

# Al 6061 MQL 선삭가공에서 절삭력과 표면거칠기 예측에 관한 실험적 연구

황영국\*, 정원지\*\*, 이춘만#

## Experimental Study of Cutting Force and Surface Roughness Prediction in MQL Turning of Al 6061

Young Kug Hwang\*, Won Jee Chung\*\* and Choon Man Lee#

### ABSTRACT

Cooling lubricants are used in machining operations in order to reduce friction at the tool-chip and tool-workpiece interfaces, cool both chip and tool, and remove chip. Furthermore, they influence a strong effect on the shearing mechanisms and, consequently, on the machined surface quality and tool wear. However, several researchers state that the costs related to cutting fluids is frequently higher than those related to cutting tools. Moreover, the cooling lubricants cause an increase in both worker's health and social problems related to their use and correct disposal. Therefore, many researchers have focused on the environmentally conscious machining technologies. One of the technologies is known as MQL(Minimum Quantity Lubrication) machining. In this paper, an experimental model to obtain the optimal cutting conditions in MQL turning was suggested, and the effects of cutting conditions on surface roughness and cutting force were analyzed. For these purposes, FFD (Fractional Factorial Design) and RSM (Response Surface Methods) were used for the experiment. Cutting force and surface roughness with different cutting conditions were measured through the external cylindrical turning of Al 6061 based on the experiment plan. The measured data were analyzed by regression analysis and verification experiments with random conditions were conducted to confirm the suggested experimental model.

**Key Words** : MQL machining (MQL 가공), Optimum cutting conditions (최적 절삭조건), Surface roughness (표면거칠기), Cutting force (절삭력), Response surface methods (반응표면법)

### 1. 서론

기계가공분야에서 절삭유는 냉각작용, 윤활작용, 칩 처리작용에 의해 공구수명의 연장, 공작물

치수 정밀도 향상, 표면품질 개선 등의 장점으로 오랜 세월동안 사용되어왔다. 하지만 기계가공비에 있어서 유제 관련비용이 총 생산 비용의 7~17%를 차지하고, 절삭유 속에 포함되어 있는 극압 첨가제

☞ 접수일: 2008년 2월 12일; 게재승인일: 2008년 3월 27일

\* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

\*\* 창원대학교 기계설계공학과

# 교신저자: 창원대학교 기계설계공학과

E-mail: cmlee@sarim.changwon.ac.kr Tel. (055) 213-3622

에 의해 작업환경을 악화시키고 작업자의 건강을 해치는 등 환경 및 경제적으로 많은 문제점을 안고 있다.<sup>1,2</sup>

이에 따라 최근 환경 친화적인 생산가공기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 초기의 환경 친화형 생산가공기술은 경제성과 인체 유독성 등의 측면을 소홀히 취급하였으나, 현재는 이 둘을 동시에 고려한 광범위한 의미에서 환경 친화형 생산가공기술을 취급하고 있다. 즉 폐기량 극소화, 인체 유독성 극소화, 절삭유 극소화 등의 환경성 측면과 에너지 절감화, 생산능률 향상 등의 경제성 측면을 동시에 고려할 필요가 있다. 현재 연구 되고 있는 환경 친화형 생산가공기술을 절삭액의 사용량에서 분류하면 크게 드라이 가공(dry cutting)과 세미드라이 가공(semi-dry cutting)으로 분류된다.<sup>1,2</sup>

드라이 가공은 절삭유를 사용하지 않는 완전 건식가공으로 최근 많은 연구가 이루어지고 있고, 특정 분야에서 성공적인 결과가 보고되고 있다. 하지만 고능률 생산성과 표면품질 측면에서는 때때로 효과적이지 못하고, 엄격한 가공조건이 필요한 것으로 알려져 있다. 세미드라이 가공은 압축냉각기에 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.

이춘만 등<sup>3</sup>은 SM45C에 대해 MQL과 절삭유를 이용한 선삭가공을 수행하여 가공조건이 표면거칠기 및 절삭력에 미치는 영향을 분석하는 연구를 수행하였으며, 황준 등<sup>4</sup>은 선삭가공에서 절삭유 미립화와 환경영향 측면에서 환경 친화적 가공기술에 관한 연구를 수행하였다. 이종향 등<sup>5</sup>은 냉풍과 MQL을 이용한 선삭가공을 수행하여 SM45C에 대한 가공성을 비교하는 연구를 수행하였다. Dhar 등<sup>6</sup>은 AISI 1040의 선삭가공을 수행하여 표면거칠기, 칩 두께와 절삭력 측면에서 MQL 가공이 습식가공에 비해 효과적임을 발표했으며, Rahman 등<sup>7</sup>은 MQL과 절삭유를 이용한 밀링가공 실험을 통해 절삭력과 표면거칠기, 칩 형상 측면에서 MQL 가공의 환경적, 경제적 효용성에 대한 연구를 수행하였다.

상기에 보듯이 많은 연구자들이 가공환경에 따른 비교실험을 통해 MQL 가공의 경제적, 환경적 효용성에 대한 연구를 수행하였다. 하지만 MQL 가

공시 각 절삭인자들이 가공성(표면조도, 절삭력, 공구마모, 잔류응력 등)에 미치는 영향이나 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 연구는 미비한 실정이다. MQL 가공의 경우 특정 소재-공구 조합에 대한 최적의 절삭조건이나 각 절삭조건들이 가공성에 미치는 경향이 기존의 습식가공과 다를 수 있으므로 소재-공구 조합에 대한 가공 데이터의 축적은 대단히 중요하다. 아무리 좋은 가공법이라도 적절한 가공조건을 선정하지 못한다면 좋은 가공결과를 얻을 수 없기 때문이다.

본 연구는 MQL을 이용한 선삭가공에서 기 수행했던 SM45C 소재에 대한 연구에 이어 AI 6061소재에 대해 고찰하고자 한다. 기존의 연구결과<sup>3</sup>는 완전요인배치법을 사용하여 각 인자들과 특성치의 상관관계를 분산분석을 통해 고찰하고, MQL 가공과 습식가공의 효과를 비교 검증하는데 초점을 맞추었다. 본 연구에서는 요인선정실험과 최적화실험을 통한 단계적 최적화를 수행하여 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 실험식을 제시하고, 구축된 모델을 바탕으로 각각의 절삭조건과 MQL 공급환경의 조합에 따른 절삭력과 표면거칠기의 변화를 분석하는데 초점을 맞추었다. 이를 위해 일부실시법(FFD : fractional factorial design)과 반응표면법(RSM : response surface methods)을 이용하여 실험계획을 수립하고, 실험계획에 따라 AI 6061의 원통외경 선삭을 실시하여 여러 절삭조건과 MQL 공급환경의 변화에 따른 절삭력과 표면거칠기를 측정하였다. 측정된 데이터는 분산분석과 회귀분석을 이용하여 분석하였으며, 마지막으로 제시된 실험모델의 검증을 위해 임의조건에서의 검증실험을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

MQL을 이용한 선삭가공에서 MQL 공급환경 및 가공조건에 따른 가공특성을 분석하고, 최적의

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

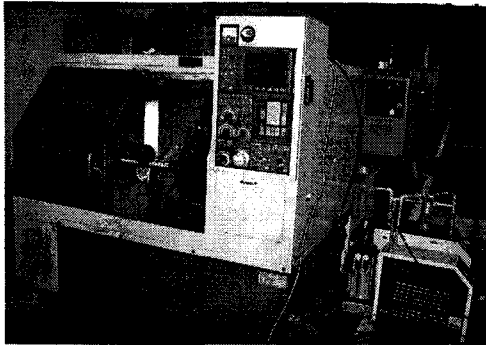


Fig. 1 Experiment equipments

절삭조건을 찾기 위해 Table 1과 같은 실험 장치를 사용하였다. 실험을 위해 Fig. 1과 같이 선반, MQL 공급장치, 공기 정화 장치, 컴프레서(compressor)로 가공시스템을 구성하였다. MQL 공급 장치는 독일 VOGEL사의 Vario UFV10-001로 세부사양은 Table 2와 같다.

### 2.2 시편 및 절삭공구

실험에 사용된 실험체는 Al 6061이며, 모든 실험은 초기 길이 155mm, 직경 60mm의 환봉을 Fig. 2와 같은 형상과 치수로 가공하여 사용하였다.

절삭공구는 노즈반경이 0.4mm, ISO 분류로 K10인 카바이드 인서트(CCGT 120404 FL\_TaeguTec)를 사용하였으며, 공구홀더는 외경 선삭용으로 옆날각(approach angle)과 앞날각(end cutting edge angle)이 각각 5° 이고 절입각(entering angle)은 95° 인 홀더를 사용하였다.

### 2.3 실험방법

MQL을 이용한 선삭가공에서 가공조건이 표면 거칠기 및 절삭력에 미치는 영향을 분석하기 위해 상용프로그램인 MINITAB을 이용하여 실험계획을 수립하고, 실험계획에 따라 원통외경 선삭을 실시하여 절삭력과 표면거칠기를 측정하였다.

실험배치는 특성치에 영향을 미치는 주 요인을 선별하기 위하여 요인선정실험을 통하여 일차적으

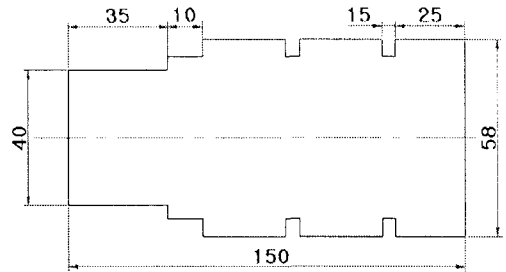


Fig. 2 Shape and dimensions of test specimen

Table 3 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

로 특성치에 큰 영향을 주는 주요 인자들을 선정 한 후 반응표면실험을 이용하여 절삭력과 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적 절삭조건을 선정하였다.

실험수행 시 MQL의 공급방향 및 거리에 따라 가공특성이 달라질 수 있다. 이에 MQL 공급방향과 공구마모 등의 상관관계에 대한 연구가<sup>9</sup> 진행되고 있으나 본 연구에서는 MQL 공급방향을 일반적으로 절삭유 사용 시 현장에서 주로 공급하는 방향인 경사면으로 고정하여 공급방향에 따른 차이를 고려하지 않았다. 모든 실험은 노즐과 공구선단 간의 거리를 15mm로 45° 방향에 경사면상에 공급하였다. MQL 공급장치에 사용된 절삭유는 LubriFluid F100으로 사양은 Table 3과 같다.

절삭력은 선반의 공구대 위에 공구를 장착한 공구동력계(9257B type\_Kistler)를 부착하여 주분력(principal cutting force)을 측정하였으며, 표면거칠기는 Mitutoyo사의 촉침식 표면조도기(Surfteft SV-624)를 이용하여 중심선 평균 거칠기(R<sub>a</sub>)를 측정하였다. 측정값은 임의로 정한 3곳의 표면거칠기값을 측정하여 그 값들의 평균을 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 요인선정실험

실험계획법을 이용하여 실험을 행하기 위해서는 특성치에 대한 각 인자들의 영향력을 분석하여

Table 2 Specification of MQL Supplier

Oil droplet size (μm)	Aerosol quantity (ml/h)	Air consumption (Nl/min)
0.5	5~150	140~300

Table 4 Experimental conditions for FFD

Process parameters	
Factors	Levels
Cutting speed [m/min]	300, 600
Feed rate [mm/rev]	0.2, 0.6
Depth of cut [mm]	1, 2
MQL supply	
Factors	Levels
Line length [m]	3, 10
Air pressure [bar]	4, 8
Nozzle diameter [mm]	2, 6

주요 인자를 선택할 필요가 있다. 본 실험에서는 요인선정을 위해 일반적으로 많이 사용하는 방법인 2 수준계의 일부실시법을 이용하였다.

### 3.1.1 요인선정실험 설계

실험 설계는 기 수행했던 실험결과와<sup>3</sup> 참고문헌을<sup>8</sup> 바탕으로 6개의 인자에 대해 분석도 VI의 1/2 일부실시법( $2^{6-1}_{III}$ )을 이용하였으며 특성치는 주분력과 표면거칠기로 하였다. Table 4에 실험에 사용된 인자와 수준을 나타내고 있다.

### 3.1.2 요인선정실험 분석

Table 5, 6은 주분력과 표면거칠기에 대한 분산분석결과를 나타낸다. 분석된 결과의 정도를 확인하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 측도인 결정계수(coefficient of determination)를 고찰하였으며,

그 결과 절삭력에 대해서는 99.6%, 표면거칠기에 대해서는 84.8%로 나타났다.

분산분석표에서 95%의 유의수준으로 볼 때 p값이 0.05보다 작으면 그 인자는 특성치에 유의한 것으로 볼 수 있다. 주분력에는 MQL 공급 라인 길이, 절삭속도, 회전당이송, 절삭깊이의 주효과와 MQL 공급 라인길이×절삭깊이, 회전당이송×절삭깊이의 교호효과가 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 표면거칠기에 주요한 영향을 미치는 인자는 공급 공기압, 회전당이송의 주효과와 MQL 공급 라인길이×절삭깊이, 노즐 직경×절삭깊이, 절삭속도×회전당이송, 회전당이송×절삭깊이의 교호효과로 나타났다.

공급 공기압의 경우 분산분석결과 주분력에는 주효과와 교호효과 모두 주요한 영향을 미치지 않고, 표면거칠기에는 주효과가 주요한 영향을 미치는 것으로 분석 되었으며 Fig. 3의 절삭력과 표면거칠기에 대한 주효과도를 살펴보면 공급공기압이 높을수록 절삭력과 표면거칠기가 줄어드는 일관된 경향을 확인할 수 있다. 일반적으로 교호효과가 존재하지 않고 주효과만이 특성치에 유의한 영향을 줄 경우 주효과가 고려한 특성치들에 대해 일관된 경향을 가진다면 그 주효과는 특성치에 가장 좋은 영향을 미치는 수준으로 고정할 수 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 공급공기압의 경우 8bar라는 고정인자로 선정하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서는 MQL 공급 라인 길이, 노즐 직경, 절삭속도, 회전당이송, 절삭깊이

Table 5 Result of ANOVA for principle cutting force

Term	Effect	Coef.	T	P
Line length	8.559	4.28	3.03	0.013
Air pressure	-2.259	-1.130	-0.80	0.442
Nozzle diameter	4.107	2.053	1.46	0.176
Cutting speed	-9.388	-4.694	-3.33	0.008
Feed rate	189.718	94.859	67.23	0.000
Depth of cut	126.599	63.300	44.86	0.000
Line length*Air pressure	4.946	2.473	1.75	0.110
Line length*Nozzle diameter	4.607	2.303	1.63	0.134
Line length*Cutting speed	1.077	0.538	0.38	0.711
Line length*Feed rate	4.896	2.448	1.73	0.113
Line length*Depth of cut	7.987	3.993	2.83	0.018
Air pressure*Nozzle diameter	3.818	1.909	1.35	0.206
Air pressure*Depth of cut	-2.607	-1.303	-0.92	0.377
Cutting speed*Depth of cut	-4.183	-2.092	-1.48	0.169
Feed rate*Depth of cut	60.396	30.198	21.40	0.000

Table 6 Result of ANOVA for Surface roughness

Term	Effect	Coef.	T	P
Line length	-2.06	-1.03	-1.34	0.200
Air pressure	-3.764	-1.882	-2.44	0.026
Nozzle diameter	-1.830	-0.915	-1.19	0.252
Cutting speed	0.385	0.192	0.25	0.806
Feed rate	7.83	3.915	5.08	0.000
Depth of cut	0.204	0.102	0.13	0.896
Line length*Nozzle diameter	-2.165	-1.083	-1.41	0.179
Line length*Depth of cut	-3.681	-1.841	-2.39	0.029
Air pressure*Cutting speed	1.669	0.834	1.08	0.295
Air pressure*Feed rate	-1.829	-0.914	-1.19	0.252
Air pressure*Depth of cut	-2.308	-1.154	-1.50	0.154
Nozzle diameter*Depth of cut	-3.931	-1.966	-2.55	0.021
Cutting speed*Feed rate	6.355	3.177	4.13	0.001
Cutting speed*Depth of cut	-2.221	-1.111	-1.44	0.169
Feed rate*Depth of cut	-6.111	-3.056	-3.97	0.001

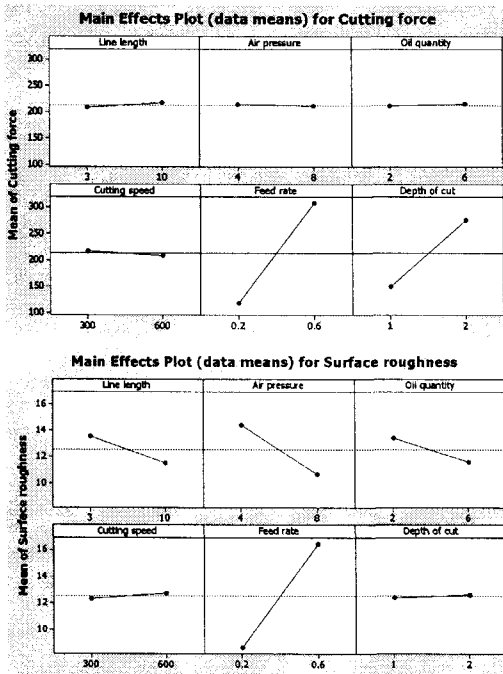


Fig. 3 Main effects plots for cutting force and surface roughness

의 5개 인자를 Al 6061 소재의 MQL 선삭가공 시 가공성에 영향을 미치는 제어인자로 선정하였다.

### 3.2 반응표면실험

반응표면 실험방법은 반응변수와 설명변수들 사이의 관계를 실험이나 시뮬레이션을 통하여 다항식으로 구한 다음 반응변수의 값을 최대 또는 최소로 하는 설명변수들의 수준조합을 찾아내는 것으로서 통계적으로 어떤 특성을 최적화하는 방법의 일종이다.<sup>10</sup>

Table 7 Experimental conditions for CCD

Process parameters	
Factors	Levels
Cutting speed [m/min]	62, 200, 300, 400, 533
Feed rate [mm/rev]	0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.44
Depth of cut [mm]	0.3, 1, 1.5, 2, 2.7
MQL supply	
Factors	Levels
Line length [m]	2, 5, 7.5, 10, 13
Nozzle diameter [mm]	0, 2, 4, 6, 10

본 실험에서는 일부실시법의 결과를 바탕으로 공급 공기압은 8bar로 고정시키고, MQL 공급 라인 길이, 노즐 직경, 절삭속도, 회전당이송, 절삭깊이의 5개 인자를 가변시켜 MQL 공급환경과 가공조건의 변화가 표면거칠기와 주분력에 미치는 영향을 규명하고, 최적의 절삭조건을 선정하기 위해 반응표면 실험을 수행하였다.

#### 3.2.1 반응표면실험 설계

반응표면실험 설계를 위하여 2차 모형의 제곱항들의 효율적인 추정이 가능하고, 실험계획의 바람직한 특성인 직교 블록화(orthogonal blocking) 및 회전성(rotatability)의 구현이 용이한 중심합성법(CCD : central composite design)을 사용하였다.<sup>10</sup> 중심합성법에는 Cube모형과 Axial모형이 있으며 본 실험에서는 축점(axial point, 10개), 중심점(center point, 10개), 2<sup>k</sup> 요인실험점(cube point, 32개)을 갖는 Cube모형으로 5개의 인자에 대해 회전성을 만족하는  $\alpha$  값 2.378로 상용소프트웨어인 MINITAB을 사용하여 설계하였다. 인자의 수준은 공구회사의 추천절삭조건과<sup>8</sup> 요인선정실험결과를 참조하여 선정하였다. Table 7은 반응표면실험에 사용된 인자와 수준을 보여주고 있다.

#### 3.2.2 반응표면실험 분석

실험 결과를 이용하여 반응표면 모형을 구축한 후, 모형 적합(model fitting)을 이용하여 반응 값에 대한 2차 다항 모형의 추정식을 구하였다. 반응표면 모형의 구축 및 회귀식 추정을 위해 모든 인자에 대한 반응표면 형태를 고려하는 완전 2차 다항 모형으로 예측모형을 설정하여 구한 후 간차분석과 결정계수를 이용하여 선택한 회귀모형의 적합여부를 판정하였다. 선택한 모형이 적합하지 않을 경우는 분산분석표에서 유의하지 않은 항들을 풀링(pooling)시키는 반응표면 모형 축소를 통하여 모형을 다시 구축하고 최종적으로 회귀식을 추정하였다.

MQL 선삭가공시 주분력에 대한 반응표면 모형은 유의하지 않은 것으로 나타난 MQL 공급 라인 길이×절삭속도, 노즐직경×절삭속도, 노즐직경×회전당이송의 교호효과와 노즐직경, 회전당이송, 절삭깊이의 제곱항을 풀링시켜 구하였다. 이때 간차분석결과 정규분포를 잘 따르고, 결정계수가 98.6%로 선택한 회귀모형은 적합한 것으로 판단된다.

구축된 회귀모형으로부터 Al 6061의 MQL 선삭 가공 시 MQL 공급 라인길이, 노즐직경, 절삭속도, 회전당이송, 절삭깊이의 조합에 따른 주분력을 예측할 수 있는 실험식을 식 (1)과 같이 구하였다.

$$F_p = -5.055L + 5.761N + 0.045C + 63.710f + 11.180D + 0.19L^2 + 0.0001C^2 - 0.434LN + 6.988Lf + 1.833LD - 1.622ND - 0.349Cf - 0.045CD + 321.938fD \quad (1)$$

여기서  $F_p$ 는 주분력, L은 MQL 공급 라인길이, N은 노즐직경, C는 절삭속도, f는 이송속도, D는 절삭깊이를 나타내며, 각 항의 단위는 Table 4에 표시된 것과 같다.

MQL 선삭가공시 표면거칠기에 대한 반응표면 모형은 유의하지 않은 것으로 나타난 MQL 공급 라인길이×노즐직경, MQL 공급 라인길이×절삭속도, 노즐직경×절삭속도, 노즐직경×절삭깊이, 절삭속도×회전당이송, 절삭속도×절삭깊이의 교호효과와 노즐직경, 절삭속도, 절삭깊이의 제곱항을 풀링시켜 구하였다. 이때 잔차분석결과 정규분포를 잘 따르고, 결정계수가 98.2%로 선택한 회귀모형은 적합한 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 고려한 소재-공구 조합의 MQL 선삭가공시 MQL 공급 라인길이, 노즐직경, 절삭속도, 회전당이송, 절삭깊이에 따른 표면거칠기를 예측할 수 있는 실험식을 식 (2)와 같이 구하였다.

$$R_a = -0.129 + 0.151L - 0.041N + 12.025f - 0.634D - 0.017L^2 + 12.115f^2 + 0.383Lf + 0.053LD + 0.309Nf + 1.463fD \quad (2)$$

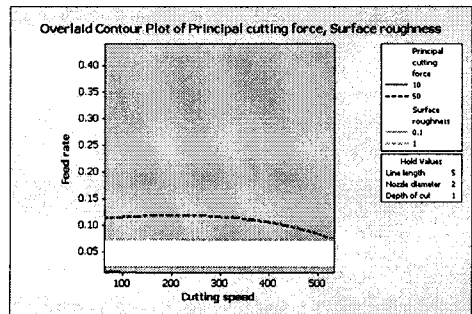
### 3.2.3 최적 조건 선정

추정한 실험식을 이용하여 MQL 선삭가공에서 원하는 가공성을 만족할 수 있는 MQL 공급환경 및 가공조건의 조합을 구하기 위해 중첩 등고선도 (overlaid plot)를 이용하여 주분력과 표면거칠기가 특정 수준을 만족하는 가공조건의 범위를 구하였다. 중첩 등고선도 방법은 다수의 반응변수에 대한 개별적인 등고선을 겹쳐보는 방법으로 어떤 반응변수에 관한 최적조건이 다른 반응변수에 관해서는 최적에서 멀리 떨어져 있을 수 있음을 시각적으로 보여준다.

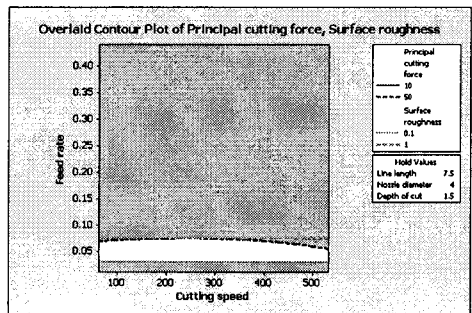
Fig. 4는 MQL 공급 라인길이, 노즐직경과 절삭깊이가 특정 수준으로 고정되고 절삭속도와 회전당

이송이 변할 때 주분력 50N, 표면거칠기  $1\mu\text{m}$  이하를 만족하는 절삭조건의 범위를 나타내고 있다. (a)에서 (c)조건의 조합으로 갈수록 제한된 조건을 만족하는 가공조건의 범위가 줄어들어 가는 것으로 나타났다.

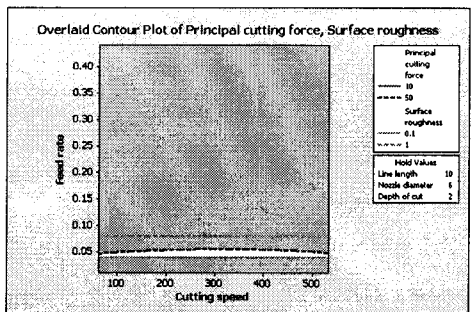
Fig. 5는 MQL 공급 라인길이, 노즐직경과 회전당이송이 특정 수준으로 고정되고 절삭속도와 절삭깊이가 변할 때 Fig. 4의 제한 조건과 동일한 결과를 만족하는 절삭조건의 범위를 나타내고 있다. 분석결과 제한된 주분력을 만족하는 가공조건의 조합은 존재하지만 표면거칠기를 만족시키는 가공조건



(a) Line length: 5m, Nozzle diameter: 2mm, Depth of cut: 1mm



(b) Line length: 7.5m, Nozzle diameter: 4mm, Depth of cut: 1.5mm



(c) Line length: 10m, Nozzle diameter: 6mm, Depth of cut: 2mm

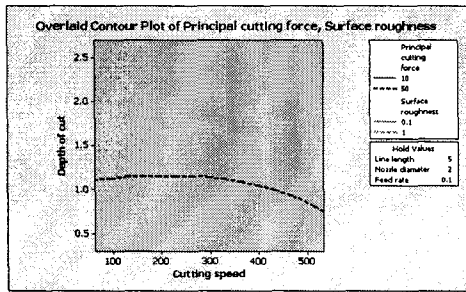
Fig. 4 Overlaid plot according to cutting speed, feed rate

의 조합은 존재하지 않는 것으로 나타났다. 여기서 표면거칠기를 만족하는 가공조건의 조합이 존재하지 않는 것은 고정된 회전당이송의 범위를 0.1mm/rev 이상으로 하였기 때문으로 판단된다.

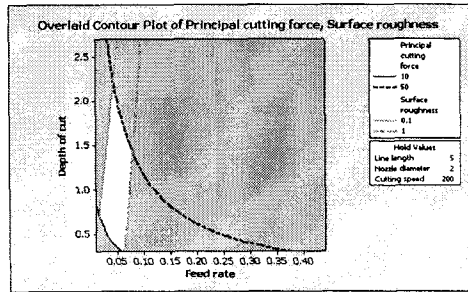
Fig. 6은 MQL 공급 라인길이, 노즐직경과 절삭속도가 특정 수준으로 고정되고 회전당이송과 절삭깊이가 변할 때 주분력 50N, 표면거칠기 1 $\mu$ m이하를 만족하는 절삭조건을 나타내고 있다.

이상의 결과로부터 Fig. 4, 6의 경우는 제한된 주분력과 표면거칠기의 조건을 만족하는 가공조건의 조합이 존재하나 Fig. 5의 경우는 존재하지 않는

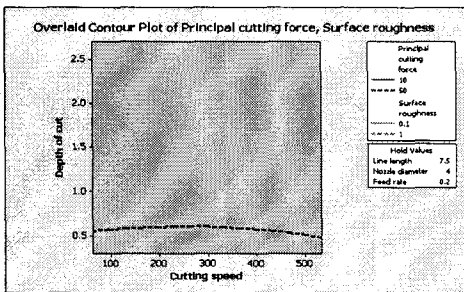
것으로 나타났다. 일반적인 가공작업에서는 가공기의 사양이나 공장의 환경 등으로 인해 특정 조건을 고정해야하거나 변경시킬 수 없는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 Fig. 4, 5, 6의 결과와 같이 인자들의 특정 수준 조합에 따라 주분력과 표면거칠기가 크게달라지고, 특정 조합에서는 원하는 결과를 얻을 수 없으므로 각 가공작업의 허용 범위 내에서 원하는결과를 얻을 수 있는 인자들의 수준조합을 선택하는 것은 대단히 중요하다. 또한 원하는 품질의 가공품을 얻을 수 있는 가공 조건의 조합 중에서도 생산성을 극대화 시킬 수 있는 조건의 조합이



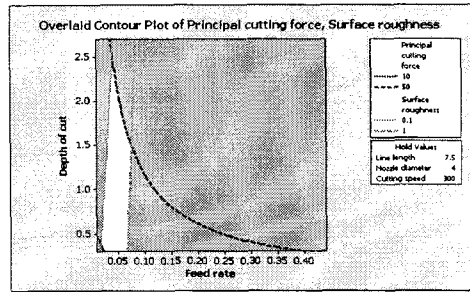
(a) Line length:5m, Nozzle diameter:2mm, Feed rate:0.1mm/rev



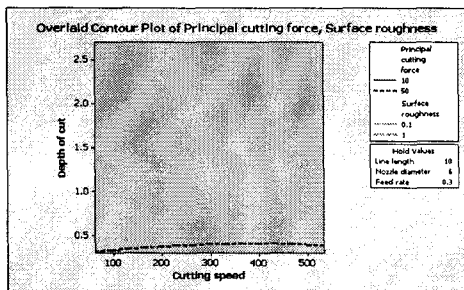
(a) Line length:5m, Nozzle diameter:2mm, cutting speed:200m/min



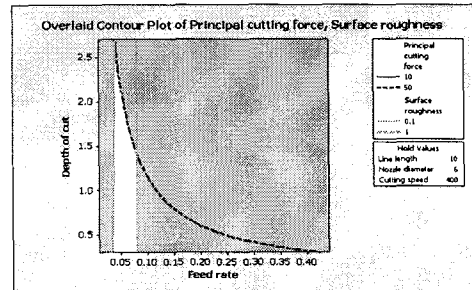
(b) Line length:7.5m, Nozzle diameter:4mm, Feed rate:0.2mm/rev



(b) Line length:7.5m, Nozzle diameter:4mm, cutting speed:300m/min



(c) Line length:10m, Nozzle diameter:6mm, Feed rate:0.3mm/rev  
Fig. 5 Overlaid plot according to cutting speed, depth of cut



(c) Line length:10m, Nozzle diameter:6mm, cutting speed:400m/min  
Fig. 6 Overlaid plot according to feed rate, depth of cut

Table 8 Cutting conditions of verification experiment

Run order	Line length [m]	Nozzle diameter [mm]	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]
1	5	4	250	0.15	0.8
2	5	4	150	0.08	1.2
3	5	4	330	0.18	2.2
4	7.5	6	120	0.12	0.6
5	7.5	6	80	0.05	1.2
6	7.5	6	270	0.12	0.4

유리하다.

본 연구에서 고려한 소재-공구 조합에 대해 고려한 가공조건의 범위 내에서는 제시된 실험식을 바탕으로 한 중첩 등고선도 방법을 이용하여 각각의 가공작업환경을 고려하면서 원하는 가공결과를 얻을 수 있는 인자들의 최적 수준 조합을 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 검증 실험

추정한 회귀 모형에 의한 실험식의 정확성과 회귀 모형 추정에 사용된 실험값의 정확성을 검증하기 위해 검증 실험을 수행하였다. 검증 실험은 임의로 선정한 6가지 가공조건에 대해 실험을 수행하여 본 연구에서 제시한 실험식에 의한 예측값과 실험값의 차이를 비교하였다. 임의로 선정한 가공조건은 Table 8과 같으며 정밀한 측정결과를 위해 실험은 각각의 실험조건에 대해 2회 반복 하였다.

#### 3.3.1 검증 실험 결과

Fig. 7은 검증실험 및 본 논문에서 제시한 식에 의한 결과를 그래프로 나타낸 것이며 Table 9는 실험값과 예측값의 오차를 나타내고 있다.

주분력의 경우 4번 실험조건을 제외한 전 실험조건에 대해 오차 10% 이내로 실험결과와 예측 값이 잘 일치하고, 그 경향 또한 동일하여 추정한 회귀모형에 의해 제시한 식이 잘 맞음을 확인할 수 있다. 표면거칠기의 경우는 전 실험조건에 대해 예측 값이 실험값에 비해 조금 높게 나타났으며, 절삭력의 경우에 비해 예측값과 실험값의 오차가 크게 나타났다. 그러나 가공조건의 변화에 따른 실험값과 예측값의 변화가 전체적으로 동일한 경향을 보이므로 제시된 실험식을 이용하여 선정된 가공조건들의 조합에 대한 표면거칠기의 대략적인 경향을

파악하는 데에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 즉 표면거칠기식은 정확한 값의 예측이 아닌 경향을 파악하는데 한정적으로 사용해야할 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서 고려한 소재-공구 조합에 대해 제시한 주분력과 표면거칠기식은 논문에서 고려한 가공조건의 범위 내에서는 타당한 것으로 판단되며, 선정된 가공조건에 대한 사전 검증 및 절삭력과 표면거칠기 측면에서 최적 가공조건을 선정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

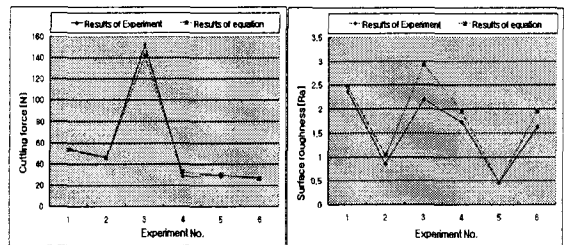


Fig. 7 Comparison plots for verification experiment and suggested equation results

Table 9 Results of verification experiment

Run order	Principal cutting force [N]		Error [%]	Surface roughness [ $\mu\text{m}$ ]		Error [%]
	Exp.	Prediction		Exp.	Prediction	
1	54.2	53.8	0.74	2.37	2.47	4.05
2	46.5	46.0	1.09	0.85	1.03	17.47
3	152.1	141.9	7.19	2.20	2.93	24.91
4	28.8	32.6	11.66	1.73	1.95	11.28
5	29.5	29.7	0.67	0.47	0.47	0
6	27.5	26.5	3.77	1.63	1.96	16.84

## 4. 결론

본 연구는 MQL을 이용한 선삭가공에서 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 실험식을 제시하고, 구축된 모델을 바탕으로 각각의 절삭조건과 MQL 공급환경의 조합에 따른 주분력과 표면거칠기의 변화를 분석하고자 하였다. 본 실험에서 수행한 가공조건 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $2\frac{1}{2}^1$ 형 일부실험실 실험을 통해 MQL 선삭가공시 주분력과 표면거칠기에 영향을 미치는 인자를 선정하였다.
2. 반응표면법을 이용하여 MQL 공급환경과 가



공조건에 따라 주분력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 실험식을 제시하였다.

3. 증첩 등고선도 방법을 이용하여 주분력과 표면거칠기가 특정 범위를 만족하는 MQL 공급환경 및 가공조건의 조합을 제시하였다.

4. 검증실험을 통해 제시된 실험식의 정확성을 검증하였으며, 검증 실험 결과 제시된 식은 본 연구에서 고려된 가공조건의 범위 내에서 가공조건에 대한 사전 검증 및 주분력과 표면거칠기 측면에서 최적 가공조건을 선정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

이 논문은 2007년도 창원대학교 연구비와 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Lee, K. H. and 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, 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.
5. 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.
6. 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, Issue 1, pp. 93-99, 2006.
7. Rahman, M., Senthil Kumar, A. and Salam, M. U., "Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling," *IJMTM*, Vol. 42, Issue 5, pp. 539-547, 2002.
8. TaeguTec, "Catalogue-Turning Application," TaeguTec, pp. 79-82, 2003.
9. Attanasio, A., Gelfi, M., Giardini, C. and Remino, C., "Minimal quantity lubrication in turning : Effect on tool wear," *Wear*, Vol. 260, Issue 3, pp. 333-338, 2006.
10. Park, S. H., "Design of Experiments," *Minyoungsa*, pp. 305-329, 2005.