

고속가공에서 미시적 정밀도의 특성 평가

Characteristic evaluation of microscopic precision in high speed machining

김철희* · 김전하(부산대원) · 강명창 · 김정석(부산대)
C H Kim, J H Kim(Graduated School, Pusan Nat'l Univ.),
M C Kang, J S Kim(Pusan Nat'l Univ.)

Abstract

In this study, residual stress was investigated to evaluate damaged layer in high speed machining through simulation. In machining steel(STD11), residual stress remaining in machined surface was mainly appeared as compressive stress. The scale of this damaged layer more depends on feed per tooth and radial depth than spindle speed. Damaged layer was measured by optical microscope and hardness method. The micro-structure of damaged layer was a martensite because of cutting force and cutting temperature. Thickness of damaged layer is increased with increasing of feed per tooth and radial depth.

Key words : Residual Stress(잔류응력), Damaged Layer(가공변질층), High Speed Machining(고속가공), Cutting Conditions(절삭조건), Micro-Structure(미세조직)

1. 서론

고속가공이라는 개념은 피삭재의 관점에서 볼 때에 매우 상대적이라고 할 수 있다. 그것은 피삭재의 종류에 따라 공구마멸을 최소화 하면서 가공할 수 있는 절삭속도에 큰 차이가 나기 때문이다. 따라서 고속가공은 전단의 국부화가 완전히 일어나는 속도 이상에서의 가공으로 정의한다^[1]. 절삭력과 절삭온도는 가공한 금속의 표면조도 또는 표면으로부터 어떤 미소 깊이까지 내부의 모재와 다

른 성질을 가진 층을 만든다. 변질된 층의 정도는 가공방법과 가공조건에 따라서 다르나 이런 현상의 층을 가공변질층이라 한다. 공구와 공작물에 심한 마찰작용이 발생하여 공작물은 소성변형을 받아 표면이 변형되어 새로운 가공변질층이 생기고, 내부에 잔류응력을 가지며, 경도변화, 부식, 소성유동등 공작물의 피로강도에 영향을 미치는 변화가 일어나기 때문에 가공 표면의 성질이 문제가 되는 초정밀가공에서는 매우 중요하다^[2]. 2차원 절삭인 선삭에 있어서 기존의 연구에 의하면, 절삭과정으로 인해 발생하는 가공변질층에 관한 연구가 유한요소해석 기법을 도입해 시뮬레이션을 수행하는 등 상당수 진행되었음에도 불구하고 엔드밀과 같은 3차원 절삭 메커니즘에서 발생하는 가공변질층의 특성 규명에는 아직 많은 한계성을 드러내고 있다^[3]. 금속 조직의 변질과 가공변형의 잔류는 가공표면의 아주 작은 크랙을 발생시키므로 정밀가공의 범주내에서 이러한 가공변질층에 관한 연구가 활발히 진행되어 이를 저감시킬 수 있는 대책이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 가공변질층 특성을 규명하고자 상용 소프트웨어 TWA(Third Wave AdvantEdge)를 이용한 잔류응력 시뮬레이션을 수행하였고, 이와 병행하여 전자현미경과 광학현미경으로부터 가시적인 관찰과 미소경도법을 통해 정량적인 변질층 두께를 측정하여 이를 비교, 분석하였다.

2. 가공변질층의 생성과 특성

기계가공된 금속재료의 표면에서 어떤 미소 깊이까지 모재와 다른 성질을 지닌 가공변질층의 생성은 Fig. 1에 도시화 하였다. 절삭깊이 t로 절

삭이 이루어질 때, 공구날 전방에 □ABCD와 □EFGH의 2개의 사각형으로 분할할 수 있으면 가공면이 스트레인 없는 이상적인 절삭가공이 이루어 지지만, 실제로는 엔드밀 날부의 메커니즘에 의해서 □ABCD는 A'B'O가 되고 □EFGH는 공구날의 압축력을 받아 사선부분 GHO와 같이 되고, 또한 절삭시 발생하는 온도에 의해서 가공면 표면으로부터 미소깊이까지 모재와 성질이 다른 조직으로 변형되어 가공변질층이 형성된다. 이와 같은 표피층은 소성변형, 결정구조나 조직변화를 포함하며 이로 인하여 경도의 변화가 생기고 잔류응력이 존재하게 된다. 이 변질층은 결정입자가 파쇄되어 미세화되고, 표피에는 비결정질에 가까운 미세결정으로 된다. 결정입자가 절삭방향으로 유동하여 동일방향을 취하는 섬유조직(Fiber structure)과 같이 된다. 변질층 깊이는 표피에서 깊이방향으로 일정하지 않고 변화구배가 심하여 고속 엔드밀 가공에서 변질층의 정량적인 두께를 정하기는 어렵지만 최대 100 μ m 내의 임을 알 수 있으며 절삭조건, 피삭재의 조직, 경화능, 결정입자의 크기에 따라 변하는 것으로 알려져 있다^[4]. 이러한 변질층은 커다란 잔류응력이 존재하며, 내부 에너지가 높고 변화구배가 큰 표피는 여러 가지 영향을 받기 쉬우며, 화학적 또는 기계적 성질도 내부의 것과는 달라진다.

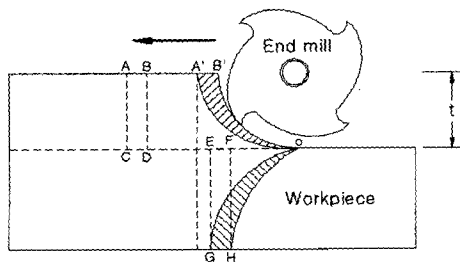


Fig. 1 Mechanism of damaged layer

3. 실험장치 및 방법

3.1 절삭력 실험

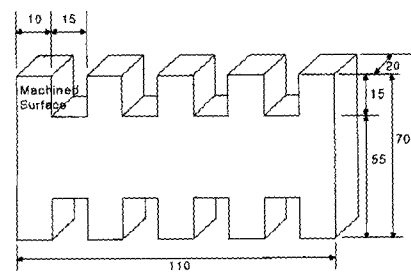
Fig. 2와 Fig. 3에 실험에서 사용된 시편과 절삭력 실험장치도를 각각 나타내었다. 시편은 STD11(HRc23, 58)을 사용하였으며 실험장치로는

고속 머시닝센터와 고속가공시 높은 회전수로 인해 발생하는 절삭력 신호는 매우 고주파수이기 때문에 기존의 동력계로 측정하는 경우 측정오차가 발생하기 때문에 신뢰성이 있는 신호를 획득하기 위해서 자체적으로 개발한

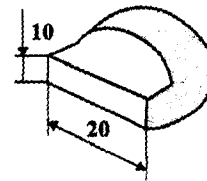
고응답형 공구동력계(Dynamometer)를 사용하였으며, 그리고 오실로스코프를 조합하여 절삭력을 측정하고 공구는 TiAlN 코팅된 초경 플랫 엔드밀(ϕ 10mm 4날)을 사용하였으며, 이때 실험에 사용된 시스템 사양은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Instrument for experiment

Instrument	Specification
Machining center	MAKINO V-55: Max 20,000rpm
Dynamometer	3 Axis, Freq. range : 5~10kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling: 400kHz
Surface roughness measuring device	Taylor Hobson
Micro Hardness tester	Mitutoyo, Max load:1Kgf
CCD Camera	Olympus(\times 500), STM-MJS2
SEM	Hitachi S-4300, Phoenix 60



(a) Damaged layer workpiece



(b) Cutting force workpiece

Fig. 2 Workpiece type for machinability evaluation (Unit:mm)

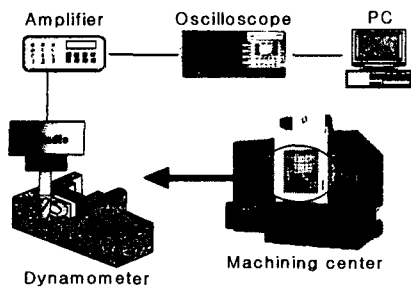


Fig. 3 Experimental setup for measuring cutting force

3.2 가공변질층 측정 실험

3.2.1 가시화 장치를 이용한 변질층 측정

가공변질층을 측정하기 위한 절차는 Fig. 4와 같이 구성하였다. 고속가공시 절삭조건에 따른 절삭력, 표면거칠기, 전자현미경(SEM)을 이용하여 조직을 촬영하여 가공변질층의 특성을 파악하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 서로 경도가 다른 두 종류의 시편으로 고속 머시닝센터를 이용하여 Table 2와 같은 절삭조건으로 실험을 수행하였다. 공구 마멸에 의한 변질층의 영향을 줄이기 위하여 각 조건에 대해서 코팅 공구를 사용하였다.

Table 2 Cutting conditions

Spindle speed (rpm)	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Axial depth (mm)	Feed speed (mm/min)
6000~14,000	0.01~0.04	0.05~0.08	10	400~1,600

절삭을 수행한 뒤 각 절삭조건에 따른 표면 거칠기를 측정하고 저경도(HRc 23) 소재는 시편 절단기를 이용하여, 고경도(HRc 58) 소재는 와이어 방전가공을 이용하여 시편 단면을 절단하였다. 그리고 폴리싱 공정시 가공면 모서리 부위의 탈락을 방지하기 위해 시편과 수지 경계의 갭(Gap)이 거의 없는 열간마운팅(Hot mounting)을

수행하였으며 폴리싱 공정을 수행한 뒤 에칭(Etching)한 후 전자현미경 및 CCD 카메라로 관찰하는 공정으로 실시하였다. 에칭액으로는 고탄소강에 맞는 메탄올 100ml, 질산 20ml, 염산 10ml의 왕수를 선정하였다.

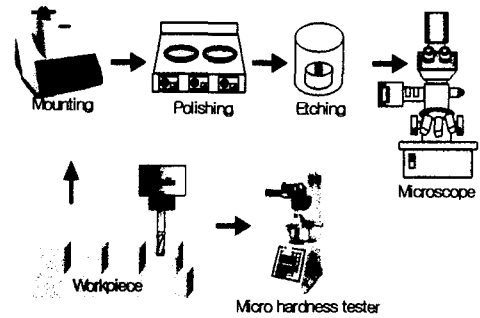


Fig. 4 Procedures for measuring damaged layer

3.2.2 경도법을 이용한 변질층 측정

경도법이란 변질층은 가공경화를 받으므로 단면을 미소경도계(Micro hardness tester)로 경도를 측정하여 그 값이 일정값이 될 때까지 측정하고 그 깊이를 변질층의 깊이로 하는 방법이다. 가시화 측정용 시편과 같은 조건으로 가공한 또 다른 시편으로 저경도, 고경도 소재의 가공면 초기 경도값을 측정한 뒤 가공면 표면으로부터 깊이 5 μ m 단위로 표면을 제거하면서 미소경도계를 이용하여 경도값 측정 오차를 줄이기 위해 3회씩 반복 측정하여 평균값으로 경도값을 정하였다.

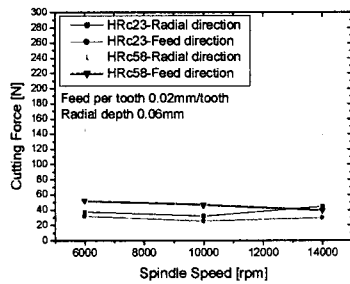
4. 실험결과 및 고찰

4.1 가공조건에 따른 절삭력 특성

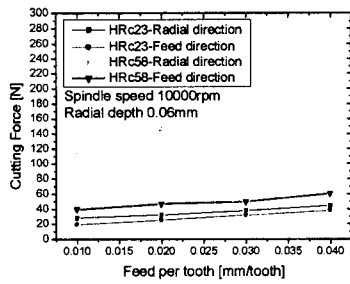
엔드밀 가공은 연속절삭이 아니라 단속절삭이므로 비절삭 구간은 제외한 절삭구간만 공구에 걸리는 절삭력을 분석하였다. Fig. 5는 절삭력 비교 그림으로 (a)는 주축회전수에 따른 절삭력이고, (b)는 날당 이송량에 따른 절삭력이고, (c)는 반경방향 절입깊이에 따른 절삭력이다.

회전수에 따른 절삭력은 절삭속도가 증가해

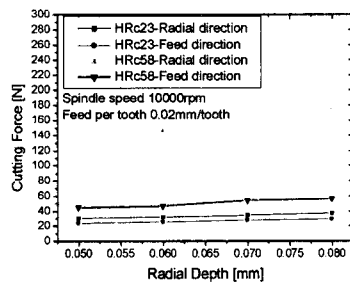
도 절삭력의 변화는 없이 거의 일정한 경향을 보이고 있으며, 낄당 이송량 및 반경방향 절입깊이에 따라 절삭력의 변화는 증가함을 알 수 있다. 이때 낄당 이송량에 따른 변화구배가 가장 크므로 절삭력과 절삭온도에 민감한 반응을 보이는 가공변질층에 주로 이송의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.



(a) Spindle speed



(b) Feed per tooth

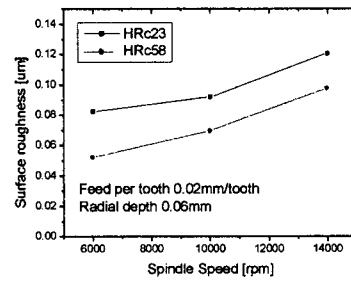


(c) Radial depth

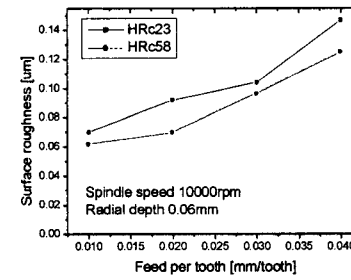
Fig. 5 Characteristics of cutting force according to cutting conditions

4.2 가공조건에 따른 표면거칠기

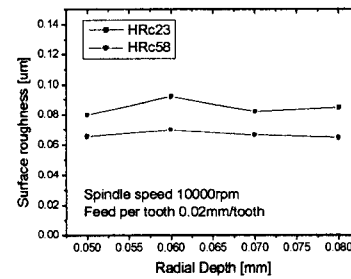
Fig. 6은 가공조건에 따른 표면거칠기 비교 그림으로 R_a (중심선평균거칠기)값을 나타내고 있다. (a)는 주축회전수에 따른 표면거칠기이고, (b)는 낄당 이송량에 따른 표면거칠기이고, (c)는 반경방향 절입깊이에 따른 표면거칠기이다. (a), (b)처럼 이송이 증가함에 따라 거칠기값도 증가함을 보아 가공변질층에 이송의 영향이 크다는 것을 다시 확인할 수 있었다.



(a) Spindle speed



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth

Fig. 6 Characteristics of surface roughness according to cutting conditions

4.3 가공변질층 형상 및 측정

광학 현미경($\times 500$)으로 절삭조건에 따른 가공변질층의 형상을 Fig. 7에 나타내고 있다. (a)는 저경도 소재에 있어서 절삭가공에 전혀 관련이 없는 모재 부분의 조직이고, (b)는 고경도 소재의 것이다. (a)는 부분적으로 스페로이드이트로 변태된 펄라이트 미세조직을 확인할 수 있었고, (b)는 마르텐사이트 미세조직으로서 침상형 입자는 마르텐사이트 상이고 흰 부분은 급랭 중에 변태되지 않은 오스테나이트상이다. 그리고 가공변질층은 부식에 저항력이 약하므로 가공면 부위에는 많은 석출물과 파에칭 자국으로 변질층을 구분할 수 있고, 여기에 마르텐사이트 조직을 볼 수 있다.

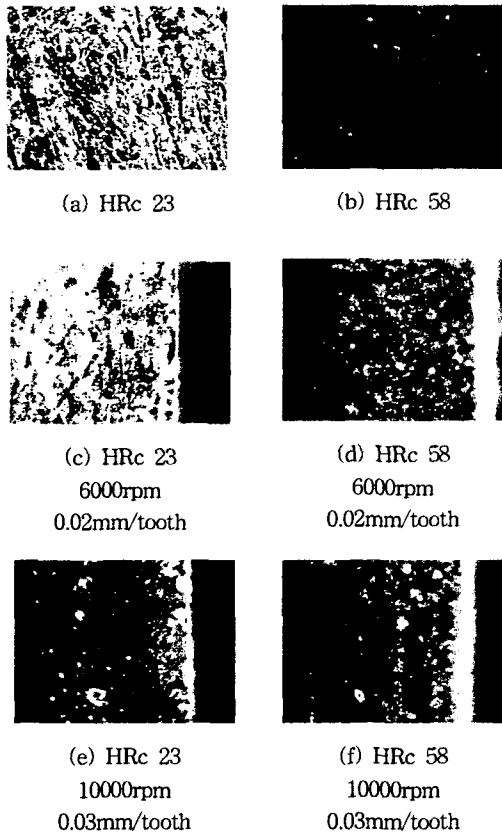


Fig. 7 Shapes of damaged layer

상용 소프트웨어 TWA를 이용하여 동일 실험 조건으로 시뮬레이션 결과를 Fig. 8에 나타내고 있다. 잔류응력의 깊이가 가공변질층 깊이와 거의 유

사하기 때문에 잔류응력이 영(Zero)이 되는 지점이 변질층의 두께로 결정할 수 있다. 변질층의 구조는 가공면 표면에는 아주 약한 인장잔류응력이 깊이방향으로 향하면서 주로 압축잔류응력이 존재한다는 것을 확인할 수 있다.

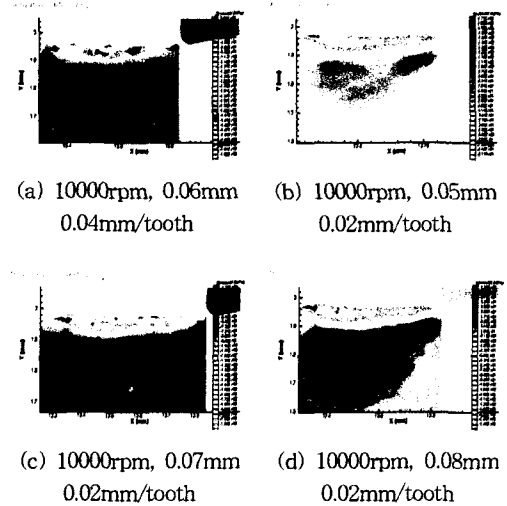
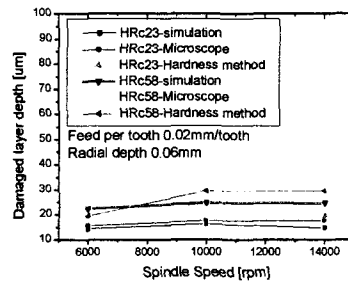
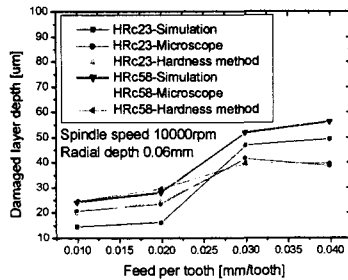


Fig. 8 Distribution of residual stress

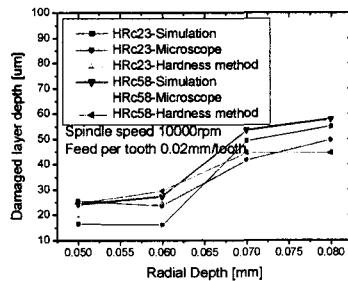
Fig. 9(a), (b), (c)에 시뮬레이션, 가시화 데이터, 미소경도법으로 변질층 두께를 측정하여 시뮬레이션을 기준으로 오차율을 비교하였다. 회전수에 따른 가공변질층의 두께 측정에서 가시화 방법은 10~18% 정도의 오차율을, 미소경도법은 18~20%의 오차율을 보인다. 이때 경도값의 차이가 아주 좁기 때문에 범위가 넓은 비이커스 경도값으로 채택하였다.



(a) Spindle speed



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth

Fig. 9 Measurement of damaged layer according to cutting conditions

날당 이송량의 변화에 따른 가공변질층의 두께 측정에서 가시화 방법은 11~25% 정도의 오차율을, 경도법은 17~23%의 오차율을 보인다.

반경방향 절입깊이에 따른 가공변질층의 두께 측정에서 가시화 방법은 10~20% 정도의 오차율을, 경도법은 9~17%의 오차율을 보인다. 여기서 날당 이송량의 변화와 반경방향 절입이 가공변질층 변화가 민감함을 알 수 있다. 또한 절삭력의 영향으로 인해 고경도 소재의 변질층 두께가 두껍게 나타난다. 따라서 가공변질층의 두께 변화는 절삭력에 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

고속가공에서 금형강(SKD11)의 경도에 따른 가공변질층의 특성을 조사하여 다음과 같은 결과

를 얻었다.

- (1) 저경도 소재에 비해 고경도 소재에서 높은 절삭력의 영향으로 인해 높은 압축잔류응력의 존재로 가공변질층이 두꺼움을 알 수 있다.
- (2) 예측과 실험의 가공변질층에 대하여 비교한 결과 비교했을 때 오차율 10~20% 범위내에 있으며, 가공면 표면에는 약한 인장잔류응력이, 아래에는 압축잔류응력이 존재함을 알 수 있다.
- (3) 주축 회전수에 따른 가공변질층의 변화는 거의 볼 수 없으며, 주로 날당 이송과 반경방향 절입깊이의 변화에 민감함을 알 수 있다.
- (4) 가공면 주위의 과에칭 현상으로 가공변질층은 부식에 대한 저항력이 약함을 알 수 있다.
- (5) 가공변질층 변화는 기계적 요인인 절삭력의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

이상의 연구 결과를 통하여 절삭온도에 따른 가공변질층의 특성을 파악하여 기계적인 요인과 함께 열적인 요인에 의한 경향성을 파악하고자 한다.

참고문헌

1. N. Narutaki, Y. Yamane, "High-Speed Machining of Inconel 718 with Ceramic Tools", Annals of the CIRP vol. 42, pp.103-106, 1993
2. Y. Matsumoto, M. M. Barash, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel", Transactions of the ASME, vol. 113, pp.154-159, 1991
3. X. X. Yu, W. S. Lau, T. C. Lee, "A Finite Element Analysis of Residual Stress in Stretch Turning", International journal of MTM, vol.37, No.10, pp.1525-1537, 1997
4. B.J. Griffiths. White layer formations at machined surfaces and their relationship to white layer formations at worn surfaces. Transactions of the ASME. Journal of Tribology 107. pp.165-171, 1985