

선반작업에서 Ploughing Mechanism을 고려한
표면 거칠기에 관한 연구

A Study on The Surface Roughness by Ploughing Mechanism in
Turning Process

홍 민 성* 염 철 만**

* 아주대학교 기계 및 산업공학부

** 아주대학교 기계공학과 대학원

Abstract:

“Ploughing” on the flank face of the tool in the metal cutting process is due to the finite edge radius of the tool and due to the development of flank wear. Because of the high stresses near the cutting edge, elastic-plastic deformation would be caused between the tool and the machined surface over a small area of the tool flank. The deformation would affect the roughness of the machined surface. Recently, some attempts have been made to predict the surface roughness, but elastic-plastic effect due to ploughing in the cutting process has not been considered.

The research has analyzed mechanism of the ploughing of the cutting process using contact mechanics. Tool and workpiece material properties have been taken into account in the prediction of the surface roughness. The surface roughness has been simulated by the surface-shaping system. The results between experiment and simulation have been compared and analyzed.

Key words: Ploughing(경작), elastic-plastic deformation(탄소성 변형), surface roughness (표면 거칠기), contact mechanics(접촉 역학), surface-shaping system(표면가공 시스템), cutting edge radius(절삭날 반경)

1. 소개

선반 작업은, 산업 기계에서 가장 일반적으로 적용된 작업이고, 요즘은 과거에 비하여 더욱더 정확한 메커니즘의 올바른 이해가 요구된다. 시간이 지남에 따라서, 가공 공정 모델링의 영역에 많은 연구가 수행되어졌다. 이와 동시에, ploughing process의 중요성은 Albrecht^[1]에 의하여 연구된 이후로 많은 연구자들에 의해서 검증하게 되었고, 여유면(clearance face)에서 복잡한 간섭 특징의 매개변수를 실험적으로 결정하게 되었다. 최근에, Wu^{[2][3]}는 Shaw와 DeSalvo의 ploughing모델을 기반으로 ploughing force가 공구에 의한 물체의 변형된 층 부피에 비례한다는 가정을 하였다. Elanayar와 Shin^[4]은 반탄성공간(elastic half space)에서 마찰이 없는 압입(indentation)에 기반하여 ploughing force를 모델링 하였다.

표면 거칠기는 가공 공정에서 가공물의 기계적,

물리적인 특성에 결정적인 영향으로 인하여 실제적으로 가공 표면의 가장 중요한 특징으로서 주로 간주되었다. 제조 공정에서도 수치적 시뮬레이션의 방법이 지속적으로 시도되어왔다^[5].

표면 거칠기는 절삭 속도, 이송, 그리고 공구 노즈(nose) 반경에 의해서 영향을 받는다. 또한, 절삭 깊이, 공구 마모, 진동, 구성인선(built-up edge), 공작물 소재의 경도에도 영향을 받는다.

본 연구의 주목적은 contact mechanics를 사용하여 절삭 공정에 ploughing 메커니즘을 분석하기 위한 것이다. 공구와 공작물의 재료 성질이 표면 거칠기 예측에 고려되었고 표면 거칠기는 표면 가공 시스템(surface-shaping system)에 의해서 시뮬레이션 되었다.

2. 이론 배경

2.1 절삭 공정의 Ploughing Mechanism

절삭 공정에서 ploughing 현상을 해석하기 위하여, 공구의 유한 절삭날 반경(cutting edge radius)을 고려하는 것이 필요하다^[1]. Ploughing 현상은 Fig. 1에서 보여진다.

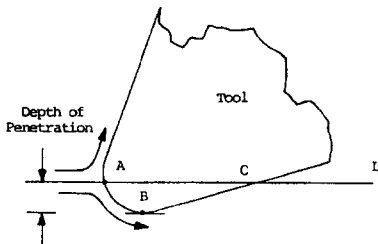


Fig. 1 Ploughing mechanism

유한 절삭날 반경을 갖는 공구는 우측에서부터 좌측으로 수평하게 움직인다. 공구날 앞의 A점은 재료를 분리하여 이 점을 통과하는 수평선에 의하여 공구에 접근하는 재료를 두 개의 지역으로 분

리한다. 공구가 절삭을 수행함으로써 경계선 L 위의 재료들은 경사면 위를 통해서 칩으로 배출되고, 경계선 아래의 재료는 여유면으로 통과하게된다. 점 A와 B의 수직 거리는 공구와 공작물사이의 압입 깊이를 나타내며 이를 공구 압입 깊이(depth of penetration)라고 부른다.

탄-소성 변형은 ploughing 현상 때문에, 공구와 가공된 표면사이의 공구 여유면의 작은 영역에서 발생된다. 이와 같은 변형은 가공 표면의 거칠기에 영향을 미친다.

2.2 Contact Model

Ploughing 현상을 고려한 표면 형상을 시뮬레이션 하기 위하여, 본 연구에서는, 공구 여유면과 가공된 표면사이에서 마찰이 없는 공구형상을 갖는 압입부(indenter)에 의한 접촉 특징과 가공 물체의 압입 공정이 동일함을 가정하였다. 공구날의 유효 반지름이 존재하기 때문에, 압입 모델에서의 접촉 표면의 형태는 실린더 표면에 의해 근사 될 수 있다.^{[2][3]} 더욱이, 접촉부분에서는 완전한 소성 영역을 형성하기 때문에, 공구 절삭날에 의해서 적용된 평균 접촉 압력은 공작물 재료의 경도와 동일하다.^{[6][7]}

이 압입량은 아래와 같이 주어진다.

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

여기서,

P - 하중

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$$

E_1, E_2 - 탄성 계수 (elastic modulus)

ν_1, ν_2 - 포아송 비 (poisson's ratio.)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

R_1, R_2 - 접촉면의 반경

이다.

2.3 표면 가공 시스템

이 시스템은 공작기계의 기구학과 절삭 공구의 기하학, 공작물과 절삭된 표면의 형상을 예측하기 위한 목적으로 절삭 공구 위의 표면 가공 점과 공작물의 상관관계를 포함하는 시스템 모델을 나타내는데 사용된다. 이 시스템은 절삭 운동뿐만 아니라 가공시 공구의 런아웃(runout), 기계의 변형, 진동, 고차원 운동까지도 포함되어 있다. 그러므로, 이 모델은 제조 공정의 표면 특성 예측을 위한 일반적인 수학적 모델을 지원한다.^{[8][9]} 표면 가공 시스템의 모델은 다음 식을 포함한다.

$$r_0 = B_{0,n} B_T e^A \quad (2)$$

여기서 r_0 는 기본좌표계에서 절삭날까지의 벡터이고 $B_{0,n}$ 과 B_T 는 각각 공구와 공작물간의 기구학적 좌표변환과 공구좌표계에서 절삭날까지의 기하학적 좌표 변환이다. e^A 는 공구좌표계의 원점을 나타내는 벡터이다.

3. 선삭공정 모델링

Figure 2는 단인 공구(single-point tool)로서 선반 가공에서의 표면 가공 시스템을 나타낸다. 기본좌표계 $\{S_0\}$ 에서 절삭날 위의 표면 가공점 P_k 벡터 r_0 는 아래와 같이 나눌 수 있다.

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

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

여기서 ${}^N A^5(\theta)$ 는 Z축에 의한 $\{S_1\}$ 좌표계의 회전을 나타내고, ${}^N A^1(x)$, ${}^N A^2(y)$, ${}^N A^3(z)$ 는 X, Y, Z 방향에서의 좌표변환을 나타낸다. 또한 ${}^E A^1(e_{dx})$ 는 contact mechanics에 의해 계산된 각 재질 변형을 나타내고 ${}^N A^5(\phi)$ 는 Y축을 중심으로 ϕ 만큼의 회전이며, ${}^N A^1(\rho)$ 와 ${}^N A^2(p_{yk})$ 는 좌표계 $\{S_4\}$ 에서 각각 X와 Y축 방향에서 r_5 의 ρ 와 p_{yk} 의 거리를 나타낸다.

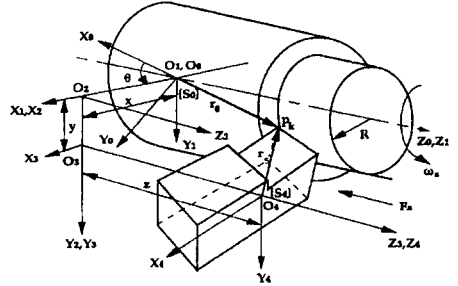


Fig. 2 Surface-shaping system of the turning process

4. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과

4.1 컴퓨터 시뮬레이션

단인 공구에 의한 표면 형상은 표면 가공 시스템을 기반으로 시뮬레이션 되었다. Figure 3은 표면 가공 시스템의 흐름도를 보여주고, 시뮬레이션에서의 표면 형상은 Figure 4에 나타내었다. 절삭 매개변수를 시뮬레이션의 매개변수로 선택하였고, 이것을 Table 1에 나타내었다.

4.2 실험 및 고찰

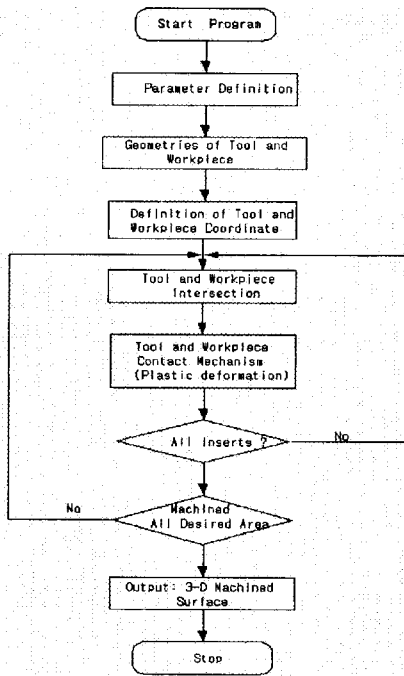


Fig. 3 Flowchart of the surface-shaping system

Table 1. Simulation and experimental parameters

Tool	Insert NC 330
Speed	1000 rpm
Feedrate	0.15 mm/r
Depth of cut	0.5 mm
Nose radius	0.8 mm
Edge radius	0.08 mm
Diameter	50 mm

절삭 실험은 NC 선반에서 알루미늄합금과 SM45C에서 수행하였다. 절삭날 반경은 비접촉식 3차원 측정기(Leitz UMS 430)로 측정하였고 가공된 표면 거칠기는 표면 측정장치(Mitutoyo, SURFTEST SV-600)로 측정하였다. 절삭 조건은 Table 1에 나타내었다.

공작물과 공구재료에 의한 표면 거칠기 효과의 관찰과 시뮬레이션의 정확성을 비교하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험 데이터를 비교하였다. 그리고, 표면형상 특징을 나타내기 위하여 표면형상을 FFT를 통하여 주파수영역에서 스펙트럼을 표현하였다.

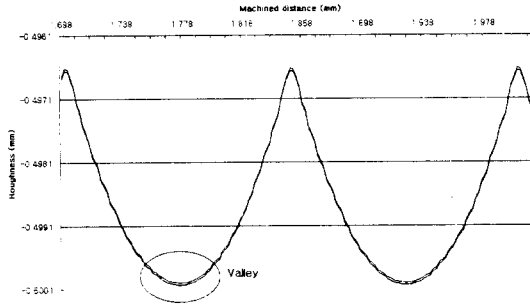
Figure 5에서는 측정된 표면 형상(Profile)을 나타내었고, 스펙트럼을 Figure 6에 나타내었다. 알루미늄합금과 SM45C 표면의 rms값은 각각 $0.71 \mu\text{m}$ 와 $0.87 \mu\text{m}$ 이다. Figure 6에서 나타낸 것과 같이 시뮬레이션과 실험에 의한 표면패턴(pattern)은 유사하다는 것을 볼 수 있다. 그리고 본 연구에서 ploughing 현상에 의한 탄-소성 변형의 영향을 고려하지 않았을 때의 S_q 값은 $0.954 \mu\text{m}$ 이고, 이를 고려했을 때의 S_q 값은 각각 $0.960 \mu\text{m}$ (알루미늄합금), $0.963 \mu\text{m}$ (SM45C)이다.

이것은 또한 시뮬레이션 결과와 실험 값이 유사하다는 것이고 이러한 결과로서 표면 가공 시스템은 다양한 가공 공정에서의 표면 거칠기를 예측하기 위하여 사용되어질 수 있었다.

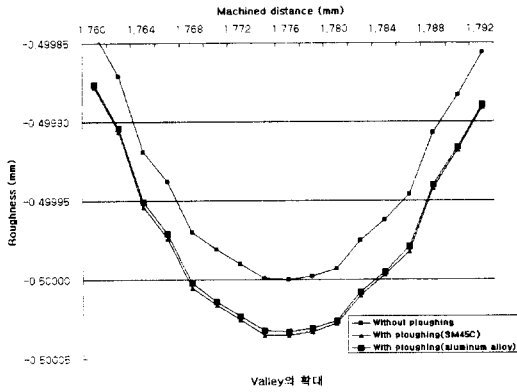
5. 결론

시뮬레이션과 실험 결과로부터, 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 표면 거칠기는 공구와 가공된 표면사이의 공구 여유면의 작은 영역에서 ploughing 현상에 의한 탄-소성 변형의 영향을 받는다.
- 2) 공구와 공작물 재료의 특성은 실제적으로 표면 거칠기에 영향을 미친다는 것을 볼 수 있다.



(a)



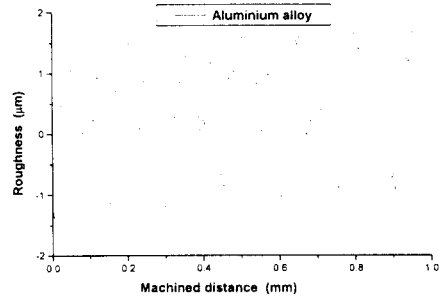
(b)

Fig. 4 (a) Simulated surface
(b) Magnified valley

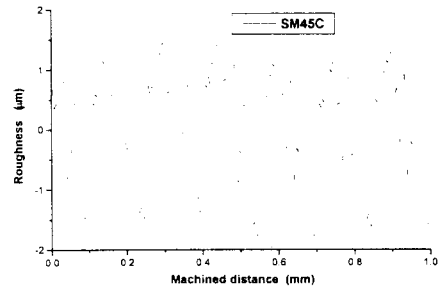
3) 실험적으로 다양한 특성을 갖는 가공된 공작물의 표면 거칠기의 평가는 본 논문에서 제안된 방법으로 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있다.

참고문헌

[1] Albrecht, P., "New Developments in the Metal-Cutting Process: Part 1. The Ploughing



(a)



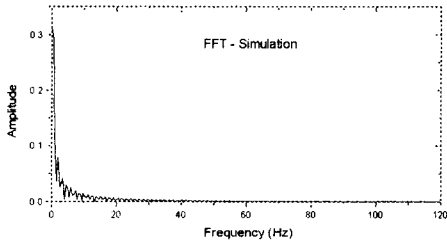
(b)

Fig. 5 Measured surface profile
(a) Aluminium alloy (b) SM45C

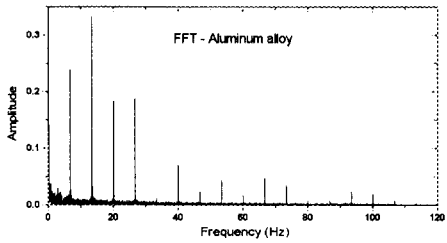
Process in Metal Cutting," ASME Transactions, Vol. 82, pp. 348-358, 1961.

[2] Wu, D. W., "Application of A Comprehensive Dynamic Cutting Force Model to Orthogonal Wave Generation Process," Int. Journal of Mechanical Science, Vol. 30, pp. 1-20, 1988.

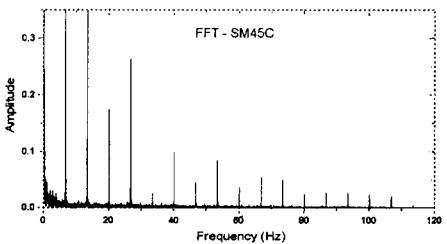
[3] Wu, D. W., "A Approach of Formulation The Transfer Function for Dynamic Cutting Force,"



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Spectrums (a) Simulation
(b) aluminum alloy (c) SM45C

ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 37-47, 1989.

[4] Elanayar, S., Shin, Y. C., "Modeling of Tool Forces for Worn Tools: Flank Wear Effects," ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 359-365, 1996.

[5] You, S. J., and Ehmann, K. F., "Synthesis and generation of surfaces milled by nose end mills under tertiary cutter motion," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, pp. 17-24, 1991.

[6] Tabor, D., *The Hardness of Metals*, Clarendon Press, Oxford, 1951.

[7] Johnson, K. L., *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1985.

[8] 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.

[9] Hong, M. S., "Engineering Surfaces Control in Turning process," 한국공작기계기술학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 24-33, 1995.