한국공작기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 pp.326~331

고속 엔드밀 가공에서 가공변질층의 특성

Characteristics of damaged layer in high speed end milling

김동은*, 이기용,(부산대 대학원), 강명창, 김정석(부산대 기계공학부)
Dong-Eun Kim, Ki-Yong Lee (Graduate School, Pusan Nation Univ.), Myeong-Chang Kang, Jeong-Suk Kim (School of Mechanical Engineering Pusan Nat. Univ.)

Abstract

In this study, residual stress was investigated experimentally to evaluate damaged layer in high-speed machining. In machining difficult-to-cut material, residual stress remaining in machined surface was mainly appeared as compressive stress. The scale of this damaged layer depends upon cutting speed, feed per tooth and radial cutting depth. Damaged layer was measured by optical microscope. The micro-structure of damaged layer was a mixed maternsite and austenite. Depth of damaged layer is increased with increasing of cutting temperature, cutting force and radial depth.

On the other hand, that is slightly decreased with decreasing of cutting force. The increase of tool wear causes a shift of the maximum residual stress in machined surface layer.

Key Words : High-speed Machining(고속가공), Phase Transformation(상 변태), Damaged Layer (가공변질층), Cutting Condition(가공조건) , Cutting Temperature(가공온도)

1. 서론

최근 공작기계 강성 및 성능의 향상, 고속절삭용 공구의 발전, 금형업계의 생산성과 정밀도 향상의 요구로 고속가공에 관한 연구가 진행되고 있다. 고속가공은 금형강 등 난삭재에의 고속가공 적용이 최근에 이루어지고 있지만, 고속가공 절삭현상의 매커니즘이 아직 분명히 규명되지 않은 상태이다. 그러나 고능률, 고정도의 가공을 실현한다는 측면에서 연구가 진행되고 있다[1].

고속가공시 절삭력과 절삭온도가 증가하게 되어 일반가공보다 공작물의 표면에 더 많은 영향을 끼친다[2]. 공작물의 표면 품질에 미치는 효과의 중요성에 대한 연구는 Liu, Barash에 의해서 연구되어졌다. 이 연구에서는 가공된 표면에 가공변질층이라는 미소구조변화를 발생시키고 있다는 것을 보여주고 있다[3].

가공변질층은 금속재료의 절삭가공시에 발생하는 가공표면의 변질층으로 정의될 수 있으며 결정입자의 미세화, 결정입제의 절삭방향으로의 유동, 내부의 잔류응력 등의 특징을 가지고 있다[4]. 또한 경도변화, 부식, 소성유동 등 피삭재의 강도에 영향을 미치는 변화가 수반되기 때문에 변질층을 얇게하여 가공면의 품질을 향상시키는 것이 매우 중요시 되고 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 고속가공에서의 가공변질층의 특성을 파악하기 위해서 공구마멸에 따른 변화와 가공조건에 따라서 절삭하여 X선 회절법으로 가공변질층의 잔류응력을 측정하였다. 또한 가공변질층을 가시적으로 관찰하였고, 절삭온도와 절삭력을 측정하여 고속가공시 가공변질층의 특성을 실험적으로 검토하여 가공변질층 깊이를 최소화 할 수 있는 최적 절삭조건을 선정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험은 고속 머시닝 센터(MAKINO

V-55)에서 수행하였고, 공구는 TiAlN 코팅된 초경엔드밀(4날,10 ϕ),공작물은 금형강(STD11)을 사용하였다. 금형강(STD11)을 경화처리하기 위해서 1030℃로 가열한 후 유냉시켜 퀜칭한 후 200℃로 가열한 다음 2시간 동안 유지한 후 Tempering 하였다. 실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 설치하였다. 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 공구동력계를 사용하였다. 절삭온도는 측정 온도 범위가 -200℃~1250℃인 열전대(K-type)로 측정하였다.

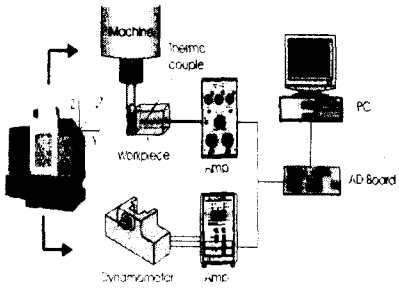


Fig. 1 Experimental setup for measuring cutting force and cutting temperature

가공변질층을 측정하기 위한 절차는 Fig. 2와 같이 구성하여 공구 현미경으로 관찰하였다.

에칭액으로는 고탄소강에 맞는 질산 20ml, 염산 10ml 그리고 메칠알콜 100ml의 왕수를 선정하였다.

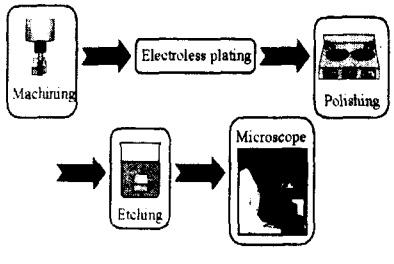


Fig. 2 Procedures for measuring damaged layer

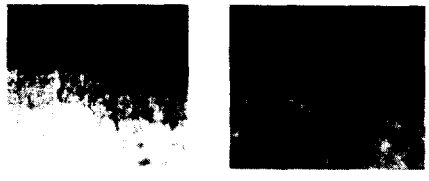
2.2 실험방법

고속가공시 가공조건에 따른 잔류응력, 절삭온도 그리고 공구마멸에 따른 가공변질층의 특성을 파악하기 위해, Table 1에 나타낸 다양한 가공조건에서 따라서 행하였다. 절삭조건에 따른 가공변질층의 특성 실험은 공구마멸에 의한 가공변질층의 변화를 고려하지 않기 위하여 각 조건에 대해서 마멸량이 거의 없는 공구를 사용하였다.

Table 1 Cutting conditions

	Spindle revolution [rpm]	Feed per tooth [mm/tooth]	Radial depth [mm]	Axial depth [mm]
Cutting conditions	6000~18000	0.025~0.05	0.1~0.4	10
Wear	6000~14000	0.025	0.1	10

폴리싱공정시 가공면 모서리부위의 탈락을 방지하기 위한 방법으로 가공면에 화학 약품을 사용하여 아연을 환원 석출하는 방법인 무전해도금법을 이용하여 도금(plating)하였다. Fig. 3은 도금 유무에 따른 가공변질층의 형상이다.



(a) Plating (b) No plating

Fig. 3 Form of damaged layer according to plating

고속가공시의 절삭력 파형은 Fig. 4와 같다. 밀링가공의 단속절삭에서는 4개의 날이 함께 절삭력에 각각 영향을 미치게 된다. 따라서 절삭력은 2주기에 대해 평균값으로 분석하였다.

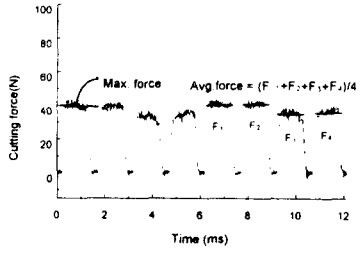


Fig. 4 Waveform of cutting forces

고속가공시 발생하는 절삭온도를 측정하기 위해서 K-type형 열전대를 이용하였다. 열전대의 공기중의 응답속도는 70msec이다. 열전대와 가공물이 완전히 절연되도록 열전대 전용 시멘트를 사용하였다. Fig. 5는 공구의 이송에 따른 절삭온도의 연속적인 변화의 파형을 나타내고 있다. 절삭온도를 측정하기 위해 공구가 열전대를 절단하고 열전대의 끝 부분의 접촉이 끊어지는 그 순간의 온도를 측정하는 원리로 피크의 최고점과 끝점의 전압값을 평균하여 나타내었다.

측정된 신호는 1V당 100℃로 캘리브레이션된 증폭기를 거쳐 기록하였다.

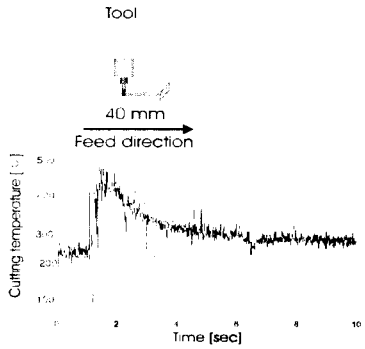


Fig. 5 Waveform of cutting temperature

엔드밀의 마멸 측정은 CCD카메라를 이용하여 공구의 착탈없이 측정하였다. 공구의 선단 부분의 날끝형상 변화로 인해 마멸 측정 및 비교가 어려우므로 공구중간 부분의 마멸을 측정하였고, 4개 날의 평균값을 선정하였다.

X선 응력측정법은 X선회절법에 의하여 격자면간의 변화량을 측정하고, 그것을 사용해서 시편표면에 존재하는 응력을 계산하는 측정방법이다.

X선에 의해서 응력을 측정한다는 것은 X선의 회절각 2θ 의 변화를 높은 정도로 측정하는 것이다. 회절각의 측정에는 계수관법과 사진법의 2가지 방법이 있으나, 본 논문에서는 계수관법을 사용하여 측정하였다. 계수관법은 각종의 계수관을 사용하여 회절각을 직접 측정하는 방법이다[6].

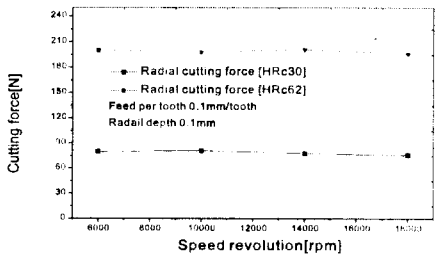
계수관의 회전각 2θ 를 높은 정도로 측정하기 위하여 고니오메타(goniometer)가 이용된다. X선에 의한 잔류응력 측정은 표준시료를 이용하여 회절 최대강도를 찾아서 그 값을 기준으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

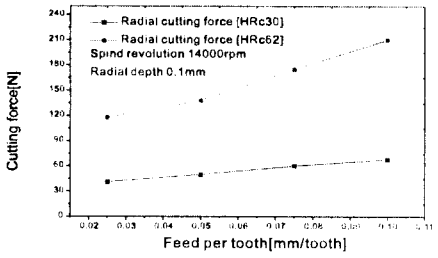
3.1 가공조건에 따른 절삭력 특성

회전수에 따른 절삭력은 Fig. 6(a)에 보여지는 것처럼 나타내고 있다.

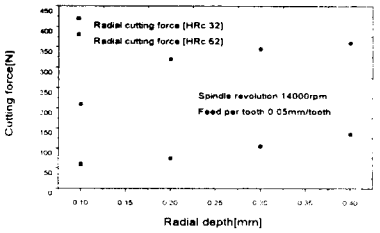
고속가공시 절삭속도가 증가하면 절삭력이 거의 일정한 경향을 보이고 있다. Fig. 6(b) 와 같이 날당 이송량의 증가에 따른 절삭력 변화는 증가하고 있다. 이는 날의 절삭량이 증가하기 때문이다. Fig. 6(c)은 반경방향 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력은 증가한다. 이것은 절삭에너지가 증가하기 때문이다.



(a) Spindle revolution



(b) Feed per tooth

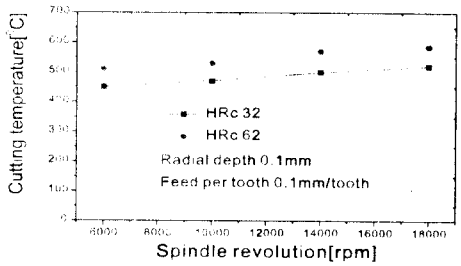


(c) Radial depth

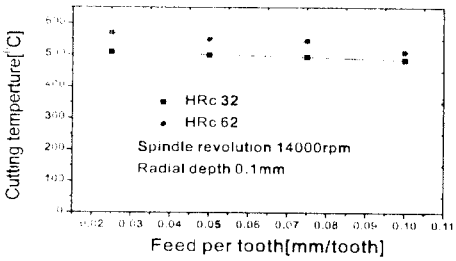
Fig. 6 Characteristics of cutting force according to cutting condition

3.2 가공조건에 따른 절삭온도의 특성

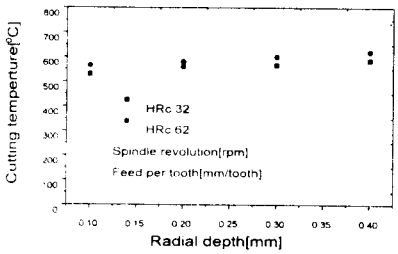
회전수가 증가함에 따라 절삭온도는 Fig. 7(a)에 보여지는 것처럼 서서히 증가하는 경향을 보인다. 이는 절삭속도가 증가하면 마찰에너지의 증가로 온도가 상승한다. 날당 이송에 따른 절삭온도는 Fig. 7(b)에 보여지는 것처럼 날당 이송이 증가함에 따라 감소한다. 이는 재질에 접촉되는 면이 적고, 또한 전도되는 열이 순간적으로 감소하기 때문이다. 반경방향 절삭깊이에 따른 절삭온도는 Fig. 7(c)에 보여지는 것처럼 반경방향의 절삭깊이가 증가함에 따라 전단면이 증가하기 때문에 마찰일과 전단일이 가공되는 가공물의 절삭온도를 증가시킨다.



(a) Spindle revolution



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth

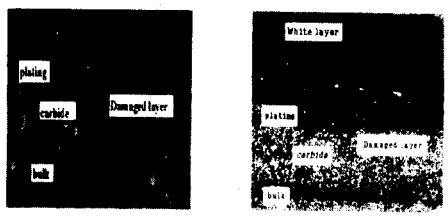
Fig. 7 Variation of cutting temperature according to cutting condition

3.3 경도에 따른 가공변질층의 형상

금형강은 고탄소-고크롬강(1.5C-13%Cr)으로 단단한 크롬의 탄화물에 의해 절삭시 영향을 받는다. 퀜칭온도는 1000~1050℃정도이고 템퍼링온도는 150~250℃정도이다. 가공시 측정된 절삭열은 400~700℃정도이다.

가공면으로부터 임의의 깊이까지 템퍼링이 일어나고 순식간에 공냉되므로 오스테나이트에서 펄라이트 조직이 형성되지 못하고 상온에서 바로 텐사이트 조직이 형성된다. 광구현미경에서 모재쪽보다 검은색의 층은 층상구조를 이루고 있다. 고속가공시 가공물의 가공변질층 형상은 Fig. 8과 같다[7].

고속절삭시 가공변질층의 변화는 가공표면에서부터 탄성변화를 일으켜 점차적으로 모재 방향으로 확대되어 나감을 볼 수 있다. 특히 경도가 높은 금형강에서는 이 부위에서 열응력의 영향으로 생성되는 백층(White layer)을 관측할 수 있다.



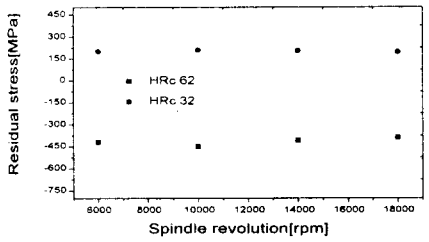
(a) Normal STD 11 (b) High-hardness STD 11

Fig. 8 Structure of damaged layer in machined STD 11

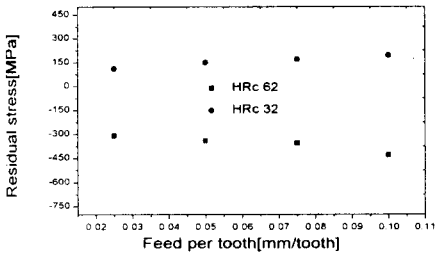
3.4 가공조건에 따른 잔류응력의 특성

Fig. 9(a)은 절삭속도의 변화에 따른 잔류응력 관계를 나타낸 것이다. 경도에 따라서 절삭시 잔류응력이 거의 일정하게 나타나고 있다.

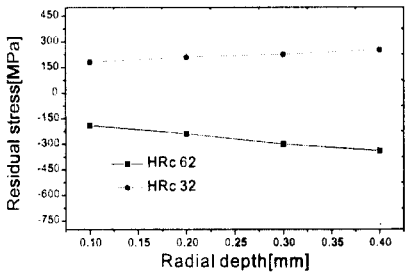
날당 이송에 따른 잔류응력은 Fig. 9(b)에 보여지는 것처럼 날당 이송에 따라 증가하고 있다. 반경방향 절삭깊이에 따른 잔류응력의 변화는 Fig. 9(c)에 보여지는 것처럼 증가하고 있다



(a) Spindle revolution



(b) Feed per tooth



(c) Radial depth

Fig. 9 Variation of residual stress according to cutting condition

가공변질층의 변화는 소성변화에 의해서 생성된다. 따라서 잔류응력 변화로 변질층을 분석 할 수 있기 때문에 잔류응력 변화가 가공변질층의 특성이라 할 수 있다.

잔류응력을 발생시키는 원인은 열응력에 의해서 가공표면에서 냉각되면서 생성시키는 것과 기계적인 응력에 의해서 발생하는 변형이다. 절삭가공시 공작물에 미치는 열에너지는 전체의 에너지의 약 10~15% 정도이기 때문에 열응력에 의해서 생기는 응력은 매우 작게 영향을 준다.

Fig. 9와 같이 경도가 낮은 금형강에서는 인장응력이 발생하고 고경도 금형강에서 대부분 압축응력이 발생하고 있다.

이것은 고경도 금형강이 절삭시 기계적인 변형에 의해서 생성되는 변질층이 얇고, 기계적인 버니싱(burnishing)이 우선적으로 발생하기 때문에 압축응력이 생성된다. 한편, 경도가 낮은 금형강 가공시 변형이 깊은 층까지 도달하기 때문에 표면층에서 강하게 압축하기 때문에 인장응력이 발생하게 된다.

3.5 마멸진전에 따른 절삭력의 변화

Fig. 10은 주축 회전수 6000rpm, 10,000rpm, 14,000rpm에서 절삭거리에 따른 공구마멸의 진전을 나타내고 있다.

주축 회전수 14,000rpm일 경우 6000rpm과 10,000rpm에 비해 마멸진전 속도가 약 2~3배정도 빠르며, 고속으로 갈수록 공구수명이 매우 짧아지는 것을 알 수 있다.

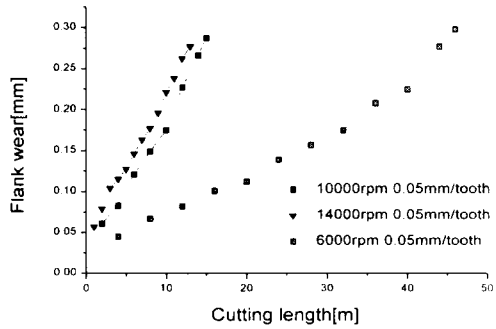


Fig. 10 Flank wear according to cutting length

Fig. 11은 주축 회전수 6000rpm, 10,000rpm, 14,000rpm에서 공구마멸의 진전과 마멸에 따른 절삭력 크기의 변화를 나타내었다.

공구마멸에 따른 절삭력은 가공초기인 마멸이 없을 때에 비해 공구마멸이 0.3mm일 때의 절삭력의 크기가 각각 5배, 6배, 8배 정도로 증가한다. 6,000rpm에서는 선형적으로 증가하는 경향을 보이지만, 10,000rpm과 14,000rpm의 경우 마멸량이 0.2mm일 때 절삭력의 기울기가 급하게 상승하고 있다는 것을 알 수 있다.

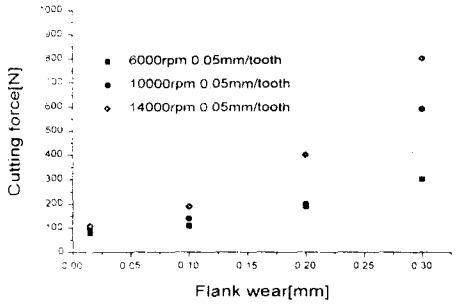


Fig. 11 Cutting force according to flank wear

3.6 공구마멸에 따른 잔류응력 변화

절삭가공시 가공면의 깊이 변화에 따른 잔류응력 변화는 얇은 표면층에는 인장응력이 발생한다. 가공 표면층의 깊이가 증가하면 인장응력이 최고값이 나타났다. 이후부터 응력이 감소하여 잔류응력은 무시할 수 있을 정도로 작아진다.

Fig. 12는 마멸의 증가에 따라 잔류응력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 프랭크 마멸이 증가함에 따라 공구마멸면과 공작물과의 접촉면이 증가함으로서 절삭력이 커지고 이에 따라 잔류응력도 커진다.

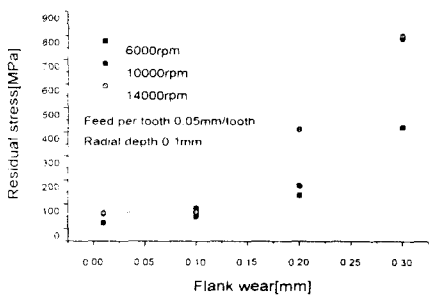


Fig. 12 Residual stress on the surface layer according to tool wear

4 결론

1. 절삭온도의 상승으로 인한 열응력은 주로 가공면의 상변태에 영향을 주어 고경도강에서 백색층을 형성시키고 있다.

2. 경도가 낮은 금형강에서는 가공면에는 인장응력이 발생하고 경화된 금형강에서는 기계적인 변형에 의해서 압축응력이 발생한다.

3. 절삭속도 및 공구마멸이 증가할수록 잔류응력은 증가하며, 이는 측정된 절삭력의 변화와 일치한다.

4. 가공변질층의 변화는 절삭온도와 절삭력의 변화에 영향을 받고 있지만 절삭력에 더 많은 영향을 받고 있다.

참고문헌

(1) N.Narutaki. Y. Yamance. K Hayashi. T.Kitagawa " High-Speed Machining of Inconel718 with Ceramic Tools", *Annals of the CIRP* Vol. 42. pp.103-106. 1993

(2) Rigby, p., "High Speed Milling in the Mold and Marking Industries", *Diamond and CBN Ultra Hard Materials Syposium* '93. Ontario. Canada. 1993.

(3) Liu, C.R. and Barash, M.M., "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process", Part 2; Cutting with a Tool with Flank Wear. *Journal of Engineering for Industry*, pp1203-1208, 1976

(4) 勝原晴夫, "加工變質層の精密加工" *機械の研究*, Vol. 9, No. 9, pp.1161-1167, 1972

(5) 中島耕一, 水谷嘉之 : "機械加工よる 表面層の變化*機械の研究*, Vol. 26, No.8, pp.1011-1017, 1974

(6) 日本材料學會編 "X線 應力測定法", *養賢堂* (1966)

(7) Matsumoto, Y., and Barash, M. M., "Residual stress in the machined surface of hardened steel High Speed Machining", Presented at the winte annual meeting of the *ASME*, New Orleans, Dec, pp.193-204, 1984