

## 엔드밀 가공시 가공속도에 따른 가공변질층 특성 연구

황인옥\*(부산대 대학원 나노시스템공학협동과정), 이종환(부산대 대학원 정밀기계공학과),  
김전하(부산대 기계기술연구소), 강명창(부산대 정밀정형 및 금형가공연구소),  
김정석(부산대 기계공학부), 이득우(부산대 나노기술학부)

A Study on Damaged Layer Characteristics according to Cutting Speed in End-milling

I. O. Hwang(Graduate School, PNU), J. H. Lee(Graduate School, PNU), J. H. Kim(RIMT, PNU),  
M. C. Kang(ERC, PNU), J. S. Kim(School of Mech. Eng., PNU), D. W. Lee(School of Nano Tech., PNU)

### ABSTRACT

As the technique of high-speed end-milling is widely adopted to in machining field. The investigation for microscopic precision of workpiece is necessary for machinability evolution. In this study, cutting force, cutting temperature and microhardness were investigated to evaluate damaged layer in conventional machining and high-speed machining. Damaged layer was measured using optical microscope. The thickness of damaged layer depends on cutting process parameters, specially feed per tooth and radial depth. It is obtained that the characteristics of damaged layer is high-speed machining better than conventional machining.

**Key Words** : Damaged layer(가공변질층), Cutting speed(가공속도), Cutting force(절삭력), Cutting temperature(절삭온도), End-milling(엔드밀 가공)

### 1. 서론

최근 금형가공에서 생산성 및 정밀도 향상의 요구에 따라 고속가공의 도입이 활발히 이루어지고 있다. 이를 위해 가공면을 측정, 평가하고 나아가 감시하는 기술이 요구된다. 절삭가공시 재료의 표면층으로부터 모재 사이에서 발생하는 변질층은 공구 또는 가공물의 속도 및 이송의 영향을 받게 된다. 특히, 피삭재와 공구가 직접 접촉하는 기계가공에 있어서 가공에 의한 변질이 현저하며, 가공 접촉부는 가공물의 표면에서 내부로 열이 이동되고 내부에 일정한 온도구배를 만들며, 여기에 잔류응력이 발생한다. 가공 표면부로부터 가공변질층과 잔류응력의 존재는 기계부품, 공구 및 금형 등에서 변형과 파손의 원인이 되며 피로수명과 내식성 등에 영향을 주고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서 변질층에 대한 고찰은 가공부품의 성능, 수명 또는 가공공정에 영향을 미친다는 점에서 매우 중요하다. 지금까지 많은 연구가들에 의해 선삭 및 연삭, 방전가공면에 발생하는 변질층의 연구가 많이 진행되어 온 반면, 엔드밀 가공에서는 상대적으로 낮은 절삭력과 절삭온도로 변질층의 발생정도가 적기 때문에 측정상 난점이 많아 해석적인 측면뿐만 아니라 실험적으로도 큰 진전을 보지 못하고 있다.<sup>(2, 3)</sup>

본 연구에서는 엔드밀 가공시 저속 중절삭에서의 가공조건과 고속가공일 때의 가공조건에 따른 절삭력과 절삭온도를 비교 측정하고, 이에 따른 가공변질층의 발생정도를 측정하였다. 이로 인해 가공변질층의 발생정도 측면에서도 범용가공보다 고속가공에서 가공할 때 고정도, 고품위의 가공을 할 수 있음을 제시하고 한다.

### 2. 이론적 배경

Fig. 1은 가공변질층의 생성원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 실제로는 엔드밀 날부의 메커니즘에 의해서 □ ABCD는 A'B'O가 되고 □ EFGH는 공구날의 압축력과 마찰을 받아 사선부분 GHO와 같이 되고, 또한 절삭시 발생하는 온도에 의해서 가공면 표면으로부터 미소깊이까지 모재와 성질이 다른 조직

으로 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 동일 방향을 취하는 섬유조직(Fiber structure)과 같이 된다. 변질층 깊이는 표피에서 깊이방향으로 일정하지 않고 변화구배가 심하여 엔드밀 가공에서 변질층의 정량적인 두께를 정하기는 어렵지만 최대 100 $\mu$ m 내외임을 알 수 있으며 절삭조건, 피삭재의 조직, 경화능, 결정입자의 크기에 따라 변하는 것으로 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

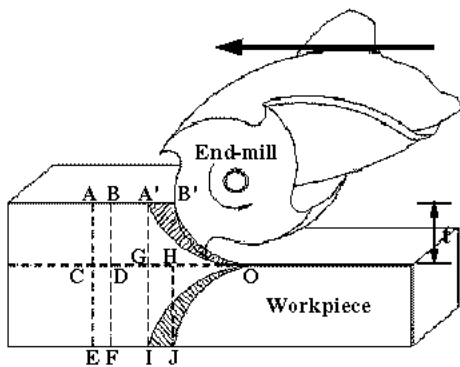


Fig. 1 Mechanism of damaged layer

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에서는 최대주축회전수 20,000rpm인 고속머시닝센터(MAKINO V55)에서  $\varnothing$ 10 초경플랫엔드밀을 사용하였다. 자체 개발한 고응답형 공구동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였고, 적외선 온도측정기를 사용하여 절삭온도를 간접적으로 측정하였다. 실험장치도는 Fig. 2와 같고 실험에 사용된 장비는 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental devices

Instrument	Specification
Dynamometer	3 Axis, Freq. range : 5~10kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling : 400MHz
Microscope	Olympus( $\times$ 500), STM-MJS2
Temperature tester	3M IR-16L3, Temp. range : -18~870 $^{\circ}$ C
Hardness tester	Vickers hardness

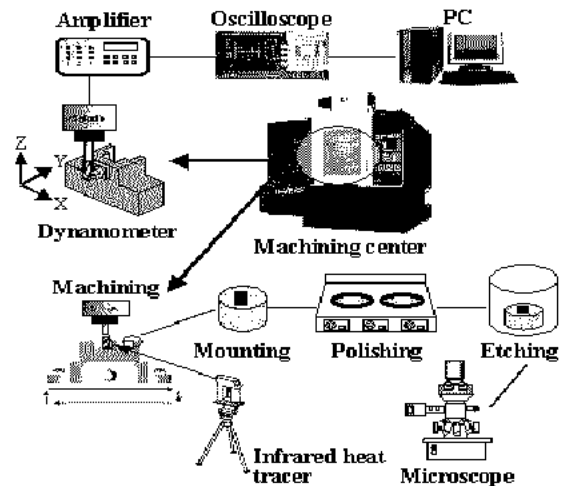


Fig. 2 Experimental setup

#### 3.2 실험방법

가공속도에 따른 가공변질층 특성 연구에 있어서 기존 범용가공에서의 가공조건과 고속가공에서의 가공조건을 적용하여 상대적인 비교를 하였다. 시편은 금형강(STD11)을 사용하여 가공속도에 따라 피드를 고정한 것과 가공속도에 따라 피드를 증가시킨 조건으로 비교하였다. 실험에 따른 가공조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Cutting condition

Spindle speed(rpm)	2000, 4000, 8000, 16000
Feed rate(mm/min)	1600
	1000, 2000, 3000, 4000
Radial depth of cut(mm)	0.8, 0.4, 0.2, 0.1
Axial depth of cut(mm)	8

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 절삭력 및 절삭온도 측정

가공면의 변질층에 있어서 기계적인 응력에 가장 큰 영향을 미치는 것이 절삭력이다. 범용 중절삭의 가공조건과 고속가공 조건에서의 절삭력을 비교하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 범용가공보다 고속가공 조건에서 가공했을 때가 절삭력이 아주 작게 발생하는 것을 볼 수 있다. 엔드밀 가공에서 크게 영향을 미치는 반경방향 절삭력이 고속가공 조건에서는 가공피드를 1,600mm/min으로 고정했을 때 약 30N, 피드를 4,000mm/min으로 증가시켰을 때는 약 51N이었다. 그러나 범용가공 조건으로 가공했을 때는 피드를 고정시 약 600N이었고, 피드를 1,000mm/min로 줄였을 때는 약 474N으로 고속가공 조건으로 갈수록 절삭력에서 유리함을 보였다.

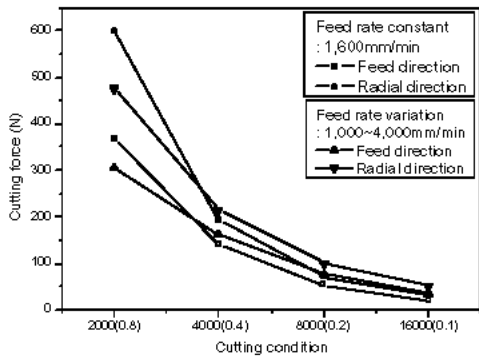


Fig. 3 Cutting force depending on cutting condition

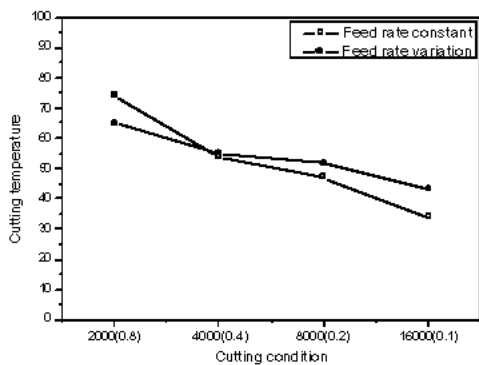


Fig. 4 Cutting temperature in workpiece depending on cutting condition

가공변질층에 있어서 절삭온도의 영향 또한 크다. 엔드밀이 가공면을 지나간 직후에 소재의 온도를 측정하여 절삭온도를 간접적으로 비교하였다. 적외선 온도측정기의 응답속도가 350msec로 발생하는 오차를 고려하여 10회씩 측정 후 평균값을 구하여 비교하였다. 간접적으로 측정한 절삭온도의 비교는 Fig. 4에 나타내었다. 절삭온도에 있어서도 피드를 고정했을 때와 피드를 변화시켰을 때 모두 범용가공 조건보다 고속가공 조건일 때 낮게 분포됨을 알 수 있다. 그리고, 고속가공 조건에서 절삭온도가 소재로 전달되는 비율이 약 5% 정도라고 하면 피드를 1,600mm/min으로 고정하였을 때, 16,000rpm에서는 절삭온도가 약 650°C 정도로 예측된다.

또한, 칩의 색깔로써 절삭온도를 간접적으로 비교할 수 있다. Fig. 5에 가공조건별 칩의 색깔을 나타내었다. 절삭속도가 저속으로 절입이 클 때는 칩이 짙은 청색을 띄었으나 절입이 작은 고속가공 조건일 때는 칩이 소재와 동일한 색을 띄었다. 그러나 8,000, 16,000rpm에서 피드를 3,000, 4,000mm/min으로 빠르

게 변경했을 때는 칩의 색깔이 청갈색을 띄었다. 칩 색의 경향은 적외선 온도측정기를 사용한 간접적인 온도측정법과 유사한 경향으로 나타났다.

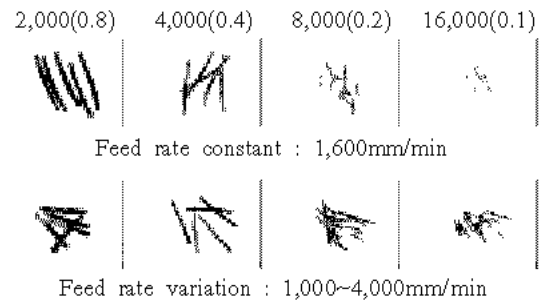


Fig. 5 Chip characteristics depending on cutting condition

#### 4.2 가공변질층의 미세경도 측정

가공변질층의 측정방법 중의 하나인 경도법을 이용하여 표면으로부터 가공변질층의 깊이를 측정해보았다. 경도법은 변질층이 가공경화를 받으므로 단면을 미소경도계(Microhardness tester)로 경도를 측정하여 일정값이 될 때까지 측정하고 그 깊이를 변질층의 깊이로 하는 방법이다.

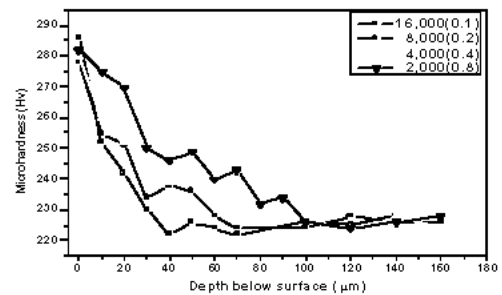


Fig. 6(a) Microhardness after machining depending on cutting condition (Feed rate constant)

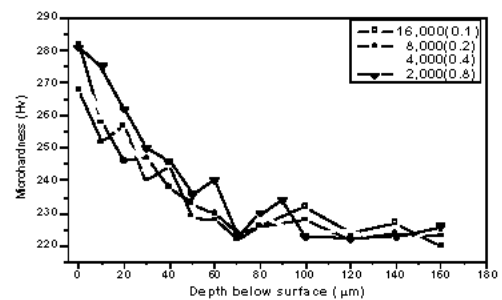


Fig. 6(b) Microhardness after machining depending on cutting condition (Feed rate variable)

가공부의 영향이 없는 소재의 경도는 비커스 정도 220~230HV 사이로 측정되었다. Fig. 6(a)에서 보는 것과 같이 피드가 일정한 조건에서는 고속가공의 조건이 가공변질층의 깊이가 30~40 $\mu\text{m}$  정도로 80~100 $\mu\text{m}$  정도의 범용가공 조건보다 가공변질층의 면에서 유리함을 알 수 있다. Fig. 6(b)에와 같이 고속가공 조건으로 갈수록 피드를 상승시킨 경우에도 고속가공의 조건에서 가공한 면이 변질층의 깊이가 25~35 $\mu\text{m}$  정도 알게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 변질층부는 가공경화에 의해 대체적으로 경도가 크게 나타났다. 경도법에 의한 가공변질층 깊이 특성을 보면 범용가공의 조건에서 가공한 면이 고속가공의 조건보다 피드 고정시 가공변질층이 약 2~3배정도 깊게 나타나는 것을 볼 수 있다. 같은 조건에서 절삭력은 고속가공의 조건이 약 20배 정도 낮지만, 절삭온도는 약 2배 정도 낮아 변질층 깊이의 경향과 유사하였다. 이를 종합해보면 기계적 응력에 영향을 미치는 절삭력은 주위가 개방된 시편의 특성상 가공 후 응력이 풀림으로 해서 크게 영향을 미치지 않고, 오히려 절삭온도의 영향이 크게 작용했다고 사료된다.

#### 4.3 가공속도에 따른 가공변질층 특성

가공한 시편을 나이탈(Nital) 부식액(질산 3%)에 약 10초간 에칭(Etching)한 후 광학현미경으로 가공변질층 부를 관찰하였다. 명확하게 가공변질층 부분이 선명하게 나타나는 것이 아니고 에지(Edge)부에 국부적으로 가공변질층이 나타남을 볼 수 있었다.

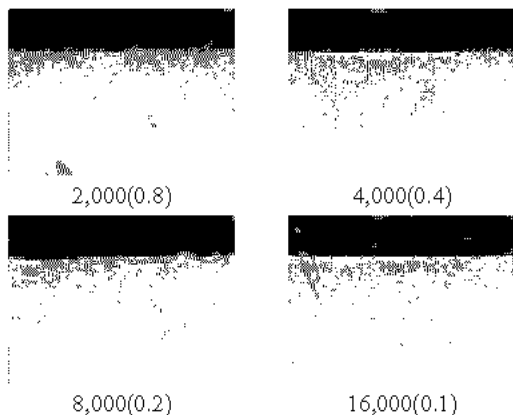


Fig. 7 Damaged layer depending on cutting condition ( $\times 500$ )

가공변질층에서 벨비층(Beilby layer)을 포함한 과도한 변질층(Extreme damaged layer)에서 가벼운 변질층(Light damaged layer)까지 서서히 변하는 변질의 정도로 인해 명확하게 변질층을 경계를 정할 수 없지만, 현미경의 관찰에서 어느 정도의 조직변화에 의한 그 깊이를 측정하였다. Fig. 7은 피드를 일정하

게 했을 때의 각 가공조건별 가공변질층의 생성 정도를 보여준다. 고속가공의 조건보다 저속 중절삭의 가공조건에서 변질층 깊이가 큰 부분은 약 80~90 $\mu\text{m}$  정도로 깊게 나타났으며, 고속가공 조건으로 갈수록 가공변질층 깊이의 경향이 약 30~50 $\mu\text{m}$  정도로 알게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 경도법에 의한 가공변질층 깊이 측정과 유사한 경향으로 나타났다.

#### 5. 결론

범용가공 조건과 고속가공 조건에 따른 가공변질층 특성 연구에 있어서 다음과 같은 결론을 얻었다.

기계적 응력에 영향을 미치는 절삭력 측정과 열적 영향을 미치는 절삭온도의 간접적 측정 결과 고속가공의 조건으로 갈수록 저속 중절삭의 가공조건보다 절삭력 및 절삭온도가 작았다. 고속가공 조건에서 피드를 증가시켰을 때에도 절삭력과 절삭온도가 낮게 분포함을 알 수 있다. 경도법으로 가공변질층의 깊이를 측정해 본 결과 고속가공의 조건으로 갈수록 경도가 안정화되는 깊이가 낮게 나타남을 볼 수 있었다. 또한, 가공변질층에 있어서 절삭력의 영향보다는 절삭온도의 영향이 더 큼을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 엔드밀 가공시 고속가공의 조건으로 갈수록 저속 중절삭의 가공조건보다 가공변질층의 발생 측면에서도 유리함을 나타내어 고속가공이 범용가공보다 고정도, 고품위 가공에 유리함을 알 수 있다. 향후 연구에서는 엔드밀 가공에서 냉각·윤활방식 변화에 따른 가공변질층 특성에 관한 연구를 수행하고자 한다.

#### 참고문헌

1. Tlusty, J., Smith, S., "Current Trends in High-Speed Machining," Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME, Vol. 119, pp. 664-666, 1997.
2. Chou, Y. K., Evans, C. J., "Process effects on white layer formation in hard turning," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 117-122, 1998.
3. Cusanelli, G., Hessler-Wyser, A., Bobard, F., Demellayer, R., Perez, R. and Flükiger, R., "Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 289-295, 2004.
4. Griffiths, B. J., "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.