

고속가공시 절삭조건과 미시적 정밀도의 관계

강명창*, 김정석, 이득우(부산대 기계공학부), 김전하, 김철희(부산대 대학원)

The relation of Cutting conditions and Microscopic precision

M. C. Kang, J. S. Kim, D. W. Lee, J. H. Kim, C. H. Kim

ABSTRACT

This paper deals with the relation of cutting conditions and damaged layer by investigating cutting force, cutting temperature and residual stress in high speed machining. Damaged layer was measured using optical microscope on samples prepared by metallographic techniques. The scale of this damaged layer depends upon characteristics of cutting force and cutting temperature. Damaged layer depth increases with feed per tooth and radial depth. In a different another way, damaged layer remains almost unchanged according to spindle speed. Therefore, the effective method for decreasing damaged layer is that cut down feed per tooth and radial depth.

Key Words : Damaged layer(가공변질층), Cutting force(절삭력), Cutting temperature(절삭온도), Residual stress(잔류응력), High speed machining(고속가공)

1. 서론

최근 고속가공에 있어서 고속가공 기술의 도입으로 금형소재의 고정밀 및 고능률가공에 대한 요구가 급증하고 있다. 고속가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 가장 문제점으로 나타나는 것은 고속으로 고정밀가공을 가능하게 하는 공작기계의 개발과 고속절삭에 의해서 발생하는 절삭력과 절삭온도의 상승이다. 이것은 공작물의 표면 품질을 저하시키는 원인이 된다. 이를 위해 절삭조건에 따른 절삭력이나 절삭온도를 파악하여 가공면에 미치는 영향을 분석하고, 나아가 감시하는 기술이 요구된다. 가공물의 표면 품질이 미치는 효과의 중요성에 대한 연구는 Liu, Barash에 의해서 연구되어졌다. 이 연구에서는 가공된 표면에 가공변질층이라는 미소구조변화를 발생시키고 있다는 것을 보여주고 있다⁽¹⁾. 절삭가공시 재료의 표면층으로부터 모재 사이에서 발생하는 변질층은 공구 또는 가공물의 속도 및 이송과 절입깊이에 영향을 받게된다. 이로 미루어 볼 때 가공변질층은 절삭력과 절삭온도의 영향을 받는다는 의미다. 특히 피삭재와 공구가 직접 접촉하는 기계가공에 있어서, 가공 접촉부는 상당한 절삭력이 걸리고 가공물의 표면에서 내부로 열이 이동되어 내부

에 일정한 온도구배를 만들며, 여기에 잔류응력이 발생한다. 가공변질층과 잔류응력의 존재는 기계부품, 공구 및 금형등에서 변형과 파손의 원인이 되며 피로수명과 내식성 등에 영향을 주고 있다⁽²⁾. 따라서 변질층을 얇게하여 가공면의 품질을 향상시키는 것이 매우 중요시 되고 있다. 선삭 및 연삭가공면에 발생하는 변질층의 연구는 많이 진행⁽³⁾되어 온 반면에 고속 엔드밀링에서는 상대적으로 낮은 절삭력과 절삭온도로 변질층의 발생정도가 적기 때문에 측정상 단점이 많아 해석적인 측면뿐만 아니라 실험적으로도 큰 진전을 보지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 고속엔드밀 절삭시 냉간 금형강(STD11)의 저,고경도로 크게 두부분으로 나누었다. 그리고, 절삭조건을 변화시켜 광학현미경을 통한 가공변질층의 발생정도와 절삭력, 절삭온도, 잔류응력을 측정하여 절삭조건과 가공변질층과의 상관관계를 실험과 시뮬레이션을 통해 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 고속 머시닝 센터(MAKINO V-55)에서

수행하였고, 사용된 공구는 코팅(TiAlN)된 초경 플랫 엔드밀(4날, ϕ 10)을, 공작물은 열처리 전(H_RC15) 후(H_RC60)의 금형강(STD11)을 사용했으며, 그 화학적 성분은 Table 1과 같다. 실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 고속가공시 높은 회전수로 인해 발생하는 절삭력 신호는 매우 고주파이기 때문에 기존의 동력계로 측정하는 경우 측정오차가 발생하기 때문에 신뢰성이 있는 신호를 획득하기 위해서 자체적으로 개발한 고응답형 공구동력계⁽⁴⁾를 사용하였다. 절삭온도는 측정 온도범위가 -200℃ ~ 1250℃인 열전대(K-type)로 측정하였다. 잔류응력은 X선회절장치를 사용하여 절삭표면에서 깊이방향으로 측정하였다. 실험과 동일한 조건으로 절삭 시뮬레이션 프로그램인 TWA로 각각의 측정 파라미터를 계산한다.

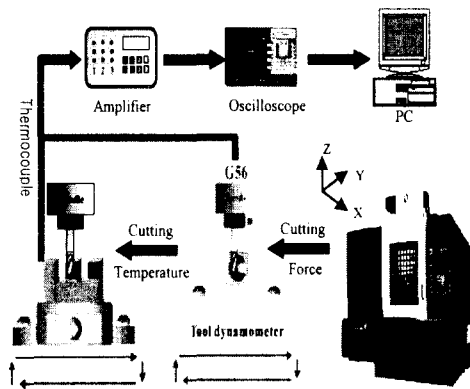


Fig. 1 Experimental setup for measuring cutting force cutting temperature

가공변질층을 측정하기 위한 절차는 Fig. 2와 같이 구성하여 공구현미경으로 관찰하였다.

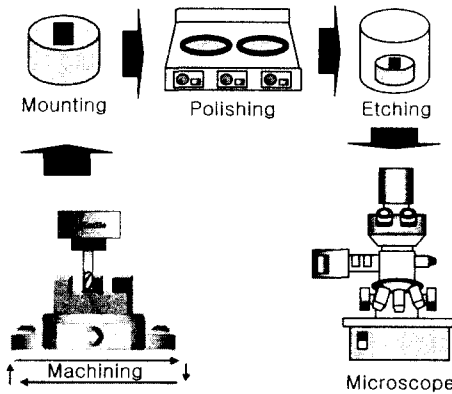


Fig. 2 Procedures for measuring damaged layer

Table 1 Chemical composition of STD11

Chemical composition(%)										
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Fe	
1.5	0.3	0.02	0.02	0.03	0.1	11.2	0.81	0.22	rest	

2.2 실험방법

고속가공시 절삭조건에 따른 절삭력, 절삭온도, 잔류응력 측정을 위한 시스템 사양은 Table 2와 같으며, 이때 가공변질층에 미치는 영향을 파악하기 위해 Table 3에 나타난 다양한 절삭조건으로 실험을 행하였다. 그리고 공구의 마멸이 가공변질층의 변화를 고려하지 않기 위해 각 조건에 대해서 마멸량이 거의 없는 공구를 사용하였다. 밀링가공의 단속절삭에서는 4개의 날이 함께 절삭력에 각각 영향을 미치게 된다. 따라서 절삭력은 2주기에 대해 평균값으로 분석하였다. 가공시 발생하는 절삭온도 측정을 위한 열전대 설치 방법은 다음과 같다. 열전대의 접점길이는 1mm로 경납땜하였으며 피삭재에 구멍을 뚫고 열전대를 삽입 관통시켜 열전대와 가공물이 완전 절연되도록 전용 시멘트를 사용하였다. 공구가 열전대를 절단하고 열전대의 끝부분의 접촉이 끊어지는 순간에 기전력의 신호를 1V당 100℃로 캘리브레이션된 증폭기를 거쳐 기록하였다. X선 회절원리를 이용한 잔류응력 측정은 표준시료를 이용하여 회절 최대강도를 찾아서 그 값을 기준으로 측정하였다.

Table 2 Specification for experimental device

Instrument	Specification
Machining center	MAKINO V-55 : Max 20000rpm
Dynamometer	3 Axis, Freq. Range : 5~10KHz
Oscilloscope	4CH, Max sampling : 400KHz
CCD camera	Olympus (x 500), STM-MJS2
X-ray diffractometer	Rigaku, D/MAX-2200

Table 3 Cutting conditions

Spindle speed (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Axial depth (mm)
6000~18000	0.025~0.1	0.1~0.4	10

가공변질층 측정을 위해 먼저 각 조건별로 가공된 시편에 대해 마운팅과 폴리싱 공정을 수행하였으며, 에칭(Ething) 과정을 거쳐 현미경으로 관찰하였다. 이때 사용된 에칭액으로는 고탄소강에 맞는 메탄올 95ml, 질산 5ml인 5% 나이탈(Nital) 용액에서 약 10초동안 부식시켜 조직차이로 깊이를 구했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭조건에 따른 절삭력의 특성

절삭조건에 따른 절삭력의 변화를 소재 경도별로 Fig. 3에 나타내었다. 실험과 시뮬레이션을 비교해보면, 정성적인 경향은 유사하지만 정량적인 차이가 보임은 공구 런아웃 및 가공기에서 발생하는 자체적인 진동의 영향으로 사료된다. 대개 주축 회전수에 따라서는 절삭력의 변화는 일정하고, 날당이송 및 반경방향 절입깊이에 따라서는 증가하는 경향이다. 절삭력 변화가 증가함은 칩제거량(MRR: Metal Removal Rate)이 증가하기 때문이다. 또한 고경도 소재에 반경방향 분력이 저경도 소재에 비해 3배 정도 큼을 확인했다.

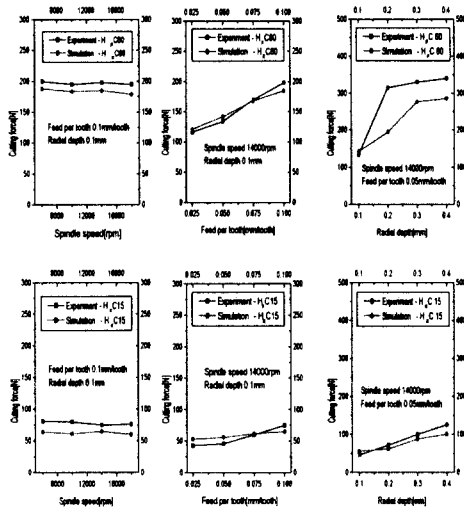


Fig. 3 Characteristics of cutting force according to cutting conditions

3.2 절삭조건에 따른 절삭온도의 특성

절삭조건에 따른 절삭온도의 변화를 절삭력의 변화와 같은 방법으로 Fig. 4에 나타내었다. 가공기 및 기타 측정장비에서 발생하는 전기적인 간섭에 의해 시뮬레이션과의 온도차이를 보인다. 여기서 시뮬레이션값을 신뢰할 수는 없지만, 본 실험에서도 시편과 가공기간의 완전절연이 필요함으로 사료된다. 경향면에서 살펴보았을 때, 주축 회전수에 따라서 절삭온도의 변화는 거의 일정하듯이 아주 서서히 증가된다. 날당이송의 증가에 따라서는 빠른 열원의 이동으로 감소하고, 반경절입의 증가에 따라서는 전단면 증가로 피삭재와의 큰 마찰열을 발생시키므로 절삭온도는 증가한다.

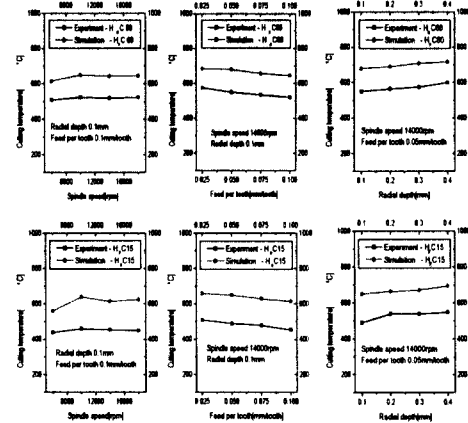
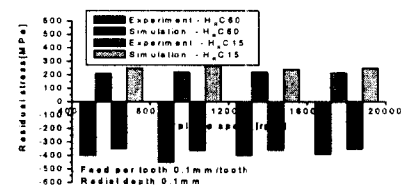


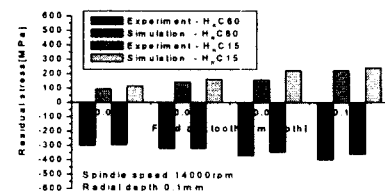
Fig. 4 Characteristics of cutting temperature according to cutting conditions

3.3 절삭조건에 따른 잔류응력의 특성

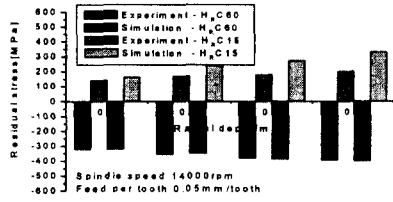
절삭조건에 따른 가공면에서의 잔류응력 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 주축회전수에 따라서 잔류응력의 변화는 일정하고, 날당이송 및 절입깊이에 따라서는 증가하는 경향으로 절삭력의 변화와 유사하다. 잔류응력의 특성은 절삭온도보다 절삭력의 영향이 큼을 확인했다. 모든 절삭조건에서 고경도 소재는 기계적인 버니싱(Burnishing) 효과로 표면에서 큰 압축잔류응력이 존재한다. 그러나, 저경도 소재는 가공시 변형이 깊은 층까지 도달하므로 표면에 인장잔류응력이 분포한다.



(a) For spindle speed



(b) For feed per tooth

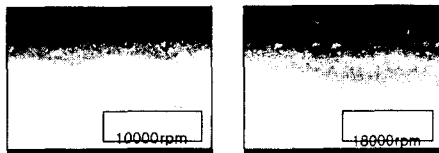


(c) For radial cutting depth

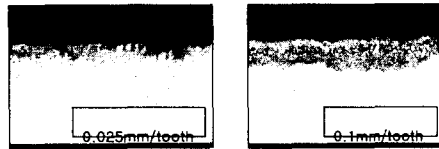
Fig. 5 Characteristics of residual stress according to cutting conditions

3.4 절삭조건에 따른 가공변질층의 특성

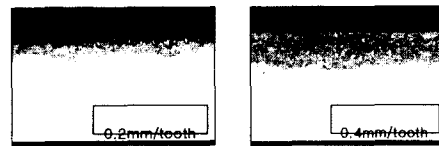
고경도 소재에서 가공면으로부터 임의의 깊이까지 가공변질층의 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 고속가공시 저경도 소재에 비해 고경도일수록 높은 절삭력으로 인해 가공변질층이 깊고, 고경도 소재에서 가공에 의한 변질열에 따라 열처리되어진 딱딱한 마르텐사이트 구조의 부분으로 추정되는 백색 부분의 변질층을 확인했다.



(a) Damaged layer in spindle revolution



(b) Damaged layer in feed per tooth



(c) Damaged layer in radial depth

Fig. 6 Variety of damaged layer according to cutting conditions

주축회전수에 따른 가공변질층의 깊이 변화는 뚜렷한 변화가 없고, 날당이송 및 절입깊이에 따른 가공변질층의 변화는 증가하는 절삭력으로 인해 일정한 슬립(Slip)이 발생하여 조각이 탄성한계를 넘어

유동형태로 변하기 때문에 가공변질층은 증가한다.

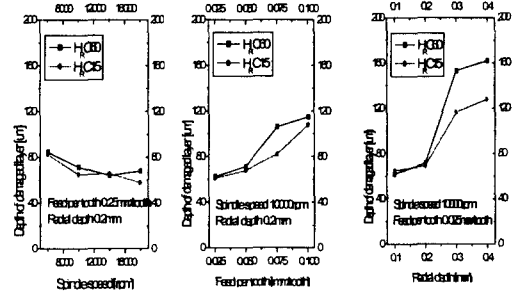


Fig. 7 Characteristics of damaged layer according to cutting conditions

4. 결론

금형강(STD11)의 고속 엔드밀가공시 절삭조건에 따른 미시적 정밀도의 관계는 다음과 같다.

본 실험조건에서 고속가공시 가공변질층은 소재의 경도에 관계없이 절삭온도 보다 절삭력의 특성과 유사함을 확인했다. 변질층 형성에 직접적인 영향을 줄 수 있는 절삭력 및 절삭온도 변화는 주축 회전수의 변화에 따른 영향은 아주 미소한 반면 날당이송 및 절입깊이 변화에 크게 좌우된다. 따라서 날당이송과 절입깊이를 적게하는 것이 가공변질층을 줄일 수 있는 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 그리고 고경도 소재일수록 높은 절삭력과 절삭온도로 인해 가공변질층이 깊어짐을 확인했다.

참고문헌

- Matumoto, Y., and Barash, M.M., "Residual stress in the machined surface of hardened steel High Speed Machining", Presented at the winter annual meeting of the ASME, Dec, pp.193-204, 1984
- J. Tlustý, S.Smith, "Current Trends in High-Speed Machining" Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME, Vol. 119, pp.664-666, 1997.
- Y.K. Chou, C.J. Evans, "Process effects on white layer formation in hard turning, Transactions of NAMRI/SME Vol.26 pp.117-122, 1998.
- 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발", 한국정밀공학회지, 제16권 5호, pp.11-18, 1999.