

MQL 가공에서 기계가공면의 표면 품위 향상

정종윤*[†] · 조형찬* · 이춘만**

*창원대학교 산업시스템공학과

**창원대학교 메카트로닉스공학부

Quality Improvement of Machined Surface in MQL Machining

Jong-Yun Jung*[†] · Hyung-Chan Cho* · Choon-Man Lee**

*Department of Industrial & Systems Engineering, Changwon National University

**Division of Mechatronics, Changwon National University

Machining processes produce high accurate metallic parts in metal working industries. Lubrication for machining enhances quality of machined surface and it prolongs the life of cutting tools. Since lubricant is poisonous to human body and environment, it causes occupational diseases for workers and air pollution in environment. Because of these problems generated, developed countries do not permit the excessive usage of lubricant in machining shops. This research focuses on the development of MQL machining technique that consumes minimal amount of lubricant, which reduces possible outbreak of occupational diseases and air pollution. This research sets experimental equipments for MQL machining. Experiments for this study are designed with major machining parameters in MQL. Through the analysis of experiments, this paper presents the optimal machining parameters.

Keywords : MQL Machining, Lubricant, Surface Roughness, Experimental Design, Material Removal

1. 서 론

제조 방법의 새로운 paradigm은 정밀화, 소형화, 경량화, 다기능화로 발전되어 왔으며 이러한 요구를 충족시키기 위해 정밀가공과 가공품의 정밀 측정기술이 이어졌다. 이를 위해 가공 상의 문제를 해결하는 정밀도 향상이 필요하며 가공면의 품질수준이 높게 요구되고 있다. 공작기계를 이용한 생산 현장에서는 가공 표면의 정밀도를 향상시키고 공구의 수명을 연장시키기 위해 가공 시 발생하는 열을 저하시키고 윤활성을 증가시키는 절삭유[3] 사용이 필수적이다.

그러나 기계가공 절삭유는 인체에 해로운 염소계, 질소계, 계면활성제, 방청제, 방부제, 극압첨가제[3] 등 독극성의 화합물을 많이 함유하고 있기 때문에 호흡기 장애와 같은 직업병을 유발하며 대기를 오염시킨다. 또한 절삭유는 환경에도 해로운 물질을 많이 함유하고 있어 폐 절삭유의 처리에도[6] 큰 어려움이 있다.

미국 OSHA(Occupational Safety and Health Administration)[10]에서는 작업장에서 공기 중의 미립자 농도와 관련하여 허용 노출한도를 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 에서 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 낮출 것을 제안하였고, 1999년 7월 일본에서는 “특정 화학물질 배출량 파악 등 관리개선 촉진에 관한 법률”의 시행

[†] 교신저자 jyjung@sarim.changwon.ac.kr

※ 이 논문은 2006년도 창원대학교 연구교수연구비와 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

및 최근에는 절삭유에 극압 첨가제를 포함시키지 못하도록 JIS[11] 규격을 개정하는 등 점진적으로 환경규제가 강화되어지고 있다. 이런 문제로 인하여 환경오염에 대응하며 경제적인 가공기술인 Eco-machining 기술이 대두되고 있으며, 그 중에서 절삭유를 최소한으로 사용하는 가공방법인 MQL(Minimum Quantity of Lubricant) 절삭기술이[13] 이미 선진 외국에서 많이 활용되는 추세에 있다. 국내에는 그 사용 환경과 적용 기술의 보급이 미약하기 때문에 이런 Eco-machining의 도입이 부진한 상황이다. 본 연구는 기계가공에서 green 환경에 필수적인 MQL 가공기술을 위해 사용 환경과 최적 절삭조건을 개발하고자 한다.

2. 가공기술과 절삭유

2.1 Eco-machining 가공기술

기계가공에서 절삭유의 사용 목적은 절삭부위의 윤활 효과와 냉각효과를 높이고자 함이다. 윤활작용은 공구와 칩, 소재간의 마찰을 적게 하여 소요되는 절삭력을 줄이며 냉각작용은 공구의 인선을 냉각시켜 경도 저하를 방지하므로 공구수명을 연장시킨다. 이러한 기계가공에서 절삭유의 사용은 필수적이거나 환경적 측면을 고려하여 절삭유의 과다 사용을 대체하며 윤활, 냉각효과를 유지하는 Eco-machining 가공기술이 사용된다. 절삭유를 전혀 사용하지 않는 dry 가공이나[12] 저온의 바람을 이용하는 냉풍 가공은[4] 사용상의 제약이 있어 절삭유를 최소한으로 사용하는 MQL 가공기술이 대안으로 부각되고 있다.

2.2 MQL 가공기술

MQL 가공기술은 기체를 반송매체로 이용하여 미립자 [1]윤활 액을 공구 날 끝에 도포하는 방법으로 절삭점을 직접 냉각시키기보다는 이차적으로 발생하는 공구와 칩 사이의 마찰열을 감소시키고 표면거칠기를 향상시킬 목적으로 개발되었다. 통상적으로 반송매체는 압축공기를 사용하며 공기 공급량은 100~400NL/min이고 MQL의 공급유량은 150ml/h 이하이다. 절삭유의 윤활작용에 관해서는 인체에 무해한 식물성 오일미스트로 대체하며, 칩 배출 및 냉각작용은 고압의 공기로 대체할 수 있으나 상대적으로 윤활작용의 특성이 많이 좌우한다고 볼 수 있다. MQL 가공에서는 극미량의 유제만 공급하므로 절삭이 발생하는 위치에 정확하게 공급 되어

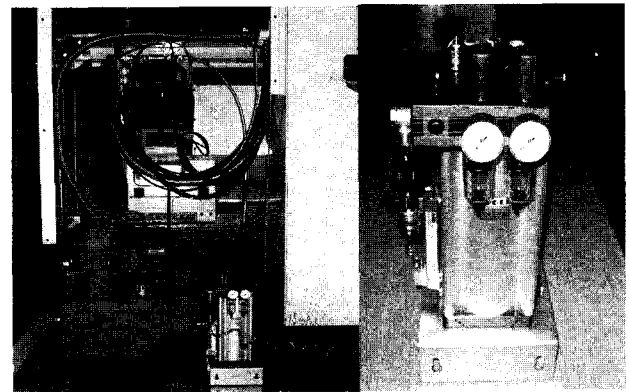
야 한다.

3. MQL 절삭 실험

MQL 가공의 특성을[8] 파악하고 표면 거칠기에 영향을 미치는 변수를 찾아 실험의 계획을 수립하며 절삭 특성을 나타내는 인자와 수준을 우선 파악한다. 본 실험에서는 열을 많이 발생시키는 steel의 선삭가공에서 극소량의 절삭유를 사용하여 표면의 냉각효과가 미미한 상태에서 절삭면의 특성을 파악하고자 한다. 많은 변수들이 표면거칠기에 영향을 미칠 수 있으나 크게는 절삭조건, 절삭공구, 공작기계, 가공재료 등이 있다. 공작기계, 절삭공구, 가공재료 등은 noise factor로 간주하고 본 실험에서 절삭조건을 제어인자로[2] 하여 실험을 계획한다.

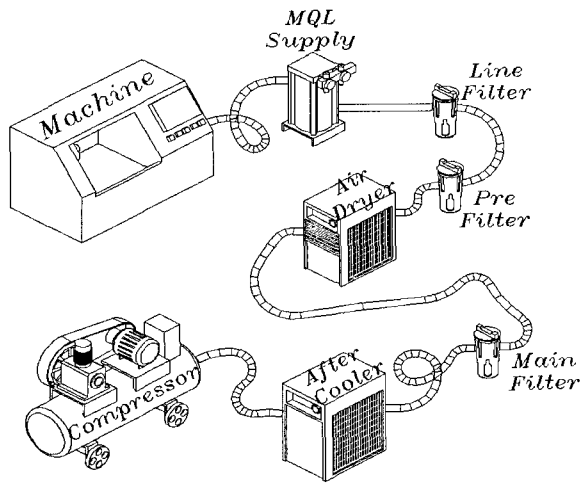
3.1 MQL 실험장비 구성

MQL 공급 장치는 독일 V사의 Vario UFV10-001로 Oil droplet size 0.5(μm), Aerosol quantity 5~150(ml/h), Air consumption 140~300(Nl/min) 사양의 장비를 사용한다. 가공기는 국내 D사의 HT-1200 CNC 선반으로 Mist cleaner 장치와 MQL 장치가 부착된 장비를 사용한다. 다음 그림 <Figure 1>은 MQL 공급 장치와 공작기계 뒷면에 부착한 모습을 사진으로 보여 준다.



<Figure 1> MQL supplier and installation

Air cleaning system은 After Cooler, Air Dryer, Main Filter, Pre Filter, Line Filter로 구성되며 최대 압력은 모두 9.9(kgf/cm²)이고 capacity는 1~2(Nm³/min)이다. Compressor는 7.5마력, Max. flow rate 934(l/min)의 중형급 공기 압축기가 사용된다. 다음 그림 <Figure 2>는 본 실험에서 사용한 air cleaning system과 실험 장치의 구성을 diagram으로 나타낸다.



<Figure 2> Air cleaning system and experimental set-up

3.2 MQL 실험 장치의 Set-Up

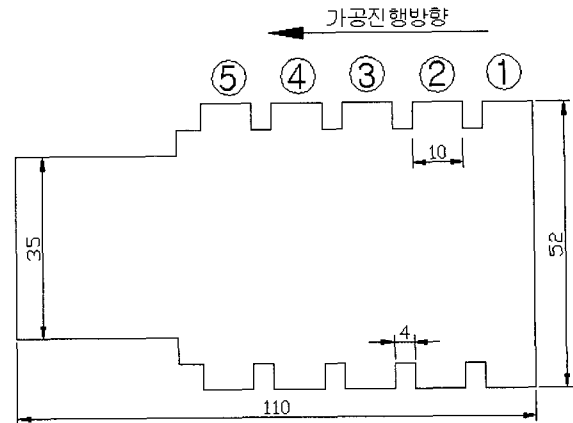
실험의 결과에 영향을 미치는 여러 변수의 폭을 좁혀 연구 목적에 맞는 data를 얻기 위해 MQL 절삭 실험 장치를 set-up 할 때, 선행 연구로부터[5] 얻은 경험을 살려 다음과 같은 점을 유의하여 설치한다. MQL 유량 분사는 chip 배출과 간섭을 적절히 피하여야 MQL 분사의 효과를 기대할 수 있고 또한 MQL 분사 tip에서 절삭점까지의 거리와 MQL 반송매체의 공급 압력 간에 깊은 관계가 있으므로 반드시 추천 공기 공급 압력을 사용하여야 가공점에 oil mist의 침투성을 높여 MQL 가공의 효과를 기대할 수 있게 된다.

Tip과 절삭점까지의 거리는 공급압력을 고려하여 충분히 MQL이 공급될 수 있는 짧은 거리로 하여야 한다. 절삭유의 액상화 상태가 표면거칠기에 영향을 미치지 않게 하기 위해 air cleaning system에서 3종의 filter를 사용하여 1 μ m 이상의 먼지를 제거하여야한다. 또한 air filter의 성능 보호와 절삭점의 윤활효과를 높이도록 공기의 수분을 제거하기위해 air drier를 설치한다.

3.3 실험소재 및 절삭공구

3.3.1 실험소재

실험소재는 기계구조용 탄소강 SM45C로 일반 기계제조용으로 많이 사용되며 탄소 0.45%를 포함한다. 실험을 위한 시편의 총 길이는 100mm, 직경 \varnothing 52의 환봉으로 실험의 측정을 위한 절삭구간은 각각 10mm이며 측정구간 사이를 4mm간격을 두어 분할하고 다음의 <Figure 3>과 같은 치수와 방향으로 원통 절삭가공 실험을 수행한다.



<Figure 3> Geometry for the test specimen

3.3.2 절삭공구

절삭공구는 TiN-TiCN-AL2O3-TiN을 CVD코팅한 CNMG FG TT3500 insert를 사용하고 PCLNR2020 K12 Tool holder를 사용한다. TT3500 tip은 일반 강의 절삭용으로 사용되며 우수한 내마멸성과 내마모성으로 폭넓은 조건에 적용할 수 있다. 사용되는 공구 tip의 corner radius는 약 100(μ m)이며 강의 황삭에서 정삭까지 사용이 가능하다. TT3500 insert tip의 SM45C(탄소강)의 추천 절삭속도는 80~350m/min이다.

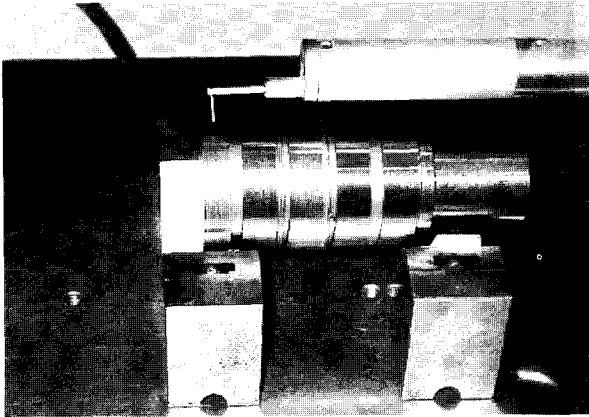
3.4 가공면의 측정

3.4.1 표면거칠기

표면거칠기란 가공면의 일정한 간격 사이에 나타나는 요철의 빈도와 높이의 고저를[7] 일컫는데 이는 기계의 정도, 가공환경에 많은 영향을 받으며 절삭 parameter에 따라 크게 차이가 나타난다. 가공면 요철의 높이가 작은 것이 정밀도가 좋으며, 표면거칠기는 기계 부품의 마찰, 마모, 결합, 내식성과도 밀접한 관계를 갖고 있으므로 가공면의 품위를 판정하는 기준으로 표면거칠기를 중요시 한다.

3.4.2 측정 방법

시험편의 특성치인 표면거칠기를 측정하기 위하여 일본의 M사의 측정기를 이용하여 중심선으로부터의 평균 이탈선간의 거리를 산술 평균으로 구하는 중심선평균거칠기(CLA) Ra 값을 <Figure 4>에서 보는 것과 같은 순서와 방향으로 측정한다. 측정방법은 120도 간격으로 회전하여 반복 3회 측정하여 평균값을 산출한다. 측정은 <KS B 0161>규격에 따라 cutoff value 0.8mm, sampling length 0.8mm, sampling 5회, evaluation length 4mm로 한다.



<Figure 4> Measuring direction and setting

3.5 실험계획과 실험의 설정

MQL의 분사방향과 nozzle의 직경 및 형상에 따라 가공특성이[5] 달라 질수 있으므로 분사장비는 oil mist가 절삭점에 충분히 분사되도록 설치되어야 한다. 본 실험에서는 nozzle의 직경이 $\varnothing 2\text{mm}$ 이고 연결 tube는 동관을 사용하며, nozzle의 tip과 가공점과의 거리는 10mm로 한다. Tip의 경사각은 칩 배출의 간섭을 회피할 수 있도록 45° 로 하고 상에서 하 방향으로 MQL을 공급하며, MQL supplier의 공기압력은 10bar(150psi)까지 공급이 가능하다. 사용되는 절삭유는 Lubrifluid F100으로 이의 특성은 higher alcohol base의 density $0.84(\text{g}/\text{cm}^3)$, viscosity $25(\text{mm}^2/\text{s})$, flash point 184°C 이다.

실험방법은 시편을 고정하고 tip을 부착하여 원통의 외경을[9] 절삭한다. 실험의 제어인자를 MQL 유량, Feed rate, Cutting speed, Cutting depth으로 선정하고 Air pressure는 유제의 액상화 상태와 공급을 고려하여 7Bar로 고정한다. 각 인자의 수준은 MQL 10, 80, 150ml/h 3수준, Cutting speed 80, 120, 160, 220m/min 4수준, Feed rate 0.1, 0.14, 0.2mm/rev 3수준, Cutting depth 0.2, 0.6, 1.2mm 3수준으로 full factorial design의 총 실험횟수는 108회로 계획한다.

3.6 실험 Data의 수집

<Table 1> Experimental factors and measured data

Order	MQL (ml/h)	Cutting depth (mm)	Cutting speed (m/min)	Feed rate (mm/rev)	Surface roughness Ra(μm)
1	10	0.2	120	0.10	3.107
2	150	1.2	80	0.14	1.257
3	80	0.2	80	0.20	4.232
4	150	0.6	160	0.20	2.204
5	10	0.6	160	0.14	1.128

본 실험에서 측정된 원통 외면 가공의 표면거칠기 data를 다음 표와 같이 수집하며 <Table 1>은 수집된 data의 일부를 나타낸다.

4. 실험 결과 분석

4.1 분산 분석

본 연구의 실험결과, 선삭가공에서 MQL 유량, Feed rate, Cutting speed 및 Cutting depth가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위한 방법으로 MINITAB을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 하였다. <Table 2>와 같이 MQL 유량, Feed rate, Cutting depth와 Cutting speed의 주효과는 모두 유효하게 나타났으며, MQL \times Cutting depth, Cutting speed \times Cutting depth, Feed rate \times Cutting depth의 교호작용이 유의함을 보여주고 있다.

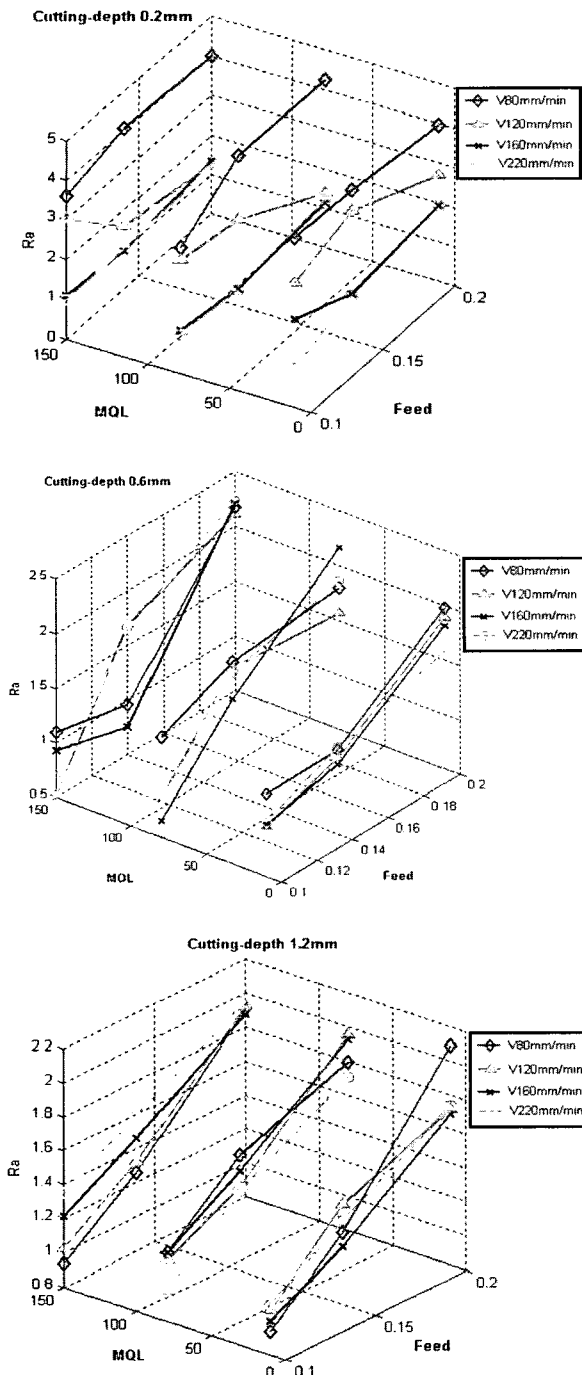
<Table 2> ANOVA table for the experiments

Factor	DF	Seq SS	Adj MS	Fo	P
MQL 유량	2	0.6291	0.3145	3.27	0.043
Cutting speed	3	15.9281	5.3094	55.26	0.000
Feed rate	2	5.6905	2.8453	29.61	0.000
Cutting depth	2	15.7617	7.8809	82.02	0.000
MQL \times Cutting depth	4	2.8171	0.7043	7.33	0.000
Cutting speed \times Cutting depth	6	28.5092	4.7515	49.45	0.000
Feed \times Cutting depth	4	3.9427	0.9857	10.26	0.000
Error	84	8.0707	0.0961		
Total	107	81.3491			

4.2 Cutting depth에 따른 표면거칠기

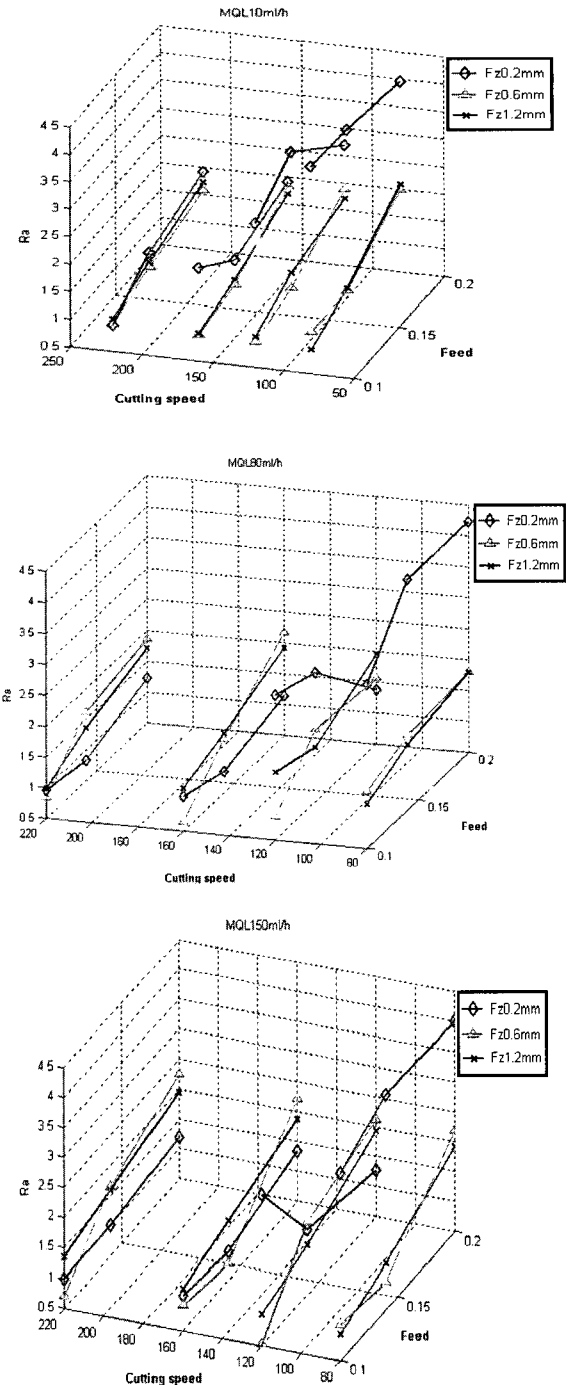
다음의 <Figure 5>는 Cutting depth 3 수준 각각에 대해 Feed와 MQL 유량에 따른 표면거칠기의 변화를 절삭속도 수준별로 보여준다.

절삭깊이가 작은(0.2mm) 조건에서는 절삭속도가 증가할수록 표면거칠기가 양호해 지는 일반적인 습식 절삭가공과 유사한 결과가 나타나며 절삭속도가 160m/min 이상에서는 많은 차이를 보이지 않는다. 절삭 깊이가 일정(0.6mm) 이상에서는 절삭속도보다 이송속도가 표면거칠기에 더 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 그림의 결과와 같이 Cutting depth 1.2mm에서 안정된 가공



<Figure 5> Surface roughness by cutting depth

특성을 보여준다. 이는 절삭깊이가 작으면 가공에 필요한 절삭력은 작아지나 절삭깊이가 어느 정도 이상이 되어야 안정된 표면조도를 얻을 수 있음을 보여 준다. 그러므로 정삭 가공시 절삭깊이가 작으나 우수한 표면거칠기를 얻어야 하므로 절삭속도와 이송속도 선정에 각별히 주의할 필요가 있다.

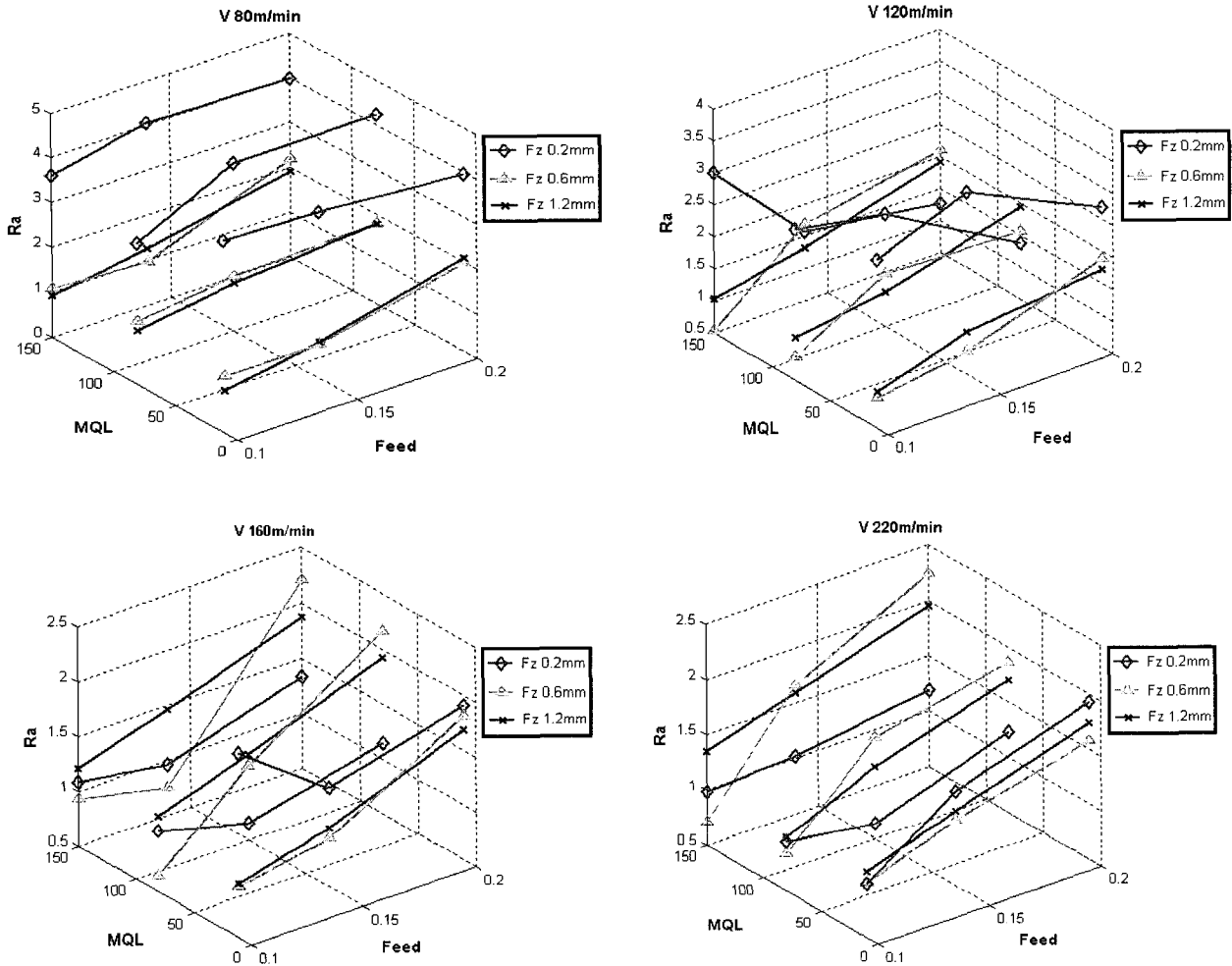


<Figure 6> Surface roughness by MQL amount

4.3 MQL의 유량에 따른 표면거칠기

다음의 <Figure 6>은 각각의 MQL 수준에 대해 Feed rate와 Cutting speed에 따른 표면거칠기 변화를 절삭 깊이가 별로 보여준다.

절삭속도 80m/min에서 절삭깊이가 0.2mm이면 MQL의



<Figure 7> Surface roughness by cutting speed

유량에 관계없이 급격하게 표면거칠기가 나빠짐을 확인할 수 있다. 이것은 절삭조건이 극단적으로 나빠질 경우 MQL 유량에 의한 표면거칠기의 영향을 파악하기 힘든 것으로 나타난다.

절삭속도가 120m/min, Feed 0.1mm/rev, 절삭깊이 0.6mm, MQL 150ml/h에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻으며 전체적으로 MQL 유량이 표면거칠기에 유의하나 그 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 MQL의 유량이 많을수록 변동의 폭이 크고 이송속도에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 MQL의 유량이 증가할수록 절삭조건에 더욱 민감하게 반응함을 나타내며, 즉 MQL 유량이 표면거칠기에 직·간접적으로 관여함을 보여주고 있다.

4.4 Cutting speed에 따른 표면거칠기

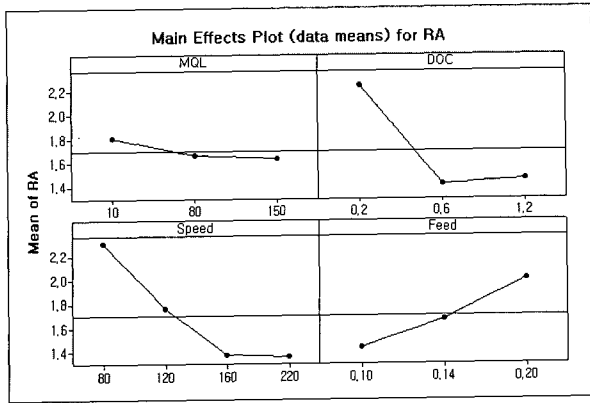
다음의 <Figure 7>은 각각의 Cutting speed 수준에 대

해 Feed rate와 MQL 유량에 따른 표면거칠기 변화를 절삭깊이에 따라 보여주고 있다.

절삭속도 80m/min에서 절삭조건에 따른 표면거칠기의 변동의 폭이 크게 나타나며 절삭속도가 증가할수록 절삭조건에 따른 표면거칠기의 변동의 폭이 줄어들음을 확인할 수 있다. 이런 결과로 절삭속도, 절삭 깊이, 이송속도 등의 절삭 조건을 절삭 환경에 적합하도록 선정하여야 좋은 표면을 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

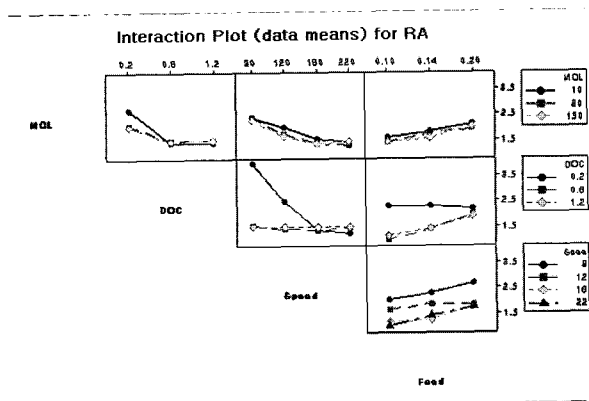
그림 <Figure 8>은 각 인자의 수준별 표면거칠기 (Ra) data 평균을 보여 준다. 그림에서 보는 바와 같이 MQL 유량은 표면거칠기에 미치는 효과가 아주 크지 않으나 Cutting depth, Cutting speed, Feed rate는 그 영향이 크며 각각 0.6mm, 160m/min, 0.1mm/rev. 수준과 MQL 유량 150ml/h에서 우수한 표면거칠기를 나타낸다. 일반적으로 경제적인 절삭을 위해 절삭깊이와 이송속도를 높여야 하나, 아래의 그림에서 보는 바와 같이 이송속도를 높이면 표면거칠기가 나빠지므로 정삭가공에서는 이송속

도를 작게 하여야 한다.



<Figure 8> Main effect plot for surface roughness

다음의 <Figure 9>는 각 인자 간의 교호작용을 보여 준다. <Table 2>의 ANOVA table에 나타난 것처럼 MQL × Cutting depth, Cutting speed × Cutting depth, Feed rate × Cutting depth의 교호작용이 유의하다. Cutting depth 0.2mm 인 경우 표면거칠기가 나쁘므로 이 수준을 배제하면 교호작용이 작아지고 각 인자의 최적 수준 선정에 별다른 문제가 없다. 향후의 실험계획에서 Cutting depth와 Cutting speed 수준을 상향 조정하면 교호작용 면에서 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.



<Figure 9> Interaction plot between factors

5. 결 론

극미량 절삭유가 가공면의 품질에 미치는 영향을 파악하여 주로 경험에만 의존하며 정량화 되어있지 않은 기초 자료를 체계화하고, 특히 표면거칠기에 영향을 미치는 인자들의 최적 절삭조건을 찾아 다음과 같은 MQL 가공 특성의 결론을 얻었다.

① 절삭 깊이가 작은(0.2mm) 조건에서 절삭속도가 증가

할수록 표면거칠기가 크게 양호해지나 전반적으로 나쁜 표면조도를 나타냄으로 낮은 절삭깊이 사용을 피하여야 하며 특히 정삭가공 시에 이를 유의하여야 한다.

- ② 절삭 깊이가 일정(0.6mm) 이상에서는 절삭속도보다 이송속도가 표면거칠기에 더 많은 영향을 미치므로 이송속도를 크게 하지 않아야 한다.
- ③ 절삭조건이 나쁜 경우에 MQL 유량에 의한 표면거칠기의 영향을 파악하기 힘들므로 전반적으로 양호한 절삭 조건을 선정하여야 한다.
- ④ MQL의 유량이 표면거칠기에 유의수준 5%로 유의하나 그 영향이 다른 인자에 비해 상대적으로 크지 않으므로 MQL 유량은 적정량 사용해야 한다.
- ⑤ 절삭속도가 높을(160m/min 이상) 경우 기타 절삭조건에 따른 표면거칠기의 변동 폭이 줄어들므로 절삭속도를 높게 하는 것이 좋다.
- ⑥ Feed rate가 감소하면 표면거칠기는 점진적으로 양호해지는 일반적인 습식가공과 유사한 경향을 나타내므로 정삭 가공 시 이송속도를 작게 하여야 한다.
- ⑦ 절삭속도가 증가할수록 절삭깊이에 영향을 적게 받으며 보다 안정된 표면거칠기를 얻게 된다.

본 실험의 결과 steel의 MQL 선삭가공에서 표면거칠기의 품위를 높이기 위한 machining parameter의 사용에 최적의 영역이 있음을 알 수 있다. 절삭시간을 단축하는 경제적인 여건을 고려하여 MQL 유량 80~150ml/h, 절삭속도 220m/min, 이송속도 0.14mm/rev. 이하, 절삭깊이 0.6~1.2 mm의 가공 조건이 양호한 표면조도를 얻는 영역임을 결론지을 수 있다.

본 연구는 MQL 절삭가공에 초점을 맞추어 결론을 도출하였으나 절삭유를 충분히 사용하는 fluid cutting의 결과와 비교하는 것도 의의가 있으므로 이에 관한 실험과 연구를 향후 과제로 삼는다.

참고문헌

- [1] 고태조, 오명석, 박성호, 김희술; “선삭에서 절삭유 미립화 생성 메카니즘의 실험적검증”, 한국정밀공학 회지, 19(12) : 2002.
- [2] 박성현; 현대 실험계획법, 민영사, 2002.
- [3] 서남섭; 절삭 가공학, 동명사, 2002.
- [4] 이득우; “압축 냉각공기를 이용한 고속 볼엔드밀링의 가공 특성 평가”, 2003공작기계 및 가공기술세미나, 창원대학교 공작기계기술연구센터, 2004.
- [5] 조형찬, 정중윤, 이춘만; “MQL 절삭 가공을 이용한

- 표면거칠기 향상에 관한연구”, 한국산업경영시스템학회, 추계학술대회 논문집, 2004.
- [6] 황 준, 정의식, 황덕철; “환경 친화적 기계가공 기술에 관한 연구”, 한국정밀공학회지, 20(2) : 2003.
- [7] Degarmo, E. P., Black, J. T., and Kohser, R. A.; *Materials and Processes in Manufacturing*, 9th Edition, Wiley, 2002.
- [8] Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., and Mahiuddin A., “Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel,” *Journal of Materials Processing Technology*, 172(2) : 299-304, Feb., 2005.
- [9] Hou, X. Jung, J. Y., Moon, D. H., and Lee, C. M., “Turning Aluminum with MQL Machining,” 한국산업경영시스템학회, 추계학술대회 논문집, 2006.
- [10] Internet Web site, 미국 Occupational Safety and Health Administration[<http://www.osha.gov/>].
- [11] Internet Web site, 일본공업규격[<http://www.jisc.go.jp/>].
- [12] Klocke, F. and Eisenblatter, G., “Dry Cutting,” Keynote Paper, *Annals of CIRP*, 46(2), 1997.
- [13] Rahman, M., Senthil Kumar, A., and Salam, M. U., “Experimental Evaluation on the Effect of Minimal Quantities of Lubricant in Milling,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(5) : 539-547, April, 2002.