

# MQL 선삭가공에서 절삭력과 표면거칠기 향상에 관한 연구

황영국\*, 정원지<sup>+</sup>, 정종윤<sup>++</sup>, 이춘만<sup>+++</sup>

(논문접수일 2006. 4. 4, 심사완료일 2006. 5. 29)

## A Study on the Improvement of Cutting Force and Surface Roughness in MQL Turning

Young-Kug Hwang\*, Won-Jee Chung<sup>+</sup>, Jong-Yun Jung<sup>++</sup>, Choon-Man Lee<sup>+++</sup>

### Abstract

At present, industry 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(Minimum Quantity Lubrication) machining. This research presents an investigation into MQL machining with the objective of deriving the optimum cutting conditions for the turning process of SM45C. To reach these goals several finish turning experiments were carried out, varying cutting speed, feed rate, oil quantity and so on, with MQL and flood coolant. The surface roughness and cutting force results of tests were measured and the effects of cutting conditions were analyzed by the method of Analysis of Variance(ANOVA). From the experimental results and ANOVA, this research proposed optimal cutting conditions to improve the machinability in MQL turning process.

**Key Words** : MQL machining(MQL 가공), Optimum cutting conditions(최적 절삭조건), Surface roughness(표면거칠기), Cutting force(절삭력), Full factorial design(완전요인실험)

## 1. 서론

최근 오존층 파괴, 지구온난화 등 환경문제가 전 세계적인

로 중요시됨에 따라 이에 대응하기 위해 제품의 개발·생산·사용·폐기 등 모든 단계에서 지구 친화형 제조를 추진하고 있다. 특히 생산단계에서 CO<sub>2</sub> 발생량과 폐기물 절감, 에너지

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

+ 창원대학교 기계설계공학과

++ 창원대학교 산업시스템공학과

+++ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

절약화가 강력하게 요구되고 있어 환경 친화형 생산 기술이 중요시 되고 있다.

초기의 환경 친화형 생산 기술은 경제성과 인체 유독성 등의 측면을 소홀히 취급하였으나, 현재는 이 둘을 동시에 고려한 광범위한 의미에서 환경 친화형 생산 기술을 취급하고 있다. 즉 폐기량 극소화, 인체 유독성 극소화, 절삭유 극소화 등의 환경성 측면과 에너지 절감화, 생산능률 향상 등의 경제성 측면을 동시에 고려할 필요가 있다.

기계공장에서 사용하는 에너지 중 기계가공기가 약 80%를 사용하고 그 중에서도 기계가공기가 사용하는 에너지의 약 50%는 유제에서 사용되고 있다. 또한 고 부하용 절삭유 중에는 극압 첨가제로서 염소계 화합물이 포함되어 있어 고온 절삭시 및 폐유를 연소 처리할 때 맹독성인 다이옥신을 발생시킬 우려가 있다<sup>(1,2)</sup>. 이같이 기계가공에서 에너지 절감, 폐기물 저감, 작업환경의 개선 등을 위해서는 절삭유의 사용을 줄이는 드라이, 세미드라이 가공이 중요한 테마이다<sup>(3-7)</sup>. 그러나 어떠한 기술이든 최종적으로는 제품의 가공을 지향한 이상 실용적인 가공법 이어야한다. 즉 특별한 가공에만 유효한 기술이어서는 안 되고, 환경대응 뿐 아니라 종래의 가공법과 비교해서 가공능률, 공구마모, 가공면 성상 등의 가공 성능에서도 동등 이상의 효과를 내야한다. 이를 위해서는 새로운 가공기술 및 장치의 개발 뿐 아니라 이의 적절한 활용 역시 중요하다. 즉 최상의 가공 성능을 얻기 위해서는 작업자가 적절한 가공조건 및 제어인자를 선정하여야 한다. 따라서 최신 가공기술을 적용한 장치를 유효하게 활용하기 위해서는 적절한 가공 조건 및 제어인자를 결정하기 위한 데이터의 확보가 중요하다.

이에 본 연구에서는 현장에서 많이 사용 되고 있는 탄소강의 MQL(Minimum Quantity Lubrication) 선삭가공시 절삭조건에 따른 절삭력과 표면거칠기를 분석하여 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다. 또한 일반 습식가공과 비교 실험을 수행함으로써 그 효과를 검증하고자 하였다. 이를 위해 완전요인실험(Full factorial design)을 적용하여 기계구조용 탄소강 SM45C를 초경공구로 외경 선삭 할 때 MQL·절삭유 토출량, 이송속도, 절삭속도 등의 절삭조건이 표면거칠기와 절삭력에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. MQL 가공기술

MQL 가공 기술은 1994년경 독일에서 개발된 기술로서 최소량윤활가공, 반 건식(Semi-dry) 가공, 니어드라이(Near

dry) 가공이라고도 한다. 이 기술은 기체를 반송 매체로 하여 안개상의 윤활액을 공구 날붙이에 바르는 방법의 총칭이다. 즉 안개상의 반송 가능한 크기를 가진 필요 최소량의 윤활액을 기액 혼합의 상태에서 가공부 등 필요 부위에 공급하는 방법이다<sup>(6)</sup>. 윤활액으로는 무해로 생분해하는 식물성유나 합성오일을 선택하는 경우가 많다. 또한 일반적으로 반송 매체에는 공기를 사용하는 일이 많은데 통상 공기 공급량은 100~400NI/min이고 공급 윤활유량은 수 ~ 50ml/hr이다.

MQL 가공기술을 분류하면 공급 경로에 의한 구분에서는 외부급유 방식과 내부급유 방식이 있고, 기액 혼합장소에 따른 구분에서는 주축 외부 혼합 방식과 주축 내부 혼합 방식으로 분류할 수 있다.

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 실험장치

MQL을 이용한 선삭가공에서 가공조건에 따른 가공특성을 분석하고, 최적절삭조건을 찾기 위해 Table 1과 같은 실험 장치를 사용하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 가공시스템을 나타내며 선반, MQL 공급 장치, Air cleaning system, Compressor로 구성하였

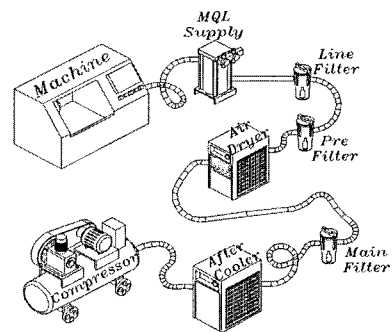


Fig. 1 Experimental set up

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Turning machine	HWACHEON	Hi-ECO 10
Dynamometer	Kistler	9257B
Charge amplifier	Kistler	5011A
Surface roughness tester	Mitutoyo	Surftest SV-624
MQL supply equipment	VOGEL	Vario UFV10-001

다. 솔레노이드 밸브를 이용하여 일반 습식가공에서의 절삭유 공급과 MQL 가공에서의 MQL 공급을 NC 코드로 제어되게 함으로서 가공기 등 절삭성에 영향을 미치는 다른 요인을 최대한 배제한 환경에서 습식가공과 MQL 가공의 비교 실험이 가능하게 구성하였다. 또한 일반적인 공장 환경에서의 공급 공기압으로는 MQL 공급 장치 제조회사에서 제시하는 사용 추천압력(6bar)을 만족할 수 없고, 다양한 공기압에 대한 실험 고찰이 불가능하므로 이를 해결하기 위하여 Compressor를 설치하였다. 이때 Compressor에서 생성된 공기를 바로 이용할 경우 Compressor의 공기 압축·팽창을 통한 수분의 발생으로 MQL 공급 장치의 오작동 및 고장의 원인이 되므로 이를 제거하기 위해 Air cleaning system을 추가적으로 설치하여 전체 가공시스템을 구성하였다. MQL 공급 장치는 독일 VOGEL사의 Vario UFV10-001로 외부급유방식 및 내부급유방식에 모두 적용할 수 있고 세부 사양은 Table 2와 같다.

### 3.2 시편 및 절삭공구

실험에 사용된 실험체는 기계구조용 탄소강 SM45C이며 재료의 화학적 조성은 Table 3과 같고, 시편은 길이 100mm, 직경 55mm의 환봉을 Fig. 2와 같은 형상과 치수로 가공하였다.

Table 2 Specification of MQL Supply

Oil droplet size ( $\mu\text{m}$ )	Aerosol quantity (ml/h)	Air consumption (NI/min)
0.5	5~150	140~300

Table 3 Chemical composition of workpiece material

Composition Metal	C	Mn	Si	P	S
	SM45C	0.45	0.64	0.18	0.021

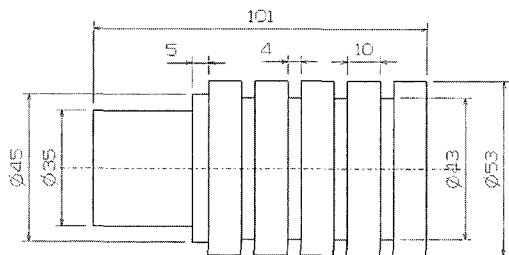


Fig. 2 Shape and dimensions of test specimen

절삭공구는 일반적으로 생산현장에서 많이 쓰이는 초경 모재위에 TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN을 CVD 코팅한 CNMG 120404 FG TT3500 Insert(TaeguTec)를 사용하였으며, 노즈 반경은 0.4mm이다.

공구홀더는 외경 선삭용 L형 PCLNR 2020 K12로 옆날각(approach angle)과 앞날각(end cutting edge angle)이 각각 5° 이고 절입각(entering angle)은 95° 인 홀더를 사용하였다.

### 3.3 실험방법

MQL을 이용한 선삭가공과 절삭유를 이용한 선삭가공에서 가공조건이 표면거칠기 및 절삭력에 미치는 영향을 분석하여 최적 가공조건을 찾고, 그 때에 각각의 가공환경에 따른 특성을 비교하기 위해 MINITAB을 이용하여 실험계획을 수립하고, 실험계획에 따라 원통외경 선삭을 실시하여 절삭력과 표면거칠기(Ra)를 측정하였다.

실험배치는 완전요인배치법으로 랜덤하게 배치하였다. 인자 및 수준의 선정은 기존의 연구결과를 바탕으로<sup>(9,10)</sup> MQL 토출량, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 및 공급 공기압으로 선정하였고, 공급 공기압은 7기압으로 고정하였다. 여기서 MQL 토출량은 노즐직경에 의존한다는 MQL 공급 장치 회사의 기술데이터를 바탕으로 직경  $\phi 2\text{mm}$ ,  $\phi 6\text{mm}$ 의 노즐을 사용하여 MQL 토출량을 구분하였다.

실험은 실험환경의 제약으로 MQL 가공환경과 습식 가공환경을 분리하여 실험하였으며, MQL과 절삭유의 공급방향

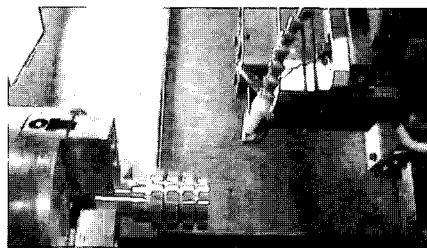


Fig. 3 Nozzle set up

Table 4 Specification of MQL Lubricants

Type	Base	Density at +20°C (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity at +40°C (mm <sup>2</sup> /s)	Flash point (°C)
LubriFluid F100	Higher alcohol	0.84	25	184

및 거리에 따라 가공특성이 달라질 수 있으므로 모든 실험은 Fig. 3과 같이 노즐과 Insert tip간의 거리를 11mm로 하여 MQL을 30° 방향의 경사면상에 공급하였다. MQL 공급장치에 사용된 절삭유는 LubriFluid F100으로 사양은 Table 4와 같다.

**Table 5 Result of experiments for flood coolant turning**

Run order	Nozzle diameter [mm]	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]	Roughness [Ra]	Principal cutting force [N]
1	2	100	0.12	0.5	4.205	176.08
2	6	200	0.12	1.5	0.815	520.19
3	2	200	0.12	1.5	0.775	474.47
4	6	100	0.07	0.5	4.99	101.91
5	2	200	0.12	0.5	0.885	210.28
6	2	100	0.07	1.5	1.895	410.72
7	2	300	0.12	0.5	0.43	190.58
8	6	100	0.02	0.5	3.875	37.10
9	2	200	0.07	1.5	0.605	369.65
10	6	100	0.02	1.5	4.41	152.99
11	6	200	0.07	1.5	0.49	363.70
12	6	200	0.02	1.5	1.75	187.75
13	2	200	0.02	1.5	0.345	131.83
14	2	200	0.02	0.5	1.86	132.13
15	2	100	0.02	1.5	3.645	141.69
16	2	300	0.02	1.5	0.4	145.41
17	2	300	0.07	0.5	0.495	125.94
18	6	300	0.07	0.5	0.345	131.83
19	6	200	0.02	0.5	2.96	80.04
20	2	100	0.12	1.5	1.65	517.07
21	6	300	0.12	0.5	0.83	187.66
22	6	100	0.12	0.5	5.325	147.10
23	2	300	0.12	1.5	0.955	505.94
24	6	100	0.12	1.5	1.655	600.44
25	6	300	0.02	0.5	0.4	77.99
26	6	300	0.12	1.5	0.98	497.61
27	6	100	0.07	1.5	2.64	389.43
28	2	100	0.02	0.5	6.115	50.26
29	2	200	0.07	0.5	1.1	111.69
30	2	300	0.07	1.5	0.595	336.44
31	6	300	0.07	1.5	0.38	349.52
32	6	300	0.02	1.5	0.385	185.02
33	2	100	0.07	0.5	4.89	110.19
34	6	200	0.12	0.5	0.78	198.15
35	2	300	0.02	0.5	0.235	44.74
36	6	200	0.07	0.5	1.86	55.43

## 4. 실험결과 및 고찰

각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석해보고 그래프화해 보았다. 통계적 방법으로는 상용소프트웨어인 MINITAB을 사용하여 분산분석을 실시했다.

### 4.1 습식 가공

Table 5는 습식 가공에 대한 실험배치 및 실험 결과를 보여주고 있다.

표면거칠기를 측정하기 위해 Mitutoyo사의 Surftest SV-624를 이용하여 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )를 측정하였다. 측정값은 임의로 정한 3곳의 표면거칠기값을 측정하여 그 값들의 평균을 이용하였다. 절삭력은 선반의 공구대 위에 공구를 장착한 Kistler 사의 Tool Dynamometer 9257B를 설치하여 주분력을 측정하였다.

Table 6은 표면거칠기에 대한 분산분석을 나타내고, Table 7은 절삭력에 대한 분산분석을 나타낸다. 분산분석표에서 95%의 유의수준으로 볼 때 p값이 0.05보다 작으면 그 인자는 특성치에 유의한 것으로 볼 수 있다. 가공물의 표면거칠

**Table 6 The result of ANOVA for surface roughness**

Factor	DF	SS	MS	F	P
Nozzle diameter	1	0.399	0.399	0.790	0.388
Cutting speed	2	70.461	35.231	69.580	0.000
Feed rate	2	2.458	1.229	2.430	0.120
Depth of cut	1	8.227	8.227	16.250	0.001
Nozzle diameter · Cutting speed	2	0.418	0.209	0.410	0.669
Nozzle diameter · Feed rate	2	0.006	0.003	0.010	0.994
Nozzle diameter · Depth of cut	1	0.062	0.062	0.120	0.732
Cutting speed · Feed rate	4	3.396	0.849	1.680	0.204
Cutting speed · Depth of cut	2	8.862	4.431	8.750	0.003
Feed rate · Depth of cut	2	0.276	0.138	0.270	0.765
Error	16	8.101	0.506		

**Table 7 The result of ANOVA for cutting force**

Factor	DF	SS	MS	F	P
Nozzle diameter	1	172	172	0.24	0.634
Cutting speed	2	177	89	0.12	0.887
Feed rate	2	340689	170345	232.55	0.000
Depth of cut	1	469401	469401	640.81	0.000
Nozzle diameter · Cutting speed	2	464	232	0.32	0.733
Nozzle diameter · Feed rate	2	1227	613	0.84	0.451
Nozzle diameter · Depth of cut	1	3366	3366	4.60	0.048
Cutting speed · Feed rate	4	4660	1165	1.59	0.225
Cutting speed · Depth of cut	2	6019	3010	4.11	0.036
Feed rate · Depth of cut	2	97321	48660	66.43	0.000
Error	16	11720	733		

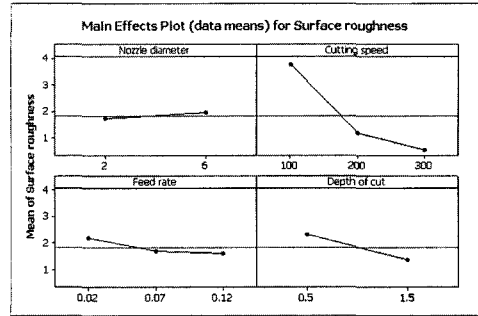
기에는 절삭속도, 절삭깊이의 주효과와 절삭속도·절삭깊이의 교호효과가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, 절삭력에는 이송속도, 절삭깊이의 주효과와 노즐직경·절삭깊이, 절삭속도·절삭깊이, 이송속도·절삭깊이의 2인자 교호효과가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 4, 5는 표면거칠기 및 절삭력에 대해 주효과의 크기를 비교하기 위해 그래프를 그려 본 것이다. 여기서 수평선은 총평균을 나타내며, 각 점은 수준에서의 평균을 뜻한다.

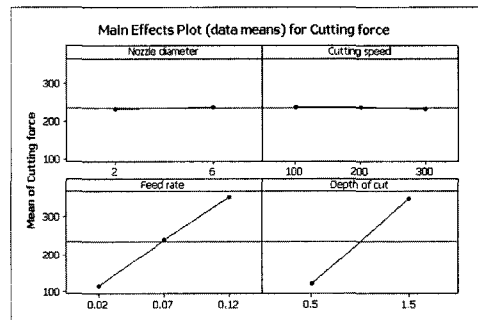
표면거칠기에는 절삭속도의 효과가 가장 크고 그 다음 절삭깊이가 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 이송속도와 노즐직경은 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도는 고려한 절삭조건 범위에서는 커질수록 양호한 결과를 얻는 것으로 나타났고, 절삭속도와 이송속도는 일정 수준이상에서는 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

절삭력에는 이송속도와 절삭깊이의 효과가 가장 크며, 고려한 절삭조건 범위에서 이송속도와 절삭속도가 낮을수록 좋으며 절삭유 토출량과 절삭속도는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

이상의 실험결과에서 절삭유를 이용한 습식가공의 경우 이송속도와 절삭깊이는 절삭력과 표면거칠기에 미치는 영향



**Fig. 4 Main effects plot for surface roughness**



**Fig. 5 Main effects plot for cutting force**

이 반대로 나타났다. 따라서 가공성의 기준을 어디에 두느냐에 따라 최적 수준 조합이 확연히 달라지므로 그 기준을 명확히 하고 절삭조건을 선정하여야 한다.

## 4.2 MQL 가공

Table 8은 MQL 가공에 대한 실험배치 및 결과를 보여 주고 있다. 절삭력과 표면거칠기의 측정은 습식 선삭가공의 경우와 동일하게 측정하였다.

Table 9는 표면거칠기에 대한 분산분석을 나타내고, Table 10은 절삭력에 대한 분산분석을 나타낸다. MQL 가공에서 가공물의 표면거칠기에는 절삭속도, 절삭깊이의 주효과와 절삭속도·이송속도, 절삭속도·절삭깊이의 교호효과가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 절삭속도·이송속도, 절삭속도·절삭깊이의 교호효과가 유의한 것으로 나타난 것은 MQL 가공의 경우 칩처리 작용을 압축공기가 하는데 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 조합에 따른 발생 칩 형태의 차이에 따른 칩 배출성의 차이로 인한 간섭효과를 의미 하는 것으로 사료된다. 실험 중 절삭속도, 이송속도가 낮고 절삭깊이가 작은 경우 연속형 칩이 발생하여 MQL 분산노즐

**Table 8 Result of experiments for MQL tuning**

Run order	Nozzle diameter [mm]	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]	Roughness [Ra]	Principal cutting force [N]
1	2	100	0.12	0.5	2.35	154.27
2	6	200	0.12	1.5	0.73	504.41
3	2	200	0.12	1.5	0.65	501.47
4	6	100	0.07	0.5	4.04	98.78
5	2	200	0.12	0.5	0.45	228.19
6	2	100	0.07	1.5	1.27	407.96
7	2	300	0.12	0.5	0.41	162.01
8	6	100	0.02	0.5	3.18	31.36
9	2	200	0.07	1.5	0.49	390.20
10	6	100	0.02	1.5	2.15	97.84
11	6	200	0.07	1.5	1.07	339.72
12	6	200	0.02	1.5	0.73	195.72
13	2	200	0.02	1.5	0.64	164.86
14	2	200	0.02	0.5	0.44	57.37
15	2	100	0.02	1.5	2.49	89.07
16	2	300	0.02	1.5	0.43	162.38
17	2	300	0.07	0.5	0.22	120.91
18	6	300	0.07	0.5	0.32	120.54
19	6	200	0.02	0.5	0.51	23.31
20	2	100	0.12	1.5	0.66	583.11
21	6	300	0.12	0.5	0.65	153.86
22	6	100	0.12	0.5	3.91	142.30
23	2	300	0.12	1.5	0.44	515.23
24	6	100	0.12	1.5	1.26	537.83
25	6	300	0.02	0.5	0.23	67.87
26	6	300	0.12	1.5	0.99	487.97
27	6	100	0.07	1.5	1.21	391.23
28	2	100	0.02	0.5	3.96	60.70
29	2	200	0.07	0.5	1.11	115.37
30	2	300	0.07	1.5	0.48	326.36
31	6	300	0.07	1.5	0.46	353.71
32	6	300	0.02	1.5	0.89	179.56
33	2	100	0.07	0.5	2.97	93.59
34	6	200	0.12	0.5	0.61	169.33
35	2	300	0.02	0.5	0.40	59.88
36	6	200	0.07	0.5	1.11	105.28

등에 간섭을 일으키고, MQL의 절삭점 침투를 방해하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 일반 습식가공의 경우도 동일하게 관찰되었다. 이로 인해 인자들의 특정수준 조합에서 표면거칠기가 나빠지는 것으로 사료된다. 절삭력에는 이송속도, 절삭깊이의 주효과와 이송속도·절삭깊이의 2인자 교호

**Table 9 The result of ANOVA for surface roughness**

Factor	DF	SS	MS	F	P
Nozzle diameter	1	0.488	0.488	3.950	0.064
Cutting speed	2	27.715	13.858	112.140	0.000
Feed rate	2	0.362	0.181	1.460	0.261
Depth of cut	1	2.684	2.684	21.720	0.000
Nozzle diameter · Cutting speed	2	0.055	0.027	0.220	0.804
Nozzle diameter · Feed rate	2	0.630	0.315	2.550	0.109
Nozzle diameter · Depth of cut	1	0.003	0.003	0.020	0.885
Cutting speed · Feed rate	4	1.754	0.439	3.550	0.030
Cutting speed · Depth of cut	2	8.267	4.134	33.450	0.000
Feed rate · Depth of cut	2	0.499	0.250	2.020	0.165
Error	16	1.977	0.124		

**Table 10 The result of ANOVA for cutting force**

Factor	DF	SS	MS	F	P
Nozzle diameter	1	1027	1027	1.02	0.328
Cutting speed	2	533	267	0.26	0.771
Feed rate	2	364812	182406	180.71	0.000
Depth of cut	1	504978	504978	500.30	0.000
Nozzle diameter · Cutting speed	2	855	428	0.42	0.662
Nozzle diameter · Feed rate	2	982	491	0.49	0.624
Nozzle diameter · Depth of cut	1	210	210	0.21	0.654
Cutting speed · Feed rate	4	6796	1699	1.68	0.203
Cutting speed · Depth of cut	2	1510	755	0.75	0.489
Feed rate · Depth of cut	2	99907	49954	49.49	0.000
Error	16	16150	1009		

효과가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 6, 7은 표면거칠기 및 절삭력에 대해 주효과의 크기를 비교하기 위해 그래프를 그려 본 것이다.

표면저칠기에는 절삭속도의 효과가 가장 크고 그 다음 절삭깊이, 노즐 직경 즉 MQL 토출량이 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며 이송속도는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 여기서 MQL 토출량이 표면저칠기에 미치는 영향은 이전의 연구결과<sup>(8)</sup>와는 달리 그 정도가 미미한 것으로 나타났다. 이것은 본 실험에서는 약 7기압의 공기압으로 공기를 공급하여 이전의 연구에서 언급하였던 공기량의 부족으로 인한 미스트의 침투성이나 액상화가 잘 이루어지지 않는 문제가 해결되었기 때문으로 판단된다. 또한 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도 모두 고려한 절삭조건 범위에서는 커질수록 양호한 결과를 얻는 것으로 나타났고, 절삭속도는 일정 수준이상에서는 거의 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

절삭력에는 이송속도와 절삭깊이의 효과가 가장 크며, 고려한 절삭조건 범위에서 이송속도와 절삭속도가 낮을수록 좋으며 MQL 토출량과 절삭속도는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 습식가공에서 일반적으로 알려진 경향<sup>(10)</sup>과 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 4~7의 결과에서 MQL을 이용한 선삭가공과 절삭유

를 이용한 선삭가공에서 가공조건이 표면저칠기 및 절삭력에 미치는 경향은 그 효과의 정도에 차이는 있으나 동일한 것으로 나타났다. 이상의 결과에서 가공환경이 습식에서 MQL로 바뀌더라도 가공성을 향상시키는 절삭조건 경향에는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 MQL 가공과 습식 가공 비교분석

가공환경 및 가공조건에 따른 표면저칠기와 절삭력의 특성을 분석하고 비교하기 위해 그래프를 그려 분석해 보았다.

Fig. 8은 MQL을 이용한 선삭가공과 절삭유를 이용한 선삭가공에서 Table 5의 실험순서에 따른 표면저칠기의 차이를 나타낸 그래프이다. 대부분의 절삭조건에서 MQL을 이용한 선삭가공이 일반습식 선삭가공에 비해 표면저칠기가 좋은 것으로 나타나 기존의 연구결과들과<sup>(2,3,6)</sup> 일치함을 확인할 수 있었다. 그래프에서 실험 1, 4, 8, 10, 15, 22, 28, 33번의 경우 표면저칠기가 상당히 좋지 않다. 이들 실험의 경우 절삭조건을 살펴보면 절삭속도 100m/min, 절삭깊이 0.5mm로 모두 동일하다. 이 경우 절삭력 신호를 살펴보면 Fig. 9와 같이 신호의 변동폭이 다른 조건에 비해 상당히 심한 것을 알 수 있다. 따라서 이 경우 일차적으로 채터진동에 의해 표면저칠기가 극히 나빠진 것으로 사료된다. 또한 분산분석 결과에서 볼 수 있듯이 절삭속도와 절삭깊이의 교호작용이 표면저칠기에 유의하므로 절삭속도 100m/min, 절삭깊이 0.5mm의 절삭조건에서는 두 인자의 교호작용도 표면저칠기에 악영향을 미친 것으로 판단된다. 즉 앞서 언급 하였듯이 절삭조건의 조합에 따른 발생 칩 형태의 차이로 인한 칩 간섭 효과로 판단된다. 습식가공의 경우 MQL 가공보다 특정 조건에서 훨씬 좋지 않은 결과가

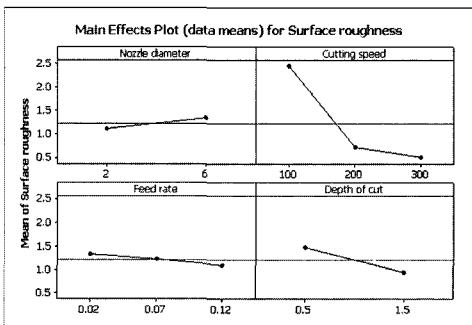


Fig. 6 Main effects plot for surface roughness

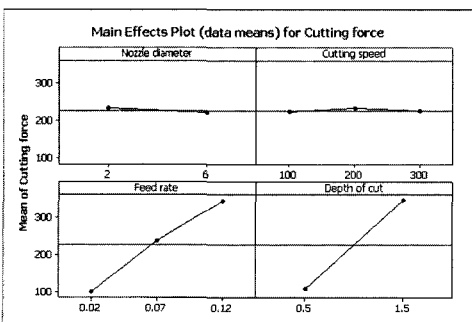


Fig. 7 Main effects plot for cutting force

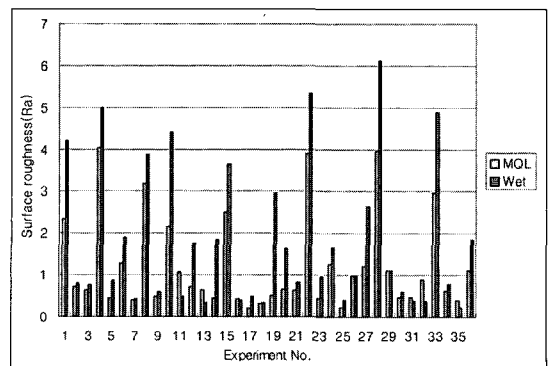


Fig. 8 Surface roughness for each experiments

나온 것은 실험시 낮은 절삭유 공급압으로 인해 MQL가공의 경우보다 영긴 연속형 칩의 배출이 제대로 이루어지지 못했기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 MQL을 이용한 선삭가공과 절삭유를 이용한 선삭가공에서 Table 5의 실험순서에 따라 절삭력의 차이를 나타낸 그래프이다. 측정된 절삭력은 주분력이다. 전체적으

로 실험환경의 차이에 따른 절삭력의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 절삭력이 크게 나타난 실험조건은 2, 3, 20, 23, 24, 26로 표면거칠기가 나빠진 실험조건과 차이를 보인다. 절삭력이 크게 나타난 2, 3, 20, 23, 24, 26번 실험의 경우를 살펴보면 절삭조건이 이송속도 0.12mm/rev, 절삭깊이 1.5 mm로 동일하다. 반면 10, 12, 13, 15, 16, 32번 실험의 경우 절삭깊이는 1.5mm로 동일하지만 이송속도가 0.02mm/rev로 달라 절삭력이 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 따라서 절삭력도 특정 수준의 인자조합에서 극히 나빠지는 것을 확인할 수 있다.

가공성의 평가를 절삭력과 표면거칠기에 대해 각각 적용할 경우 그 최적조건의 경향이 다른 것으로 나타났으며, 13, 14, 16, 17, 18, 25, 29, 35번 실험조건에서 절삭력과 표면거칠기 모두 일정 수준 이상의 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 전체적으로 MQL을 이용한 선삭가공이 절삭유를 이용한 선삭가공보다 표면거칠기 측면에서는 유리한 것으로 나타났으며, 절삭력 측면에서는 비슷한 것으로 나타났다. 따라서 절삭유에 의한 선삭가공을 MQL을 이용한 선삭가공으로 바꿀 경우 표면거칠기와 절삭력만을 놓고 볼 때는 상당한 환경 및 경제적인 이득을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 좀 더 엄밀한 판단을 위해서는 공구마모, 가공변질층, 잔류응력 등 더 많은 특성치를 고려한 실험이 수행되어야 할 것이다.

### 5. 결론

MQL을 이용한 선삭가공과 절삭유를 이용한 선삭가공에서 가공조건이 표면거칠기 및 절삭력에 미치는 영향을 분석하여 가공성을 향상시키는 최적 절삭조건을 찾고, 그 때에 각각의 가공환경에 따른 가공 특성을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가공기, 공구 등 절삭성에 영향을 미치는 다른 요인을 최대한 배제한 환경에서 실험한 결과 MQL을 이용한 선삭가공이 절삭유를 이용한 선삭가공보다 표면거칠기 측면에서는 유리하고, 절삭력 측면에서는 비슷한 것으로 나타났다.
- (2) MQL과 절삭유를 이용한 선삭가공에서 표면거칠기와 절삭력을 향상시킬 수 있는 최적 수준 조합의 경향은 동일한 것으로 나타났다.
- (3) 실험결과 이송속도와 절삭깊이는 절삭력과 표면거칠기에 미치는 영향이 정반대로 나타났다. 따라서 가공성의

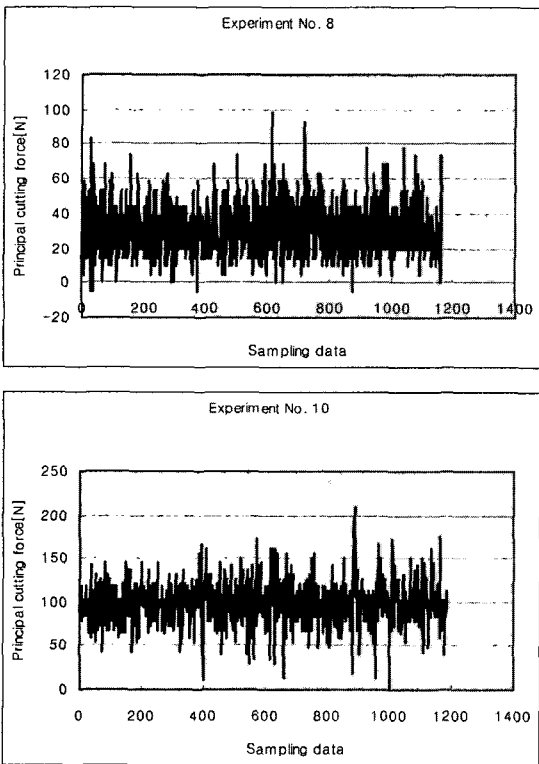


Fig. 9 Cutting force signal

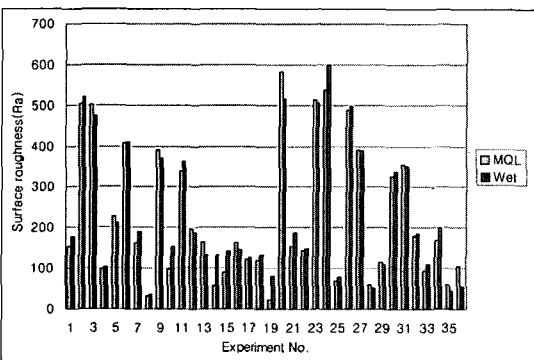


Fig. 10 Cutting force for each experiments



기준을 어디에 두느냐에 따라 최적 수준 조합이 확연히 달라지므로 그 기준을 명확히 하고 절삭조건을 선정하여야 한다.

- (4) 실험결과 절삭유를 이용한 선삭가공을 MQL을 이용한 선삭가공으로 바꿀 경우 표면거칠기와 절삭력측면에서만 비교할 때는 상당한 환경 및 경제적인 이득을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2005년도 창원대학교와 창원대학교 공작기계 기술연구센터의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Rahman, M., Senthil, K. A. and Salam, M. U., 2002, "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 539~547.
- (2) Anselmo, E. D., 2002, "Cutting conditions for finish turning process aiming : the use of dry cutting," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 899~904.
- (3) Sreejith, P. S. and Ngoi, B. K. A., 2000, "Dry machining : Machining of the future," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 287~291.
- (4) Beauchamp, Y., Tomas, M., Masounave, J. and Youssef, A., 1996, "Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design," *Computer ind. Eng.*, pp. 645~651.
- (5) Park, T. J., Yang, S. H., Lee, Y. M. and Kim, S. K., 2001, "Temperature Analysis of Each Coolant Level by a Multiple Comparison in Turning Process," *Journal of KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 110~115.
- (6) Ronan, A., Liang, S. Y. and George, W., 2003, "Minimum Quantity Lubrication in Finish Hard Turning," *HNICEM*.
- (7) Kang J. H., 2000, "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine-tool," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 9~17.
- (8) Paulo, D. J., 2003, "Design of optimization of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 340~344.
- (9) Lee, C. M., Hwang, Y. K. and Jung, J. Y., 2004, "The Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness in MQL Turning," *KSMTM Annual Conference*, pp. 28~33.
- (10) Cho, H. C., Jung, J. Y., Lee, C. M. and Hwang, Y. K., 2004, "A Study on the Improvement of Surface roughness using MQL Machining," *KSIE Annual Conference*, pp. 501~506.
- (11) White, F. M., 1974, *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, PEARSON Education Korea, pp. 471~510.