

절삭력에 의한 하드터닝의 표면조도 예측에 관한 연구

이강재*(한국과학기술원 기계공학과 대학원), 양민양(한국과학기술원 기계공학과)
하재용(대우종합기계), 이창호(대우종합기계)

Study on Prediction of Surface Roughness in Hard Turning by Cutting Force

K. J. Lee(Mechanical. Eng. Dept. KAIST), M. Y. Yang(Mechanical. Eng. Dept. KAIST)
J. Y. Ha(DHI), C. H. Lee(DHI)

ABSTRACT

Hard turning replaces grinding for finishing process with expectations of higher productivity and demanded surface quality. Especially for the surface roughness as surface quality demanded in finishing process of hard turning, know-how of machining characteristics of hardened materials by cutting force analysis should be accumulated in company with achievement of precision of elements and high stiffness design technology in hard turning. Considering chip formation mechanism of hardened materials, adequate cutting conditions are selected for machining experiments and cutting forces are measured according to cutting conditions. Increase of cutting forces especially thrust force and increase of dynamic instability could occur in hard turning. Analysis of dynamic characteristics of the cutting forces is executed to investigate relation between dynamic instability and surface roughness in hard turning. Investigation on effects of relative motion of machining system generated by vibration due to dynamic instability shows that ultimate surface roughness could be predicted considering relative motion of machining system with geometrical surface roughness.

Key Words : Hard Turning (하드터닝), Chip Formation Mechanism(칩 생성 메커니즘), Cutting Force (절삭력), Hardened Material (고경도 강재), Dynamic Instability(동적 불안정성), Dynamic Model Parameter(동적 모델 인자), Surface Roughness (표면 조도)

1. 서론

CBN 공구 등과 같은 공구의 성능 향상을 통해 경도가 Hrc 50 이상의 고경도 강재에 대한 하드터닝 공정으로 연삭 공정의 다듬질 작업을 대체할 수 있게 되었다. 하드터닝은 연삭에 비해 초기 투자 비용이 적게 들며 상대적인 고속 가공을 통한 가공 시간의 감소를 통해 원가절감을 이룰 수 있다. 또한 전 가공 공정을 한 번의 설치로 진행할 수 있으며 연삭과는 달리 표면의 타지 않는 현상을 통한 표면품질 향상 등의 장점을 갖는다^[1]. 하드터닝을 통해 요구되는 표면 정도를 이루기 위해서는 요소 부품들의 정밀화와 고강성화를 통해 하드웨어를 설

계하는 기술뿐만 아니라, 절삭력의 분석을 통한 표면 조도의 예측 등 설계에 중요한 요소가 되는 하드터닝 가공 기술의 확립이 필요하다.^[2]

일반 터닝 가공에서 칩 생성 시 발생하는 응력과 열을 통한 소성흐름으로 일반적으로 연속적인 칩이 발생하지만^{[3][4]} 하드터닝 가공에서는 고경도 강재의 깨지기 쉬운 특성 (Brittleness)과 높은 항복응력, 칩 생성 시 높은 압축응력과 고온으로 인한 절삭응력 감소 등의 반복현상. 그리고 공구의 음의 경사각 (Rake Angle) 등으로 인해 단속적인 소성흐름으로 인한 균열 (Crack)이 발생되고 일반적으로 비 연속적인 칩이 생성된다^{[1][2][4][5]}. 이러한 현상은 하드터닝에서 배분력의 높은 증가 등 상대적으로 높은 절삭력 증

가를 발생시키고 가공의 불안정성으로 표면 조도를 저하시킬 수 있다. 따라서 안정된 하드터닝 공정을 위해 가공 조건에 대한 절삭력 분석이 필요하다.

하드터닝은 일반 터닝과는 다르게 다듬질 작업을 대체하므로 가공 시 표면 조도와 같은 표면 품질을 항상 고려해야한다. 일반적으로 가공 시 이론적인 표면 조도는 공구 반경과 이송속도를 인자로 갖는 기하학적 표면 조도로 표현된다. 따라서 하드터닝 시 실제 측정된 표면 조도와의 비교를 통해 기하학적 표면 조도의 신뢰성을 판단할 필요가 있으며, 표면 조도에 대한 가공 시 불안정성에서 기인된 가공 시스템의 상대운동의 영향을 알아볼 필요가 있다⁶⁾. 본 연구에서는 하드터닝 시 발생할 수 있는 동적 불안정성, 그리고 동적 불안정성에 의한 가공 시스템의 상대운동과 표면 조도와 관계 등이 다루어지며 이는 궁극적으로 표면품질 제어 가공의 기초가 된다.

2. 실험 방법

절삭력 해석과 실제 가공을 통해 일반 터닝과 하드터닝의 특성 차이를 파악하고 하드터닝에 안정된 가공 조건을 선정하였다⁶⁾⁷⁾. 본 연구에서 하드터닝에 선정된 가공조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Machining Conditions for Hardened Material

Cutting Speed [m/min]	100 ~ 200
Feedrate [mm/rev]	0.02 ~ 0.15
Depth of Cut [mm]	0.05 ~ 0.3

하드터닝 실험에는 칩탄 열처리 후 가공으로 인한 소재의 반경 감소해도 경도의 변화가 거의 없는 SKD11 소재가 사용되었으며 경도를 Hrc 60 으로 하였다.

사용된 공구의 사양은 Table 2 와 같다.

Table 2 Specifications of Cutting Tool

Material	CBN
Grade	KB50 (CBN 50%)
Nose radius	0.8mm
Effective Rake Angle	-4.6°

사용된 CBN 공구는 50%의 CBN 이 포함하고 있으며 일반터닝 공구에 비해 상대적으로 큰 공구반경과 음의 경사각으로 인해 강성이 크며, 높은배분력이 발생하는 하드터닝에 적절하다.

실험 시, 가공 조건에 대한 절삭력은 Fig. 1 과 같이 하드터닝 머신의 터릿에 장착된 공구동력계를 통해 획득되고 AD 변환장치를 통해 저장된다.

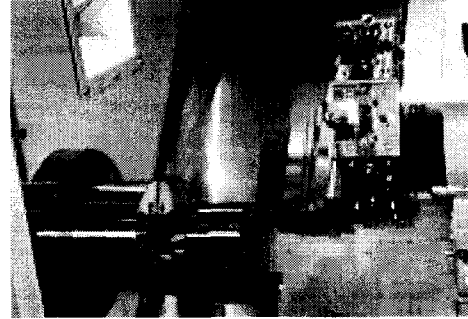


Fig. 1 Cutting Force-Acquisition Experiment of Hardened Material in Hard Turning Machine

하드터닝에서 요구되는 표면 조도 조건에 근거하여 동적 불안정성을 조사하며 이론 표면 조도와 큰 차이를 보이는 측정 표면 조도 구간에 대해 주파수 분석을 진행하여 가공 시스템의 동적 불안정성으로 인한 상대운동과 표면 조도와 관계의 관계를 알아본다. 시스템에 대한 모드 테스트를 진행하여 주파수 분석에서 얻어진 동적 모델 인자 값을 확인한다.

3. 결과 및 토의

3.1 절삭력

하드터닝 시 가장 주목할 만한 절삭 현상은 높은 압축응력에 의한 배분력의 명확한 증가이다. 따라서 하드터닝 시에는 배분력에 대한 절삭력 분석이 중요하다. Fig 2. 는 본 연구의 가공 조건에 대한 절삭력의 변화를 보이고 있다.

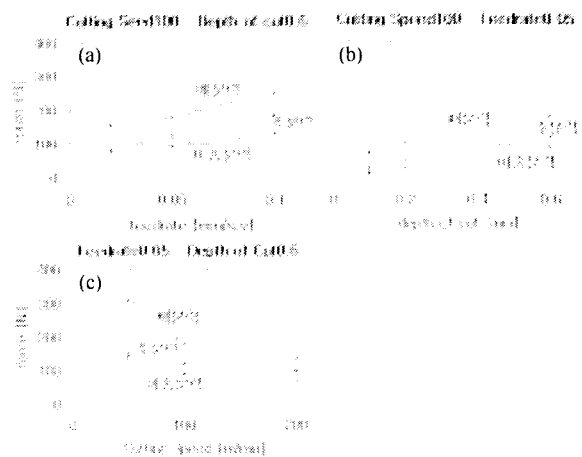


Fig. 2(a) Cutting Force Change according to Feedrate
Fig. 2(b) Cutting Force Change according to Depth of Cut
Fig. 2(c) Cutting Force Change according to Cutting Speed

하드터닝 시 절삭력은 절삭 깊이와 이송 속도의 증가에 따라 증가한다. 특히 배분력은 주분력과 이송분력에 비해 절삭 속도의 증가에 따라 크게 감소한다. 따라서 하드터닝 시 높은 절삭 속도 영역에서는 절삭력이 감소하는 이점이 있지만 가공 온도를 급속히 증가시키므로 공구마모가 쉽게 발생할 수 있어 표면 조도에 나쁜 영향을 끼칠 수 있다.

3.2 표면 조도

3.2.1 고경도 강제 가공에서의 표면 조도

하드터닝에서 요구되는 표면 품질로서 표면 조도의 예측은 상당히 중요하다. 가공 조건에 따라 변하는 절삭력은 표면 조도에 영향을 줄 수 있다. 따라서 정확한 표면 조도의 생성을 위해 절삭력의 영향을 고려한 표면 조도의 예측이 필요하게 된다. 이론적으로 예측될 수 있는 기하학적 표면 조도는 공구형상인 공구 반경 r 과 이송속도 f 의 인자로 나타내어진다.

Fig. 3(a)는 이송 속도에 대한 실제 측정된 표면 조도와 기하학적인 표면 조도를 나타내며 Fig. 3(b)는 각 이송속도 조건에 대한 주파수 분석을 나타낸다. 표면 조도는 가공조건 중 절삭 속도와 절삭 깊이에는 크게 영향을 받지 않으나 낮은 절삭 속도 및 낮은 절삭 깊이 ($50 \sim 100$)에서는 표면 조도가 저하됨을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 기하학적 표면 조도와 측정된 표면 조도 간에 차이를 볼 수 있는데 Fig. 3(b)를 통해, 표면 조도 값이 가장 나쁜 조건은 아니지만 조건(1), (3)에 비해 그 차이가 큰 조건(2)에서 심한 동적 불안정성이 발생함을 알 수 있다. 따라서 동적 불안정성으로 발생하는 진동의 표면 조도에 대한 영향을 알아볼 필요가 있다.

한 편, 동적 불안정성에도 불구하고 선정된 가공조건 내에서는 체터 현상은 발견되지 않았는데 이는 높은 배분력이 생성되어 체터 진동에 이르기 전에 공구의 팁이 파손되기 때문으로 사료된다.

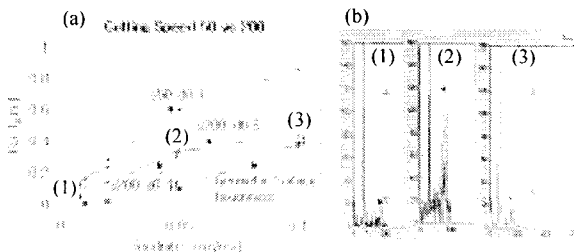


Fig. 3(a) Geometric Surface Roughness and Measured Surface Roughness according to Feedrate

Fig. 3(b) Frequency Analysis of Cutting Force according to Feedrate

3.2.2 상대운동을 고려한 표면 조도

고경도 강제 가공 시 발생할 수 있는 동적 불안정성에 의한 진동은 공구와 공작물 간의 상대운동으로 나타내어 질 수 있다. 동적 불안정성의 표면 조도에 대한 영향을 알아보기 위해 Fig. 4와 식 (1)과 같이 배분력 방향의 상대운동 방정식으로 표현할 수 있으며 식 (2)와 같이 상태 방정식을 통해 상대운동이 해석된다

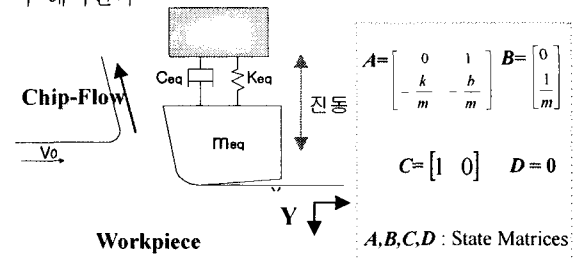


Fig. 4 Relative Motion of Machining System and State Matrices of State Space Equation

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = F(t) \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = u \quad (2)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

절삭력 신호에 대한 자기 스펙트럼 함수를 통해 동적 모델 인자 m, c, k 를 구하고 Fig. 5와 같이 가공 시스템에 대한 모드 테스트를 통해 동적 모델 인자를 확인 하였다. 모드 테스트 시, 모드 값은 절삭속도의 영향을 제외하기 위해 고주파영역에서 측정되었으며 배분력의 영향을 고려하기 위해 공구를 통해

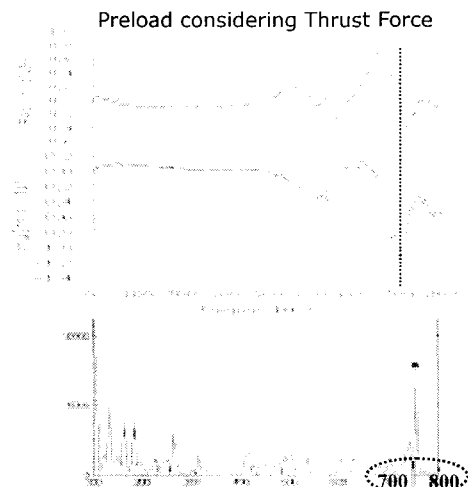


Fig.5 Transfer function by Modal Analysis Considering Preload and Autospectrum of Force Signals

예압을 가하였다^[4]. 주파수 분석을 통한 동적 모델 인자는 가공물과 공구 간의 지배적 1 차 모드 값과의 비교를 통해 확인 되었다.

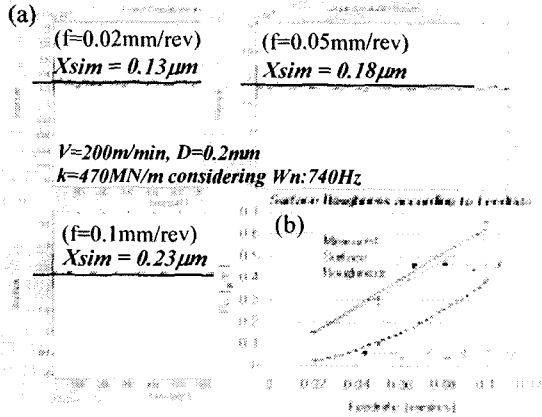


Fig. 6(a) Displacement of Relative Motion

Fig. 6(b) Surface Roughness according to Feedrate

절삭력의 주파수 분석을 통하여 구해진 동적 모델 인자로부터 상대운동변위 X_{sim} 를 해석하고 기하학적 표면 조도에 고려하면 실제 측정된 표면 조도에 가깝게 근사하는 것을 Fig. 6을 통해 알 수 있다. 이송 속도뿐만 아니라, 절삭 깊이 및 절삭 속도 변화에 대해서도 상대운동변위 X_{sim} 를 해석하고 기하학적 표면 조도에 고려하면 Fig. 7에서와 같이 측정된 표면 조도에 가깝게 근사하는 값을 구할 수 있다. 절삭 신호를 통해 얻어진 상대운동 변위를 고려하면 실질적인 표면 조도를 예측할 수 있다.

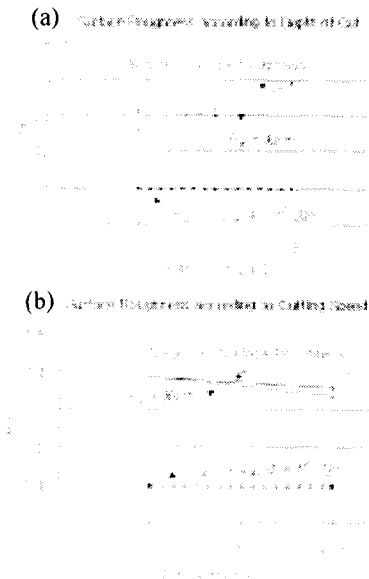


Fig. 7(a) Surface Roughness according to Depth of Cut

Fig. 7(b) Surface Roughness according to Cutting Speed

4. 결론

하드터닝 시 고정도 강제 가공에서 나타나는 칩의 단속적인 소성흐름으로 인해 동적 불안정성이 나타날 수 있으며 이는 표면 조도에 영향을 준다. 따라서, 하드터닝 시 상대운동 방향으로 발생하는 절삭력 불안정성의 주파수 분석을 통한 동적 모델 인자로부터 가공 시스템의 상대운동을 구하고 이를 기하학적 표면조도에 고려하여 실질적인 표면조도를 생성할 수 있다. 이는 가공 중에, 측정되는 절삭력을 통하여 가공물을 제거하지 않고 표면 조도를 예측할 수 있게 하며 궁극적으로 가공 조건의 제어를 통해 실시간 표면 조도 제어 가공 및 설계 시 동적 모델 인자를 변경을 가능하게 한다. 또한, 본 연구에서 측정된 표면 조도를 통해 하드터닝 공정에서 연삭 공정의 마무리 작업을 대체할 수 있는 고정도 표면 품질 구현이 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 기계류부품기술개발사업의 하드터닝대응형 고정밀 선반 개발 과제에 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. T. I. El-Wardany, H. A. Kishawy, M.A. Elbestawi, "Surface Integrity of Die Material in High Speed Hard Machining, Part I: Micrographical Analysis," Transaction of the ASME, Vol.122, pp.620 - 631, 2000.
2. H. K Tonshoff, C. Arendt, R. Ben Amor, "Cutting Hardened Steel," Annals of the CIRP, Vol. 49, pp. 1 - 19, 2000.
3. Edward M. Trent, Paul K. Wright., "Metal Cutting," Butterworth Heinemann, pp. 29 - 96, 2000.
4. 양민양, "절삭가공_이론과 실제," 청문각, pp. 17-59, 1997년
5. Gerard Poulachon, Alphonse L. Moisan, "Hard Turning: Chip Formation Mechanisms and Metallurgical Aspects," Transactions of the ASME, Vol. 122, pp.406 - 412, 2000
6. D. Y. Jang, Y. Choi, H. Kim, A. Hsiao, "Study of the Correlation between Surface Roughness and Cutting Vibration to Develop an On-Line roughness Measuring Technique in Hard Turning," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 36, pp. 453 - 464, 1996.
7. H.A. Kishawy, M.A. Elbestawi, "Effects of Process Parameter on Material Side Flow during Hard Turning," International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol.39, pp. 1017 - 1030, 1999