기계 구조물을 표현한다고 위의 내용에서 언급했다. 위의 (1), (4) 그리고, (5)식을 시뮬레이션에 적용하기 위해 2차 미분 방정식의 해법으로 2계 Runge-Kutta 미분 방정식의 풀이법을 이용하여 변위 x를 구한다. 하지만, 우변항에 시간의 함수에 시간 지연 τ 가 있어서 풀이를 쉽게 하기 위하여, 시간 지연 효과는 2개의 sine 함수가 위상차를 가지고 있는 형태이므로 $h(t)$ 를 다음과 같이 전개하였다.

$$h(t) = h_m - x_{\text{Previous Cut}} + x_{\text{Present Cut}} \quad (8)$$

여기서,

$$x_{\text{Previous Cut}} = A_{p_1} \sin(\omega t - \phi),$$

$$x_{\text{Present Cut}} = A_{p_2} \sin(\omega t) \text{ 이다.}$$

위의 식을 다음과 같이 풀이해서 2차 Runge-Kutta 미분 방정식의 풀이법을 이용하여 해석하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

위에서 구한 채터 반응식을 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. 1의 값은 대우 CNC 선반(PUMA6-3A)에 코팅된 카본 인서트를 사용했을 때 B&K 장비로 측정 시 나오는 값들이다. 시뮬레이션의 가공 조건은 Table. 2에 나타내었다.

Table. 1 Tool and tool holder modal test result

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

Table. 2 Simulation cutting parameter

Cutting Speed (mm/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

채터식을 이용하여 표면 형상 예측 시스템에 적용하였을 경우 이상적인 경우의 2차원 표면 형상과 채터 발생하였을 때의 2차원 표면형상을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

또한, 이상적인 경우에 3차원 표면 형상은 Fig. 7에 나타내었으며, 채터가 발생한 후의 3차원 표면 형상은 Fig. 8에 나타내었다.

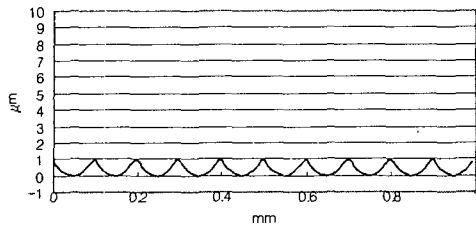


Fig. 5 2-D surface profile result (Ideal)

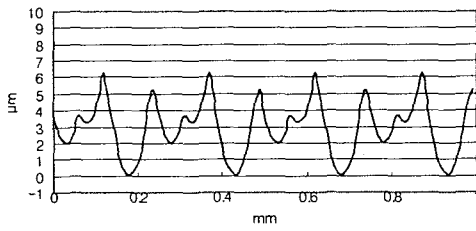


Fig. 6 2-D surface profile result (Chatter)

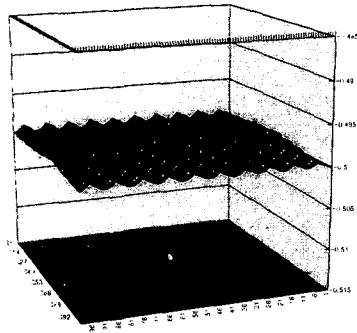


Fig. 7 3-D surface profile result (Ideal)

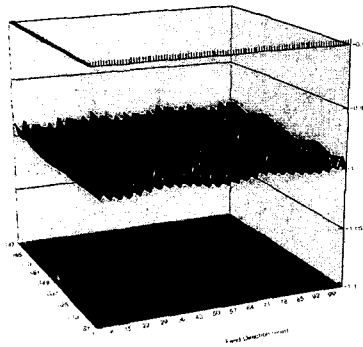


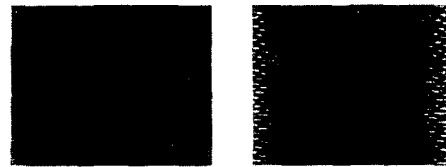
Fig. 8 3-D surface profile result (Chatter)

4.3 실험을 통한 검증

가공시 채터로 인한 표면 거칠기에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 피드와 공구의 노우즈 반경 그리고 절삭깊이이다. 그러나, 가공 중에 채터가 발생한다면, 공작물의 표면 거칠기에 크게 영향을 준다.

본 실험에서는 시뮬레이션과 같은 조건으로 가공하였으며, 이 중 공구의 노우즈 반경이 가장 잘 반영된 공작물의 표면 거칠기 데이터를 취했다. 표면 거칠기의 측정은 Mitutoyo의 SURF-TEST SV-600을 사용하여 측정하였다.

실제 표면 형상과 표면 형상 측정기로 측정한 형상은 다음과 같다.



(a) (b)

Fig. 9 non-chattered workpiece(a) and chattered workpiece(b)

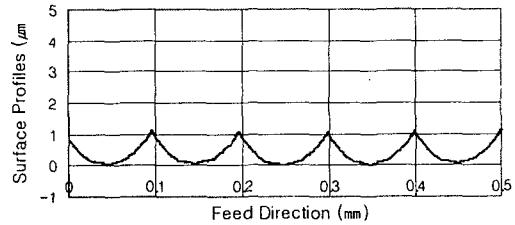


Fig. 10 Measured 2D surface profile result (non-chattered workpiece)

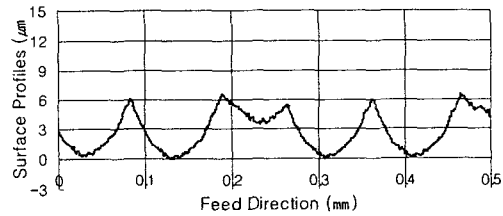


Fig. 11 Measured 2D surface profile result (chattered workpiece)

이상적인 형태의 표면 형상은 Fig. 9(a)와 Fig. 10에 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. 9(b)와 Fig. 11에 채터가 발생한 시편을 살펴보면 이상적인 시편의 표면은 이송 방향을 따라서 표면의 골이 생긴 반면 채터가 발생한 시편은 이송 방향으로 계단 형상을 띄면서 골이 생긴 것을 알 수 있고, 2차원 표면 형상에서도 보여주었듯이 일정한 골이 생기지 않았음을 알 수 있다.

5. 비교 및 고찰

채터가 발생하지 않은 Fig. 5와 Fig. 10을 비교해 보면, 시뮬레이션과 실험 결과는 거의 동일하게 나타난다. 채터가 발생한 경우의 Fig. 6과 Fig. 11를 비교해 보면, 위상지연에 의해 발생한 채터의 형상을 뚜렷이 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 scallop height 값도 거의 동일하다. 이러한 실험결과는 표면가공 시스템에 의해 채터 발생과 채터가 표면에 미치는 영향에 대한 예측이 가능하다는 것을 나타낸다.

6. 결론

절삭공정에서 채터는 절삭과정 중 동적 불안정으로 인해 생성된다. 절삭시 발생하는 채터는 공작물의 표면 거칠기에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문은 채터 발생시 표면형상 예측에 대한 것이다. 따라서 본 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 위상지연에 의한 채터식을 사용하여 채터 형상을 예측할 수 있다.
2. 시뮬레이션과 실험을 통하여 채터가 표면형상의 변화 경향 및 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해서 관찰하였다.
3. 표면 형상 예측 시스템의 일반적 모델에 채터에 의한 오차항을 첨가함으로써, 선삭에서 표면 거칠기를 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) S. A. Tobias, *Machine Tool Vibration*, Blackie, London, 1965
- (2) F. Koenigsberger, J. Tlustý, *Structure of Machine Tools*, Pergamon Press, Oxford, 1971
- (3) S. Kato, and E. Marui, "On the Cause of Regenerative Chatter due to Workpiece Deflection", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 96, No. 1, pp. 179-186, 1974
- (4) J. Tlustý and F. Ismail, "Basic Non-linearity in Machining Chatter", *annals of CIRP*, Vol. 30, No. 1, pp. 299-304, 1981
- (5) Y. Kondo, O. Kawano, and H. Sato, "Behavior of Self-excited Chatter due to Multiple Regenerative Effect", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 103, pp. 324-329, 1981
- (6) E. Marui, E., S. Ema, S. Sato, "Chatter Vibration of Lathe Tools." *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 105, pp. 107-103, 1983
- (7) T. Kaneko, H. Sato, Y. Tani, and M. O-hori, "Self-excited Chatter and Its Marks in Turning". *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 106, pp. 222-228, 1984
- (8) I. E. Minis, E. B. Magrab, I. O. Pandelidis, "Improved Method for the Prediction of Chatter in Turning", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1990
- (9) Y. S. Tarn, "Automatic Selection of Spindle Speed for Suppression of regenerative Chatter in Turning", *Journal of Material Processing Technology*, pp.12-17, 1996,
- (10) M. S. Hong, Z. M. Lian and K. H. Shin, "A Study on the Effect of Tool Thermal Deformation on Surface Roughness", *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 4, pp. 33-39