

MQL 선삭가공에서 절삭조건과 원통도의 상관관계 분석

신성우*, 황영국**, 이춘만#

Correlation analysis between cutting conditions and cylindricity in MQL turning

Sung-Woo Shin*, Young-Kug Hwang**, Choon-Man Lee#

(Received 29 June 2009; received in revised form 21 August 2009; accepted 21 August 2009)

ABSTRACT

At present, industries and researchers are looking for ways to reduce the use of lubricants because of ecological and economical reasons. Therefore, metal cutting is to move toward dry cutting or semi-dry cutting. One of the technologies is known as MQL machining. This paper presents an investigation into MQL machining with the objective of evaluating cylindricity and cooling effect for the turning process of SM45C. To reach this goal, cylindrical-outer-diameter turning experiments are carried out according to cutting conditions with fluid, MQL and dry machining methods. A cutting force, tool-shank temperature and cylindricity of workpiece are measured and analyzed. The correlation between cutting conditions and cylindricity are evaluated according to cooling lubricant environments.

Key Words : MQL machining(MQL 가공), Cylindricity(원통도), Cutting Force(절삭력), Cutting conditions(절삭 조건), Tool-shank temperature(공구생크 온도)

1. 서 론

환경문제가 전 세계적으로 중요시됨에 따라 제품의 개발·생산·사용·폐기 등 모든 단계에서 지구 친화형 제조를 추진하고 있다. 특히 생산단계에서 폐기물 절감, 에너지 절약화가 강하게 요구되고 있어 환경 친화형 생산 기술이 중요시 되고 있다.

초기의 환경 친화형 생산기술은 경제성과 인체 유독성 등의 측면을 소홀히 취급하였으나, 현재는 이들을 동시에 고려한 광범위한 의미에서 환경 친화형 생산기술을 취급하고 있다. 생산가공시 발생하는 환경오염물질에는 폐공구, 절삭유, 칩 등이 있으나 이들 중 환경에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 특히 절삭유 문제가 주목받고 있다. 이러한 관점에서 현재 연구 되고 있는 환경 친화형 생산가공기술을 절삭액의 사용량에서 분류하면 크게 드라이 가공(dry cutting)과 세미드라이가공(semi-dry cutting)으로 분류된다^{1,2)}.

드라이 가공은 절삭유를 사용하지 않는 완전 건식 가공으로 최근 많은 연구가 이루어지고 있고, 특정

* STX중공업 기술연구소

** 창원대학교 대학원 기계설계공학과

교신저자 : 창원대학교 기계설계공학과

E-mail : cmlee@changwon.ac.kr

분야에서 성공적인 결과가 보고되고 있다. 하지만 고능률 생산성과 표면품질 측면에서는 때때로 효과적이지 못하고, 엄격한 가공조건이 필요한 것으로 알려져 있다. 세미드라이 가공은 압축냉각공기에 의한 가공과 환경 친화적인 식물성오일을 미스트(mist)로 이용하는 극미량절삭유(MQL: minimum quantity lubrication) 가공방식 등이 있으며, 특히 MQL 가공은 그 환경적인 특성 때문에 세미드라이 가공기술 중 크게 각광받고 있으며 이미 많은 분야에서 실용적인 기술로 큰 역할을 하고 있다.

MQL 가공기술 관련 연구동향을 살펴보면 이춘만 등^[3,4]은 SM45C와 AI 6061에 대해 MQL과 절삭유를 이용한 선삭가공을 수행하여 가공조건이 표면거칠기 및 절삭력에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였으며, 황준 등^[5]은 선삭가공에서 절삭유 미립화와 환경영향 측면에서 환경 친화적 가공기술에 관한 연구를 수행하였다. 이종항 등^[6]은 냉풍과 MQL을 이용한 선삭가공을 수행하여 SM45C에 대한 가공성을 비교하는 연구를 수행하였다. Dhar 등^[7]은 AISI 1040의 선삭가공을 수행하여 표면거칠기, 칩 두께와 절삭력 측면에서 MQL 가공이 습식가공에 비해 효과적임을 발표했으며, Rahman 등^[8]은 MQL과 절삭유를 이용한 밀링가공 실험을 통해 절삭력과 표면거칠기, 칩 형상 측면에서 MQL 가공의 환경적, 경제적 효용성에 대한 연구를 수행하였다.

일반적으로 기계 부품의 가공정도를 나타내며 오차범위를 평가 할 수 있는 요소들로서 가공물의 진직도, 진원도, 원통도와 같은 형상공차와 치수공차는 대단히 중요한 평가 항목이다. 정밀 절삭 가공을 위해서는 절삭 조건들이 이러한 치수 정밀도, 형상 정밀도 및 표면 거칠기 등 기하학적인 인자에 미치는 영향이 규명되어야 한다. 일반 습식 가공의 경우는 이 분야에 대한 많은 연구가^[9-11] 진행되어 왔다. 하지만 MQL 가공의 경우 앞서 살펴본 바와 같이 많은 연구자들이 가공환경에 따른 비교실험을 통해 MQL 가공의 경제적, 환경적 효용성과 가공성에 대한 연구를 주로 수행하였다. 가공시 각 절삭인자들이 가공물의 진원도 및 원통도 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 현장에서 많이 사용되고 있는 탄소강의 MQL 선삭가공시 절삭조건에 따른

가공물의 원통도 변화를 분석하였다. 이를 통해 MQL 선삭가공시 원통도를 향상시킬 수 있는 절삭조건을 선정하기 위한 기초자료를 제시함으로써 MQL 가공환경을 처음 접하거나 경험이 많지 않은 현장 작업자들이 절삭조건을 효과적으로 선정할 수 있도록 도움을 주고자 한다. 또한 건식 및 습식 가공환경과의 비교실험을 통해 MQL 가공의 냉각효과를 파악하고자한다. 이를 위해 기계구조용 탄소강 SM45C의 원통외경 선삭을 실시하여 여러 절삭조건과 가공환경의 변화에 따른 절삭력과 공구생크부(tool-shank) 온도 및 원통도를 측정하고 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

MQL 선삭가공시 가공조건이 원통도에 미치는 영향을 분석하고, 가공환경변화에 따른 냉각효과를 파악하기위해 Table 1과 같은 실험장치를 사용하였다.

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Turning machine	HWACHEON	Hi-ECO 10
Dynamometer	Kistler	9257B
Charge amplifier	Kistler	5019
Measuring instrument of cylindricity	Mahr	Formtester MMQ44 CNC

실험을 위해 선반, MQL 공급장치, 공기 정화 장치, 컴프레서(compressor)로 가공시스템을 구성하였다. MQL 공급 장치는 독일 VOGEL사의 Vario UFV10-001을 사용하였다.^[12]

2.2 시편 및 절삭공구

실험에 사용된 실험체는 기계구조용 탄소강 SM45C이며 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 시편을 가공하여 사용하였다.

절삭공구는 초경모재위에 TiN-TiCN-Al₂O₃-TiN을 CVD 코팅한 노즈 반경이 0.4mm인 인서트 (CNMG 120404 FG TT3500, TaeguTec)를 사용하였다. 공구홀

더는 외경 선삭용으로 옆날각(approach angle)과 앞날각(end cutting edge angle)이 각각 5°이고 절입각(entering angle)은 95°인 홀더(PCLNR 2020 K12, TaeguTec)를 사용하였다.

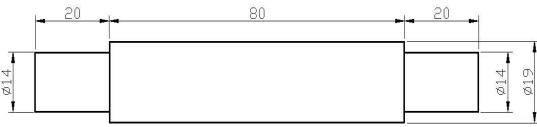


Fig. 1 Dimension of the specimen

2.3 실험방법

원통부품의 형상공차에 속하는 진원도가 나쁘게 되는 원인으로서는 가공시에 형성되는 구성인선, 공구의 마모, 절삭유의 유무, 사용하는 공작기계의 정밀도 및 강성, 가공시 발생하는 진동 등의 요인들이 있으며, 이로 인한 절삭저항의 증가, 열에 의한 공작물과 공구의 팽창 등도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 습식가공에서는 가공물의 축방향 길이, 절삭조건, 클램핑(clamping) 조건 등이 가공물의 진원도 등 형상정밀도에 미치는 영향이 실험적으로 밝혀져 있다^[10,11,13].

본 연구에서는 일차적으로 MQL 선삭가공시 가공물의 형상정밀도에 영향을 미치는 여러 원인들 중 생산현장에서 작업자가 변경하기 가장 용이한 절삭조건과 가공환경을 변화시켜 그에 따른 원통도를 측정하여 분석하였다. 실제 가공물의 진원도 등에 척(chuck)에 의한 클램핑 조건이 영향을 미친다는 연구결과가 보고되어 있다.^[10,11,13] 하지만 실제 작업현장에서 원형단면의 공작물 작업에는 클램핑 조건을 개별적으로 바꾸기 보단 연동척(universal chuck)을 사용하여 공작기계에서 정해진 유압력으로 클램핑하여 작업한다. 이에 본 연구에서는 클램핑 조건을 변화시키지 않고, 연동척을 이용하여 초기 선반에서 설정된 클램핑력을 동일하게 사용하였다.

실험 방법은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 시편과 공구를 장착하고 시편의 끝단으로부터 70mm까지 원통 외경 선삭을 실시하였다. 실험과정에서 절삭력과 공구생크부 온도를 실시간으로 측정하고 가공 후 가공물의 원통도를 측정하였다.

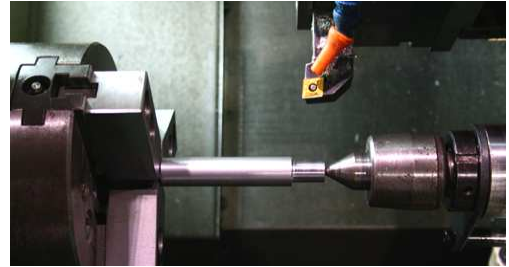


Fig. 2 Specimen set up

Table 2 Experiment plan

Experiment No.	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]
1	80	0.05	0.5
2	80	0.05	0.7
3	80	0.05	0.9
4	80	0.11	0.5
5	80	0.11	0.7
6	80	0.11	0.9
7	80	0.17	0.5
8	80	0.17	0.7
9	80	0.17	0.9
10	140	0.05	0.5
11	140	0.05	0.7
12	140	0.05	0.9
13	140	0.11	0.5
14	140	0.11	0.7
15	140	0.11	0.9
16	140	0.17	0.5
17	140	0.17	0.7
18	140	0.17	0.9
19	200	0.05	0.5
20	200	0.05	0.7
21	200	0.05	0.9
22	200	0.11	0.5
23	200	0.11	0.7
24	200	0.11	0.9
25	200	0.17	0.5
26	200	0.17	0.7
27	200	0.17	0.9

실험을 위해 가공 환경, 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이를 실험인자로 선정하여 각각 3수준(level)으로

두었다. 수준은 실험에 사용된 인서트의 추천 가공 조건을^[14] 참조하여 선정하였다. 실험은 습식, MQL, 건식으로 분리하여 실시하였고 각 가공방식마다 27 회씩 총 81회의 실험을 실시하였다. Table 2는 실험 배치를 보여주고 있다.

가공물은 심압대를 이용하여 양단을 고정하였으며, 공구 마모에 의한 영향을 배제하기 위해 매 실험마다 인서트를 교체하였다. 또한 각 시편마다 가공조건을 동일하게 하기위해 하나의 시편 가공 후, 공구생크부를 가공 전 초기 온도까지 상온에서 냉각시킨 후 다음 실험을 실시하였다.

MQL 가공시 미스트의 공급방향과 노즐의 직경 및 형상에 따라 가공 특성이 달라질 수 있다.^[15,16] 본 실험에서는 이에 대한 영향을 배제하기 위해 노즐과 인서트 끝단과의 거리는 20 mm, 각도는 20° 방향으로 동일하게 하여 공구의 경사면상에 미스트를 공급하였다. MQL 공급장치에 공급되는 공기압력은 7 bar이다.

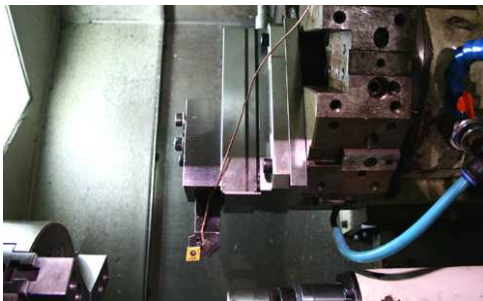


Fig. 3 Dynamometer and thermocouple set up

절삭력은 선반의 공구대 위에 공구를 장착한 공구 동력계(9257B type_Kistler)를 부착하여 측정하였다.

절삭온도를 측정하기위해 다양한 방법들이 소개되고 있다.^[18,19] 본 연구에서는 반복되는 인서트 교체로 인해 절삭지점의 직접적인 온도 측정이 용이하지 않고, 장치구성의 어려움으로 공구에 열전대를 직접 삽입하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 인선 부근의 온도구배가 크므로 측정점의 온도와 공구의 온도 사이에 오차가 존재할 수 있다.^[19] 하지만 냉각효과를 예측하기에는 가공점에서부터 공구생크부로 전도되는 온도로도 충분하다고 판단된다. 이에 공구생크

내부에 깊이 7mm의 홀을 가공하고, T타입의 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다. Fig. 3은 공구동력계와 열전대의 설치모습을 보여주고 있다.

원통도 측정은 MMQ44CNC 장비를 이용하여 C-axis 방식을^[17] 사용하였다. 가공시작점에서부터 각각 10, 37.5, 65mm의 3 지점의 진원도를 측정한다. 다음 그 결과를 바탕으로 원통도를 산출하였다. Fig. 4는 진원도 측정점과 측정사진을 보여주고 있다.

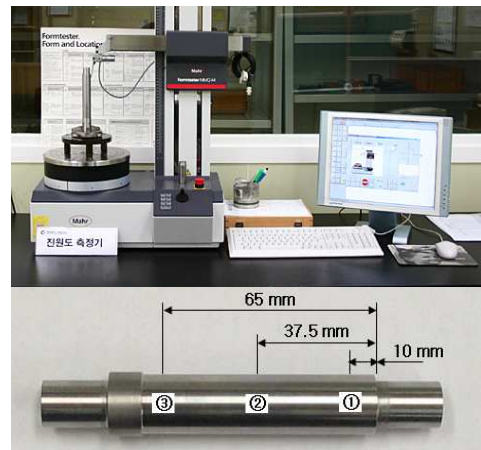


Fig. 4 Photograph of cylindricity measuring and measuring points

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 가공조건 및 가공환경에 대한 절삭력에 대한 Table 2의 실험순서대로 나타낸 그래프이다.

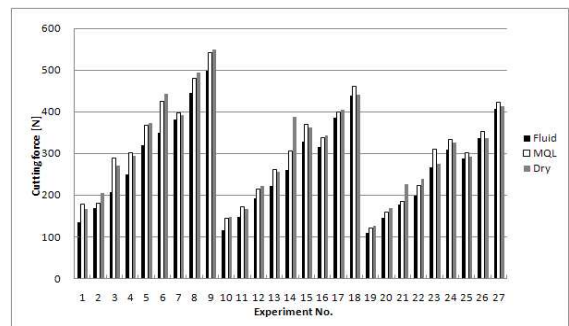


Fig. 5 Cutting force for each cutting conditions

실험결과 이송속도와 절삭깊이가 증가할수록 절삭력이 커지고, 절삭속도가 커질수록 절삭력이 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 절삭면적이 커질수록 절삭력이 증가하고 절삭속도가 커질수록 절삭력이 감소한다는 결과와 일치한다^[18]. 절삭조건의 변화에 따른 절삭력 변화양상은 가공환경의 변화에 관계없이 모두 동일하게 나타났다. 가공환경에 따른 절삭력은 평균적으로 습식<MQL<건식 가공 순서로 크게 나타났으나 그 차이가 절삭조건의 변화에 비해 크지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 각 가공조건에서 공구생크부의 최대온도를 나타낸 그래프이다.

실험결과 습식가공은 모든 가공조건에서 온도변화가 거의 없고 MQL과 건식가공은 낮은 이송속도로 (0.05mm/rev)로 인하여 가공시간이 긴 절삭조건 (1,2,3,10,11,12번)의 경우 다른 가공조건들에 비해 온도상승이 큰 것으로 나타났다.

공구생크부의 온도상승에는 절삭력의 크기는 크게 영향을 미치지 않고 가공시간과 가공환경이 더 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

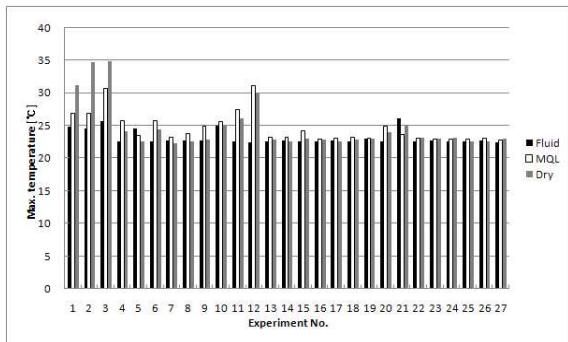


Fig. 6 Max. temperature for each cutting conditions

Fig. 7은 대표적으로 2번 실험조건에서 측정된 시간에 대한 온도변화를 나타낸 그래프이다. 습식가공의 경우 가공 시간이 지남에 따라 전도된 열에 의해 온도가 서서히 상승하여 일정하게 유지되고, MQL가공에서는 습식가공보다 온도 상승시점과 상승량이 빠르게 증가되었다. 건식가공의 경우는 MQL가공에 비해 온도 상승이 이루어지는 시점과 온도 상승폭이 훨씬 큰 것으로 나타났다.

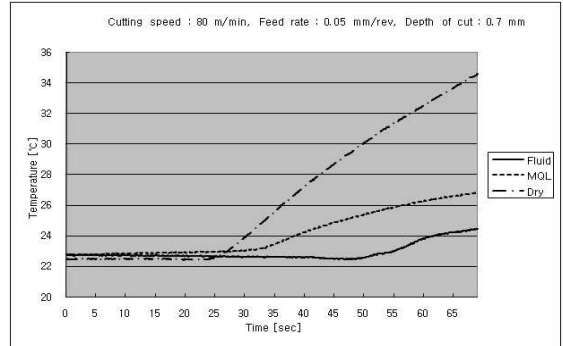


Fig. 7 Influence of cutting time on temperature

이상의 결과를 통해 MQL 가공의 경우 공구생크부의 온도상승에는 절삭력보다는 가공시간이 더 크게 영향을 미치고 최대 가공시간이 짧을수록 유리한 것으로 나타났다. 따라서 최대 가공시간이 짧은 경우 공구생크로 전도되는 열의 양이 작아 공구생크부의 열팽창이 가공물의 절삭깊이 변화에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 가공 중 발생하는 열을 냉각시킬 수 있는 냉각효과는 건식<MQL<습식 순서로 우수함을 확인하였다.

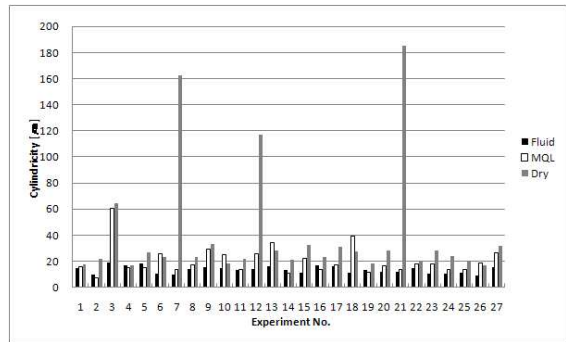
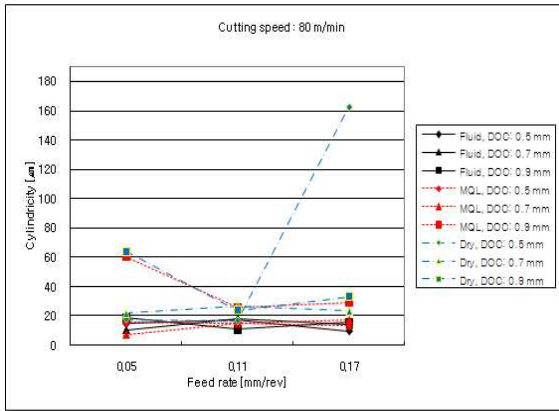


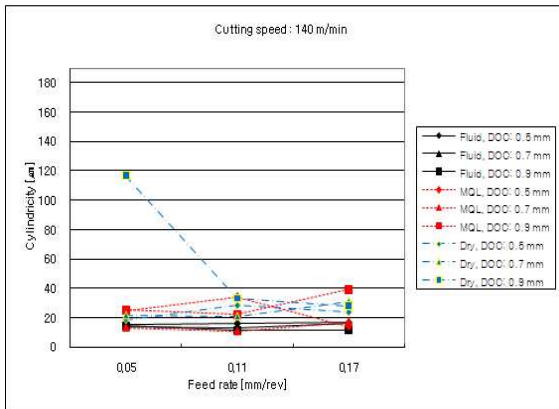
Fig. 8 Cylindricity for each cutting conditions

Fig. 8은 각 가공환경에서 실험순서에 따른 가공물의 원통도를 나타낸 그래프이며, Fig. 9는 이에 대한 세부적인 분석을 위해 각 절삭속도에서 이송속도와 절삭깊이에 대한 원통도 관계를 나타낸 그래프이다.

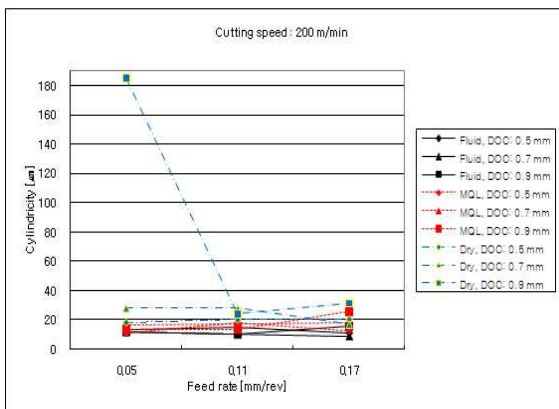
절삭조건이 원통도에 미치는 영향을 살펴보면 전체적으로 이송속도와 절삭깊이가 증가할수록 미소하



(a) Cutting speed : 80 m/min



(b) Cutting speed : 140 m/min



(c) Cutting speed : 200 m/min

Fig. 9 Influence of feed rate and DOC on cylindricity

게 원통도가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 절삭면적 증가에 의한 절삭력의 증가가 원통도에 영향을 미친 결과로 판단된다. 하지만 그 차이는 극히 미미한 것으로 나타났다.

습식가공에서는 가공조건에 따른 원통도가 고려된 모든 실험조건에서 10~20 μm 내에 존재하는 것으로 나타났다. 건식가공에서는 절삭조건에 따른 원통도가 습식과 MQL 가공보다 크며 최대 185 μm 가 발생하였다. 특히 3, 7, 12, 21번 실험조건인 경우 원통도가 크게 증가하였다. 이 중 7번을 제외한 나머지 실험조건들은 모두 이송속도 0.05mm/rev, 절삭깊이 0.9mm인 경우이다. 즉 건식가공에서는 이송속도가 느리고 절삭깊이가 큰 경우 가공물의 원통도에 좋지 못한 영향을 미치는 것으로 파악된다. MQL 가공에서는 전체적으로 습식가공과 건식가공 사이에 원통도가 존재하였으며 최고 60 μm 를 보이고 있다. 특히 절삭조건에 따라 습식가공과 유사한 결과를 보이기도 하고, 건식가공과 유사한 결과를 보이기도 하였다. 예로 1, 2, 4, 5, 7, 8등의 절삭조건에서는 습식가공의 결과와 유사하고 3, 6, 9등의 절삭조건에서는 건식가공의 결과와 유사하다. 이는 앞서 Fig. 6의 결과에서 살펴본 바와 같이 MQL 가공의 경우 가공조건에 따라 제한적인 냉각효과를 가지는 특성 때문으로 판단된다.

이상의결과를 통해 MQL 가공에서는 부족한 냉각효과 등으로 인해 습식가공에 준하는 원통도를 얻기 위해서는 절삭조건을 습식가공에 비해 제한할 필요가 있는 것으로 나타났다. 만약 본 실험의 조건 내에서 가공물을 원통도 20 μm 이하로 가공하기 위해서는 습식가공의 경우 가능한 절삭률을 크게 하기 위해 절삭속도 200 m/min, 이송속도 0.17 mm/rev, 절삭깊이 0.9 mm에서도 그 결과를 얻을 수 있지만 MQL 가공에서는 이송속도나 절삭깊이를 더 줄여야 가능하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기계구조용강인 SM45C의 선삭가공시 MQL, 습식, 건식과 같은 가공환경의 변화에 따른 냉각효과의 차이를 실험적으로 검증하고, 이러한 냉각효과와 절삭조건에 따른 가공물의 원통도

에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 수행한 가공조건의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가공환경에 따른 절삭력은 평균적으로 습식 <MQL<건식가공 순으로 나타났다. 절삭조건에 따른 차이는 절삭속도가 증가할수록 이송속도와 절삭깊이가 작을수록 절삭력이 감소하였으며 이러한 양상은 가공환경에 관계없이 모두 동일하게 나타났다. 절삭조건에 따른 공구생크부의 온도상승량은 습식가공이 모든 절삭조건에서 냉각효과가 가장 우수한 것으로 나타났으며 MQL 가공의 경우는 가공시간이 긴 경우 냉각효과가 충분치 못한 것으로 나타났다.
2. 가공물의 원통도는 전반적으로 습식<MQL<건식 순으로 크게 나타났다. 습식가공에서는 가공조건에 따른 원통도가 고려된 모든 실험조건에서 10~20 μ m내에 존재하는 것으로 나타났다. 하지만 MQL 가공의 경우 가공시간이 길거나 과도한 절삭저항이 발생하는 경우 원통도가 크게 증가하고, 건식가공과 유사한 결과를 보였다. 이는 MQL 가공의 제한적인 냉각효과로 판단된다. 따라서 MQL 가공에서는 원통도 측면에서 적절한 절삭조건의 선택이 대단히 중요하다. 가능한 절삭속도를 증가시켜 절삭저항과 발열에 의한 공구생크로의 열전도 시간을 줄이고, 절삭깊이를 줄이는 것이 유리한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 창원대학교 연구비와 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, K. H., Kim, J. Y., "Overview and Future Direction of Cleaner Production System," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 8, pp. 12-16, 2003.
2. Kang, J. H., "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine-tool," Journal of the KSPE, Vol. 9, No. 1, pp. 9-17, 2000.

3. Hwang, Y. K., Chung, W. J., Jung, J. Y. and Lee, C. M., "A Study on the Improvement of Cutting Force and Surface Roughness in MQL Turning," Transactions of the KSMTE, Vol. 15, No. 4, pp. 83-91, 2006.
4. Hwang, Y. K., Chung, W. J., and Lee, C. M., "Experimental Study on Cutting Force and Surface Roughness Prediction in MQL Turning of Al 6061," Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 6, pp. 159-167, 2008.
5. Hwang, J., Chung, E. S. and Hwang, D. C., "A Study on the Environmentally Conscious Machining," Journal of the KSPE, Vol. 20, No. 2, pp. 50-57, 2003.
6. Lee, J. H., Lee, S. J., Lee, S. W. and Choi, H. J., "Characteristics of Environment friendly Semi dry Turning," Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 221-226, 2002.
7. Dhar, N. R., Islam, M. W., Islam, S. and Mithu, M. A. H., "The influence of minimum quantity of lubrication on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, pp. 93-99, 2006.
8. Rahman, M., Senthil Kumar, A. and Salam, M. U., "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," IJMTM, Vol. 42, pp. 539-547, 2002.
9. Yu, J. H., "A Study on Optimum Cutting Conditions of Hollow Cylinder by out of Roundness Measurement Method," M.S. thesis of Chungnam National University, 2001.
10. Lee, S. H., "An Experimental Study on the Effect of Cylindricity for the Workpiece Length in Turning Machine," M.S. thesis of Chungbuk National University, 2001.
11. Mun, C. O., "A Study on the Relation between Shape of Turned Part and Machining Variables," M.S. thesis of Kookmin University, 1995.
12. www.vogelag.com
13. Altintas, Y., "Manufacturing Automation-Metal

- Cutting Mechanics, Machine Tool vibrations, and CNC Design," Cambridge, 2000.
14. TaeguTec, "Catalogue-Turning Application," TaeguTec, 2003.
 15. Attanasio, A., Gelfi, M., Giardini, C. and Remino, C., "Minimal quantity lubrication in turning : Effect on tool wear," International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear, Vol. 260, pp. 333-338, 2006.
 16. Research report of the Changwon National University Machine Tool Research Center, "Development of Cutting Technology Using Minimum Quantity Lubrication," Changwon National University Machine Tool Research Center, 2005.
 17. Mahr Korea, "Form-PC with MMQ 44CNC User's manual," Mahr Korea Ltd.
 18. Yum, Y. H., "Metal Cutting Principles of Machine Tools," Dongmyungsa, 2004.
 19. Yang, M. Y., "Metal cutting-principle and practice," Cheongmoongak, 2001.