한국공작기계학회논문집 Vol.15 No.6 2006. 12.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

고속 엔드밀가공에서 가공환경 변화에 따른 가공면의 미시적 정밀도에 관한 연구

권동희*, 이종환+, 황인옥++, 강명창+++, 김정석++++

(논문접수일 2006. 7. 5, 심사완료일 2006. 9. 18)

A Study on the Microscopic Precision of Machined Surface according to Variation of Machining Environments in High Speed Endmilling

Dong-Hee Kwon*, Jong-Hwan Lee+, In-Ok Hwang++, Myung-Chang Kang+++, Jeong-Suk Kim++++

Abstract

The investigation of microscopic precision in high speed endmilling is necessary for machinability evaluation, and the environmentally conscious machining technology have more important position in recent machining process. The microscopic precision of workpiece is influenced by machining environments variation as cutting fluid type and lubricant method. In this study, the cutting forces according to variation of cooling and lubrication are investigated by specially designed tool dynamometer. And the surface roughness, micro hardness and residual stress are evaluated according to machining environment. The characteristics of damaged layer in environmentally conscious machining and conventional machining using cutting fluid are compared experimentally.

Key Words : Cutting Fluid(절삭유제), Oil Mist(오일미스트), Compressed Cold Air(압축냉각공기), Micro Hardness(미소경도), Residual Stress(잔류응력), Damaged Layer(가공변질층), Endmilling(엔드밀링)

1. 서 론

마이크로(Micro), 나노(Nano) 단위의 정밀도를 가진 부품의 생산요구로 인해 초정밀, 초미세가공기술의 급속한 발전을 가져오고 있다. 이를 위해 가공면을 측정, 평가하는 기술이 요구된다.

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 (dhkwon@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
+ 부산대학교 대학원 정밀기계공학과
++ 오스템임플란트(주)
+++ 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소
++++ 부산대학교 기계공학부

금속재료를 기계가공 했을 때 그 표면 혹은 표면으로부터 어느 깊이까지의 표층부에 나타나는 모재와 다른 성질을 가진 변질된 층을 가공변질층이라 한다. 변질 내용과 정도는 가공의 방법이나 조건에 따라 다르지만 가공변질층은 대부분의 가공에 공통적으로 일어나는 현상이다. 가공변질층은 오염, 흡착층(물리흡착, 화학흡착), 화합물층, 이물질의 혼입 등에 의한 외적인 원소의 작용에 의한 변질과 미세결정층, 전위밀도의 상승, 쌍정의 생성, 섬유조직, 연마변태, 가공에 의한 결정의 변형, 재결정에 의한 조직의 변질, 그리고 잔류응력에 의한 응력 중심의 변질로 나눌 수 있다.

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 온도 구배를 만들며, 여기에 잔류응력이 발생한다. 가공 표면부로부터 가공변질층과 잔류응력의 존재는 기계부품, 공구 및 금형 등에서 변형과 파손의 원인이 되며 피로수명과 내식성 등에 영향을 주고 있다[1~4]. 따라서 변질층에 대한 고찰은 가공부품의 성능, 수명 또는 가공공정에 영향을 미친다는 점에서 매우 중요하다. 지금까지의 연구는 선삭 및 연삭, 방전가공면에 발생하는 변질층의 연구가 많이 진행되어 왔다[5~7]. 그러나 엔드밀 가공에서는 상대적으로 낮은 절삭력과 절삭온도로 변질층의 발생정도가 적기 때문에 측정상 난점이 많아 해석적인 측면뿐만 아니라 실험적으로도 큰 진전을 보지 못하고 있다.

생산현장에서 가장 널리 사용되고 있는 절삭가공 분야는 환경친화성이 요구되는 대표적인 생산공정 중의 하나이다. 기존의 고속 엔드밀링에서의 가공변질층에 관한 연구는 건식가공의 조건에서 행해졌다[8]. 그러나 실제 절삭가공 현장에서는 공구와 피삭재가 접촉하는 절삭부인 가공면에 가공능률의 증대와 가공 정밀도 향상을 도모하기 위해 냉각과 윤활의 목적으로 절삭유제(Cutting fluid)를 사용하고 있다. 그리고 근래의 환경오염에 대한 관심이 커지면서 환경친화적인 고속가공에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[9~12]. 하지만 환경친화적 가공의 가공성 평가에 있어서 거시적 정밀도에 관한 연구는 많이 수행되었으나 미시적 정밀도에 관련된 연구는 많이 부족하다.

본 연구에서는 고속 엔드밀 가공시 건식(Dry condition), 절삭유제, 압축냉각공기(Compressed cold air), 오일미스트(Oil mist), 압축냉각공기와 오일미스트를 동시에 이용한 가공에서 절삭력, 표면거칠기, 미소경도, 표면 잔류응력 및 가공변질층 발생정도를 측정하였다. 이로 인해 환경친화적인 고속가공에서 가공할 때 가공변질층이 더 작게 발생하여 금형 및 기계부품의 품질에 더 유리함을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장비 및 장치 구성

본 실험에서는 최대 주축 회전수 20,000rpm인 고속 머시닝센터(MAKINO V55)에서 초경 플랫 엔드밀을 이용하여 냉간금형강 STD11 원소재인 로크웰 경도 H_RC15와 진공열처리를 하여 H_RC52의 경도를 가지는 소재를 대상으로 가공실험을 수행하였으며, 소재의 화학조성은 Table 1과 같다. 그리고 냉각·윤활방식 변화 조건을 위해서 건식가공과 절삭유제, 오일미스트 장치와 압축냉각공기 시스템을 적용하였다.

가공면 정밀도 평가를 위해 표면조도기를 이용하여 가공환경에 따른 표면거칠기를 비교·분석하였고, 경도법을 통한 변질층 깊이 평가를 위해 비커스 경도기를 사용하였다. 또한

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

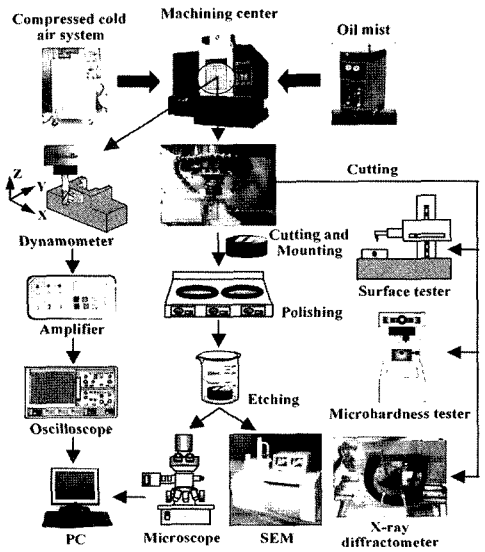


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 2 Specification of experimental instruments

Instrument	Specification
Machining center	MAKINO V55: Max 20,000rpm, 50m/min
Tool	∅10, 4-Flutes flat endmill, TiAlN coating
Dynamometer	3 Axis, Freq. range: 5~10㎑
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling: 400㎑
X-ray diffractometer	Rigaku, D/MAX-2200 (Peck search) Stresstech, X-Stress 3000 (Residual stress measurement)
Hardness tester	Vickers hardness
Surface tester	Taylor Hobson, Surtronic 3+
Compressed cold air	Lowest temperature -50℃
Oil mist	Spray max. 100cc/h

표면 잔류응력 측정을 위해 X선 회절법을 이용한 X선 회절장치를 사용하였고, 변질층을 가시적으로 관찰하기 위해 광학현미경 시스템을 사용하였다. 전체적인 실험장치도의 구성은 Fig. 1에 나타내었고, 실험에 사용된 장비와 사양은 Table 2와 같다.

2.2 실험방법 및 내용

엔드밀 가공시 냉각·윤활방식 변화에 따른 가공변질층의 특성을 파악하기 위해 냉간금형강 STD11의 저경도(H_RC15)와 고경도(H_RC52) 소재를 블록형상으로 제작하였다. 가공환경은 냉각·윤활방식 변화의 조건을 위해 건식가공, 절삭유제, 오일미스트, 압축냉각공기, 냉풍미스트를 각각 분사하여 가공하였으며, 가공시편을 통해 표면거칠기 및 미소경도, 잔류응력 등을 측정하였다.

일반적으로 오일미스트 및 압축냉각공기를 분사할 때는 스핀들의 X축 진행방향에 대해 공작물에 간섭을 받지 않기 위해서 공구의 뒷부분에서 분사하는 방식을 취한다. 그러나 Fig. 2에서 보는 바와 같이 냉각과 윤활의 작용점을 고려해 볼 때, 압축냉각공기는 칩의 소성변형층과 공구 및 소재의 마찰면 관점에서 A, B, C 방향으로 분사하는 것이 효과적이고, 오일미스트는 B, C 방향에서 가공접점으로 분사하는 것이 효과적으로 사료된다. 이는 압축냉각공기의 경우 스핀들을 정면에서 봤을 때 양쪽방향에서 분사하는 것이 효과적이고 오일미스트의 경우 이송방향으로 분사하는 것이 효과적이다. 따라서 오일미스트 및 압축냉각공기의 분사방향은 양

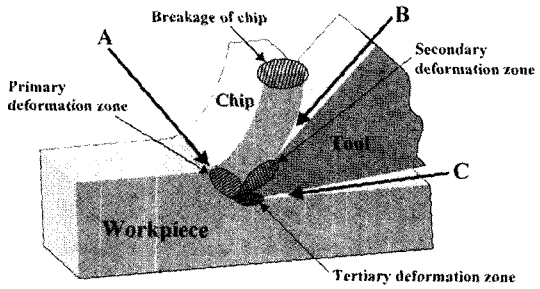


Fig. 2 Cutting mechanism of cooling and lubrication method

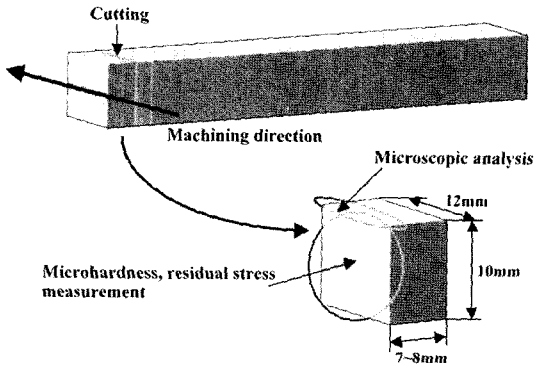


Fig. 3 Machining method of test piece

Table 3 Cutting condition

Spindle speed [rpm]	12,000
Feed rate [mm/min]	2,400
Radial depth of cut [mm]	0.2
Axial depth of cut [mm]	10
Temperature of compressed cold air	-20℃
Consumption of oil mist	10cc/h
Angle of nozzle	45°
Method of cooling	Dry, Cutting fluid, Compressed cold air, Oil mist, Compressed cold air + Oil mist

방향에서 분사하는 방식을 채택하였다. 또한 압축냉각공기의 설정온도는 -30℃로 하였고, 관로상의 냉열손실로 인하여 노즐 출구에서의 실제 온도는 -20℃ 정도이다.

가공변질층의 특성 실험은 각 조건에 따라 공구 안정화를 고려하여 Fig. 3과 같은 시편을 10패스(Pass)씩 가공한 후, 시편 측정에 알맞은 크기로 작게 절단하여 각각의 측정목적에 맞게 가공면을 측정하였다. 그리고 절삭력 신호는 엔드밀 가공의 단속절삭에 의한 비절삭 구간을 제외한 평균값을 분석하여 신뢰성을 높였고, 표면조도 및 미소경도에 있어서는 측정오차를 고려하여 각각의 시편에 10회씩 측정한 후 평균값을 나타내었다. 실험에 적용된 가공조건은 다양한 실험결과로부터 가공환경 변화를 효율적으로 파악하기 위해서 Table 3과 같이 정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 가공환경 변화에 따른 절삭력 측정

가공환경 변화에 따른 절삭력 특성은 본 연구실에서 제작된 고속가공용 공구동력계를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 CF(Cutting Fluid)는 절삭유제를 사용한 조건이고, CA(Compressed Cold Air)는 압축냉각공기를 사용한 조건이다. 또한 OM(Oil Mist)은 오일미스트를 사용한 조건을 나타내고, CM(Compressed Cold Air and Oil Mist)은 압축냉각공기와 오일미스트를 동시에 분사한 조건을 나타내고 있다.

저경도 소재의 건식가공의 경우 반경방향 절삭력이 약 58N 정도로 측정되었다. 가공환경 변화에 따라서 절삭력의 차이가 약 2N 정도로 저경도 소재에서는 절삭력 차이가 거의 없었다. 고경도 소재에서 건식가공의 경우 반경방향 절삭력이 약 226N이고, 압축냉각공기와 오일미스트를 동시에 분사하였을 때 가장 작은 절삭력이 발생하였다.

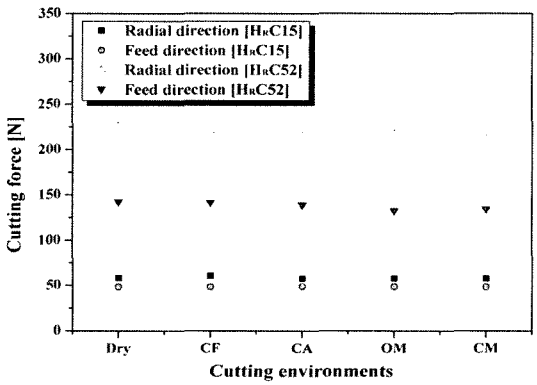


Fig. 4 Cutting force according to cutting environments

고경도 소재는 저경도 소재에 비해 약 4배 정도의 큰 절삭력을 받아 고경도 소재가 기계적 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 저경도 소재의 경우는 작은 크기의 절삭력에 의해서 기계적인 영향보다 절삭온도에 대한 영향이 더 크게 된다. 또한 가공환경 변화에 따라 절삭력의 변화가 크게 차이가 나지 않는 것으로 보아 절삭속도, 반경절입 등 가공조건의 영향에 비해 냉각·윤활방식의 변화는 절삭력에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다. 그러나 절삭력의 차이가 거의 나지 않는다고 해서 엔드밀링의 다른 복합적인 메커니즘이 가공표면부의 미시적 정밀도에 전혀 영향을 미치지 않는다고는 할 수 없다. 따라서 절삭력과 함께 다른 절삭요소들을 고려하여 가공면의 미시적인 정밀도를 평가해야 될 것으로 사료된다.

3.2 가공환경 변화에 따른 표면거칠기 측정

냉각·윤활방식 변화에 따른 가공면의 표면거칠기 측정실험을 수행하였다. 시편을 10패스씩 가공했지만 시편의 폭이 12mm, 총 가공길이가 12cm로써 저경도, 고경도 소재 모두 공구마멸은 거의 발생하지 않았다. 단 고경도 소재의 건식가공 경우 약 0.01mm의 공구마멸이 측정되었다.

Fig. 5는 저경도 금형강의 가공면 표면거칠기를 중심선 평균거칠기(Ra)로 비교하였다. 절삭유제, 오일미스트, 그리고 냉풍미스트를 사용했을 때의 표면거칠기가 안정적인데 이것은 윤활성에 의해 공구와 소재 사이의 마찰계수 감소로 인한 효과로 볼 수 있다. 오일미스트와 냉풍미스트의 중심선 평균거칠기는 약 0.24㎛, 0.25㎛로 양호한 값을 가지지만 절삭유제의 경우 0.28㎛로 약간 더 거칠게 나왔다. 그러나 건식

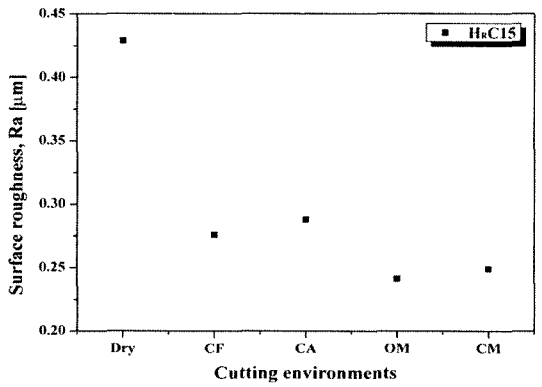


Fig. 5 The mean surface roughness according to cutting environments [HRC15]

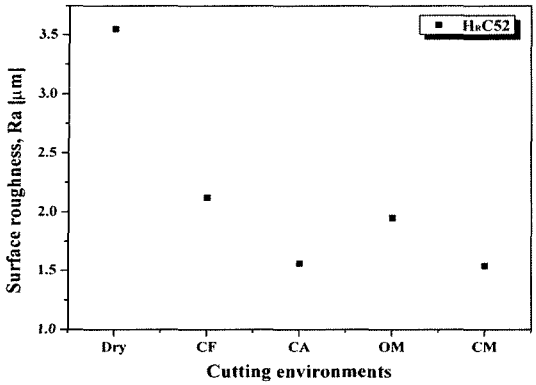


Fig. 6 The mean surface roughness according to cutting environments [H_RC52]

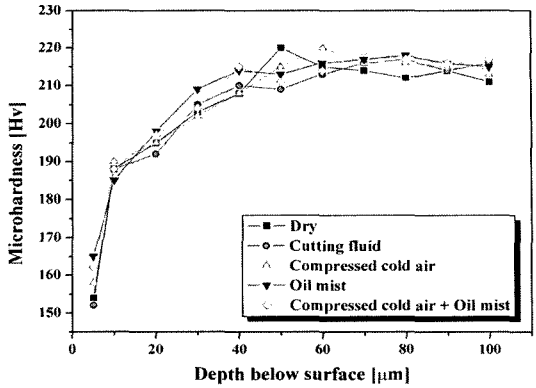


Fig. 7 Microhardness result according to cutting environments [H_RC15]

가공을 제외한 냉각·윤활효과를 적용하였을 경우 전반적으로 안정적인 표면거칠기 값을 가짐을 알 수 있다.

고경도 금형강의 표면거칠기 값은 Fig. 6에 나타내었다. 저경도 금형강에 비해 경도가 올라갔지만 가공조건이 같음으로 인해 전반적으로 표면거칠기가 나빠짐을 볼 수 있다. 건식가공에서는 표면거칠기가 매우 크게 나타남을 볼 수 있고, 압축냉각공기와 냉풍미스트를 사용했을 때 표면거칠기가 비교적 안정적으로 나타났고, 평균거칠기 값은 각각 약 1.56㎛, 1.54㎛로 측정되었다. 절삭유제와 오일미스트를 사용했을 때의 평균거칠기는 약 2.12㎛, 1.95㎛로 측정되었다.

고경도 소재의 경우, 마찰력을 감소시키는 윤활의 효과도 유리하지만 공구와 소재사이의 높은 절삭온도로 인해 압축냉각공기의 효과가 조금 더 유리함을 볼 수 있다. 그리고 절삭유제 분사시 환경친화적 가공방식보다 표면거칠기가 약간 좋지 않게 측정되었는데, 이것은 스핀들의 고속회전에 고속절삭에 의한 수막현상으로 인해 절삭유제가 고속으로 회전하는 공구에 침투하지 못하는 것이 그 원인으로 사료된다.

3.3 가공환경 변화에 따른 미소경도 측정

가공변질층의 측정방법 중 하나인 경도법을 이용하여 표면으로부터 가공변질층의 깊이를 측정하였다. 경도법은 표면 하층부의 미소경도 변화를 측정하고 일정값이 될 때까지 측정하여 그 깊이를 변질층의 깊이로 하는 방법으로써, 이 경도법을 통해 가공변질층의 깊이를 간접적으로 측정하였다.

Fig. 7은 저경도 소재의 가공표면으로부터 표면하층부로의 미소경도 변화를 보여주고 있다. 가공영향이 없는 소재의 원경도는 비커스 경도(Hv)로 약 200~220Hv로 측정되었다.

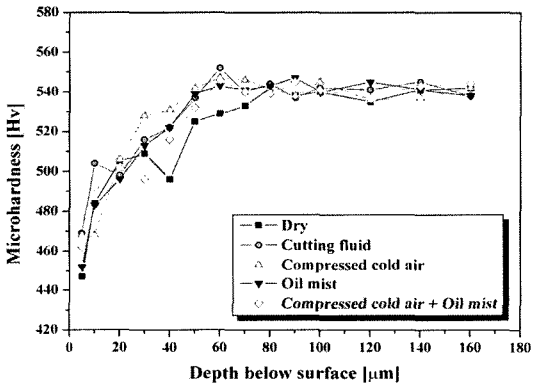


Fig. 8 Microhardness result according to cutting environments [H_RC52]

각각의 가공환경에 따라 미소경도의 변화 경향은 비슷하게 측정되었으나 냉각·윤활효과가 없는 건식가공의 경우 경도가 안정화되는 깊이가 약 50~60㎛로 측정되었다. 절삭유제와 압축냉각공기의 경우는 약 40~50㎛에서 경도가 안정화되었고, 오일미스트와 냉풍미스트의 경우는 약 30~40㎛에서 경도가 안정화되었다. 전반적으로 저경도 소재에서는 건식가공을 제외한 냉각·윤활방식 변화에 따라서는 경도의 안정화 깊이가 조금의 차이는 있으나 유사하게 나타남을 알 수 있다.

고경도 소재의 미소경도 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 소재의 원경도는 약 530~550Hv 정도이다. 건식가공의 경우 경도가 안정화되는 깊이는 약 70~90㎛ 정도이고, 절삭유제의 경우는 약 60~70㎛ 정도에서 경도의 안정화가 측정되었

다. 압축냉각공기와 오일미스트, 냉풍미스트의 경우에는 약 50~60㎛ 정도에서 경도가 안정화됨을 알 수 있다.

저경도와 고경도 소재 모두 가공표면에서 경도가 확연히 떨어져서 표면하층부로 갈수록 서서히 경도가 증가하는 현상을 보인다. 이를 통해 가공변질층이 가공물의 품질에 악영향을 미침을 알 수 있다.

3.4 가공환경 변화에 따른 표면 잔류응력 측정

가공면의 미시적 정밀도 평가로서, 냉각·윤활방식 변화에 따른 가공면의 표면 잔류응력을 측정하였다. 가공변질층의 변화는 잔류응력의 변화특성으로부터 변질층을 분석할 수 있기 때문에 잔류응력의 변화가 가공변질층의 특성이라고 할 수 있다. 시편의 표면에서 이송방향을 중심으로 0°, 45°, 90° 세 방향으로 측정하였고, 엔드밀 가공방향에 있어 이송방향과 축방향의 잔류응력을 분석하였다. 특히 이송방향이 가장 큰 영향을 받으므로 이송방향 잔류응력이 주 잔류응력이라 할 수 있다.

잔류응력은 압축잔류응력과 인장잔류응력의 형태로 나타나는데 압축잔류응력의 주 발생 원인은 기계적인 응력이라 할 수 있고, 인장잔류응력의 주 발생 원인은 열응력이라 할 수 있다. 엔드밀 가공시 발생하는 절삭력과 절삭온도의 영향에 따라 가공부에 잔류응력이 발생하게 된다.

먼저 가공을 하지 않은 소재자체의 잔류응력을 측정해 보았다. 저경도 소재는 각각의 방향에 따라 약 124.2, 118.8 MPa의 압축잔류응력이 분포하고 있었으며 오차율은 ±40.3, 27.2MPa 정도로 나타났다. 고경도 소재의 경우는 약 52.5, 59.0MPa 정도의 압축잔류응력을 나타내고 있었으며 오차율은 각각 방향에 따라 ±12.8, 13.7MPa 정도로 측정되었다. 소재자체의 잔류응력은 모두 압축잔류응력이 작용하고 있는 상태이다.

Fig. 9는 저경도 소재의 가공표면 잔류응력을 나타내었다. 각각의 가공환경에 따라 이송방향과 축방향의 잔류응력이 모두 인장잔류응력으로 나타났다. 오차율은 이송방향 잔류응력이 약 ±28~32MPa이고, 축방향 잔류응력이 약 ±7~12MPa이다. 건식가공을 수행하였을 때 잔류응력의 크기가 가장 크고, 압축냉각공기를 사용하였을 때 잔류응력의 크기가 가장 작게 나타났다. 저경도 소재의 가공시 인장잔류응력이 발생하는 것은 가공시 열변형이 깊은층까지 도달하기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 그러나 냉각·윤활력을 증가시킨 가공에서는 상대적으로 가공접점부의 마찰력과 절삭온도의 감소효과로 인해 잔류응력의 크기가 낮게 나타나고 있으며, 열응력에 영향을 받는 인장잔류응력은 압축냉각공기

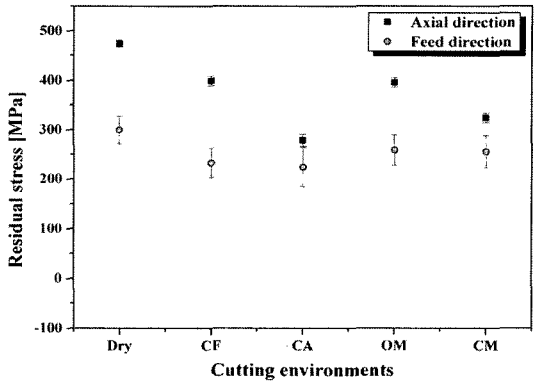


Fig. 9 Residual stress result according to cutting environments [H_RC15]

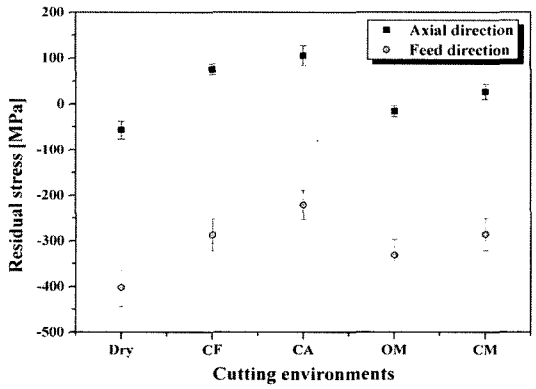


Fig. 10 Residual stress result according to cutting environments [H_RC52]

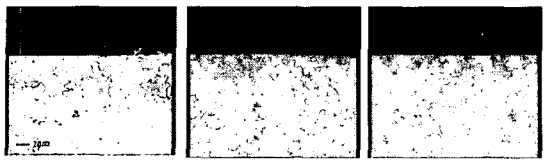
사용으로 인해 좋은 효과가 나타난 것으로 보인다.

고경도 소재의 가공표면에 나타나는 잔류응력은 Fig. 10에 나타내었다. 잔류응력의 오차율은 이송방향 및 축방향 잔류응력이 약 ±30~42MPa, ±11~21MPa이다. 이송방향과 축방향의 잔류응력은 압축잔류응력이 측정되었다. 건식가공일 때 압축잔류응력이 가장 크게 발생하였으며 압축냉각공기를 사용하였을 때 가장 작은 압축잔류응력이 발생하였다.

고경도 소재의 가공에서 압축잔류응력이 발생한 것은 가공시 열적영향보다는 높은 절삭력에 의한 기계적인 응력에 의해 발생하는 변형이 주를 이루는 것으로 나타났다.

3.5 가공변질층의 측정실험 및 결과

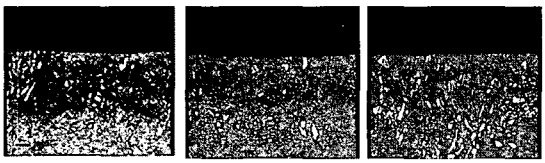
가공변질층은 부식법을 통하여 가시적으로 관찰해 하였다. 각각의 가공조건에 따라 광학현미경을 이용해 측정한 가



(a) Dry condition (b) Cutting fluid (c) Compressed cold air

(d) Oil mist (e) Compressed cold air + Oil mist

Fig. 11 Variation of damaged layer according to cutting environments [H_RC15]



(a) Dry condition (b) Cutting fluid (c) Compressed cold air

(d) Oil mist (e) Compressed cold air + Oil mist

Fig. 12 Variation of damaged layer according to cutting environments [H_RC52]

공변질층의 형상은 Fig. 11, 12에 나타내었다. 가시적으로 관찰된 가공변질층의 깊이는 앞서 측정한 경도법 및 잔류응력에 대한 값과 비슷한 경향으로 나타남을 알 수 있다. 건식가공을 수행하였을 때 가공변질층의 깊이가 가장 깊은 것을 알 수 있으며, 측정 구간마다 약간의 차이가 있지만 건식가공의 경우는 약 50㎛이고, 압축냉각공기나 오일미스트를 사용한 가공에서는 약 30㎛의 가공변질층이 발생하였다. 고경도 소재의 경우 건식가공에서 약 80㎛의 가공변질층이 발생하였으며, 환경친화가공의 경우 약 50㎛의 가공변질층이 발생하였다. 절삭유제를 사용한 경우 환경친화가공보다 약

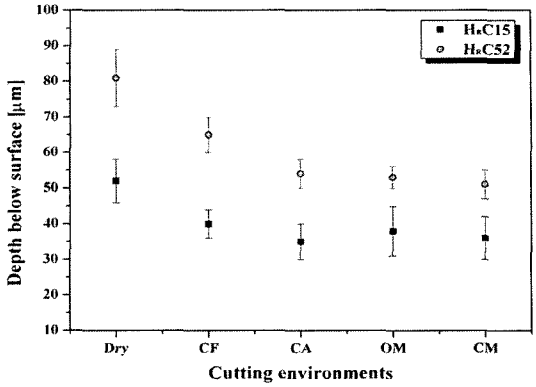


Fig. 13 Depth of damaged layer according to cutting environments

5~15㎛ 정도 깊게 나타나는데, 이 환경친화가공은 가공접점에 고압, 집중적 분사로 인해 냉각·윤활효과를 극대화시키고, 칩의 배출을 원활하게 하는 반면, 절삭유제는 환경친화적인 가공방법보다 그 효율이 떨어지는 것으로 사료된다.

그리고 반경절입이 적고 이송을 빠르게 하는 고속가공의 특성상 가공변질층의 깊이는 깊지 않지만, 가공조건을 중삭정도의 과도한 조건을 줌으로 해서 전반적으로 가공변질층의 깊이가 조금 크게 나타난 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 가공변질층의 깊이를 Fig. 13에 나타내었다. 냉각·윤활효과를 준 가공에서 가공변질층이 작게 발생함을 볼 수 있으며, 특히 환경친화적인 가공법이 가공면의 미시적 정밀도 향상에 유리함을 볼 수 있다. 고압으로 분사되는 압축냉각공기와 오일미스트는 절삭온도의 많은 양이 칩으로 배출되는 엔드밀 가공 특성에서 칩의 배출을 원활하게 하여 가공면의 미시적 정밀도를 향상시키는 것으로 사료된다. 또한 압축냉각공기의 사용은 열의 유동 감소에 효과적이고, 오일미스트의 사용은 가공접점의 마찰력 감소로 인한 소성유동변형 감소에 효과적이어서 전반적인 가공변질층의 저감효과를 가져오는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉간금형강(STD11)의 고속 엔드밀가공에서 가공환경 변화에 따른 가공면의 미시적 정밀도를 실험을 통해 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저경도(H_RC15) 소재의 가공면에서는 이송방향에 인장

잔류응력(224MPa 이상)이 발생하여 열적영향이 큼을 알 수 있고, 고경도(H_RC52) 소재의 가공면에서는 이송방향에 압축잔류응력(221MPa 이상)이 발생하여 기계적인 변형에 의한 영향이 큼을 알 수 있다.

(2) 압축냉각공기와 오일미스트 분사시 미소경도 측정 결과 저경도 소재에서 약 30~40㎛, 고경도 소재에서는 약 50~60㎛의 가공변질층이 측정되었고, 현미경 측정에서는 저경도 소재가 약 30㎛, 고경도 소재가 약 50㎛의 가공변질층이 측정되어 가공변질층 깊이의 간접적 측정방법에서 비슷한 경향의 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 가공면의 미시적 정밀도는 냉각·윤활에 의한 가공법이 건식가공보다 양호하게 나타났고, 압축냉각공기와 오일미스트를 사용했을 때 절삭유제보다 미시적 정밀도가 향상되어 전반적으로 환경친화적 가공법을 적용하였을 때 가공변질층이 작게 나타남을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

(1) Matsumoto, Y. and Barash M. M., 1984, "Residual Stress in the Machined Surface of Hardened Steel High Speed Machining," *Presented at the Winter Annual Meeting of the ASME*, pp. 193~204.

(2) Chou, Y. K. and Evans, C. J., 1998, "Process Effects on White Layer Formation in Hard Turning," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 26, pp. 117~122.

(3) Ulvi, S. and Hasan, H., 2006, "Evaluation of Machinability of Austempered Ductile Irons in Terms of Cutting Forces and Surface Quality," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp. 260~268.

(4) Chu, T. H. and Wallbank, J., 1998, "Determination of the Temperature of a Machined Surface," *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, Vol. 120, pp. 259~263.

(5) Chou, Y. K. and Evans, C. J., 1999, "White Layers and Thermal Modeling of Hard Turned Surfaces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 1863~1881.

(6) Mohri, N., Saito, N. and Tsunekawa, Y., 1993, "Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, pp. 219~222.

(7) Lee, S. W., Choi, H. Z. and Jeong, H. D., 2000, "A Comparison of the Cooling Effect for the Compressed Cold Air and Coolant on the Cylindrical with WA Wheel," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, pp. 155~161.

(8) Klocke, F. and Eisenblatter, G., 1997, "Dry Cutting," *Keynotepaper, Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519~526.

(9) Kim, S. W. and Lee, D. W., 2001, "Evaluation of Machinability by Cutting Environments in High-Speed Milling of Difficult-to-Cut Materials," *J. of MPT*, Vol. 111, pp. 256~260.

(10) Rahman, M. and Kumar, A. S., 2001, "Experimental Evaluation on the Effect of Minimal Quantities of Lubricant in Milling," *J. of MTM*, Vol. 42, pp. 539~547.

(11) Kim, S. M., Kim, J. H. and Kim, J. H., 2006, "Optimum Machining Condition of Die Steel in the Oil-mist Condition," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 59~65.

(12) Song, C. S. and Kim, J. H., 2005, "Cutting Characteristics of Dry Turning Using Compressed Air," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 8~14.