

반응표면분석을 이용한 MQL 밀링가공의 최적절삭조건에 관한 연구

A Study on Optimal Cutting Conditions of MQL Milling Using Response Surface Analysis

이지형¹, ✉고태조², 백대균²
 Ji Hyung Lee¹, ✉Tae Jo Ko² and Dae Gyun Baek²

¹ 영남대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Yeungnam Univ.)

² 영남대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: tjko@yu.ac.kr, Tel: 053-810-2576

Manuscript received: 2008.3.26 / Revised: 2008.9.26 / Accepted: 2008.10.14

Semi dry cutting known as MQL (Minimum Quantity Lubrication) machining is widely spreaded into the machining shops nowadays. The objective of this research is to suggest how to derive optimum cutting conditions for the milling process in MQL machining. To reach these goals, a bunch of finish milling experiments was carried out while varying cutting speed, feed rate, oil quantity, depth of cut and so on with MQL. Then, response surface analysis was introduced for the variance analysis and the regression model with the experimental data. Finally, desirability function based on regression model was used to obtain optimal cutting parameters and verification experiment was done.

Key Words: MQL Machining (MQL 가공), Response Surface Analysis (반응표면분석), Central Composite Design(중심합성계획법), Desirability Function (만족도 함수)

1. 서론

산업사회의 급속한 발전은 환경이라는 또 다른 문제를 제시하고 있다. 산업현장에서는 생산제조 단계에서부터 가공물 폐기단계까지 인체에 유해한 물질의 발생을 억제 하거나 최소화하기 위한 예방 기술의 개발이 시급히 요구되고 있다.

일반적으로 절삭가공은 칩의 원활한 배출, 공작물과 공구의 냉각, 공구와 칩 사이의 윤활, 가공된 공작물의 표면 거칠기 확보를 위하여 절삭유가 사용된다. 절삭유는 비산 또는 누설에 의해서 작업환경을 악화시키며, 장기간 사용 시 부패 및 세균번식에 의한 악취, 작업자의 피부질환 등을 유

발시킨다.¹ 기존의 절삭유는 윤활성능을 높이기 위해 염소, 유황, 인 등의 극압 첨가제가 포함되어 있다. 이 극압 첨가제는 인체에 해로운 유독성 물질이며, 특히 염소화합물을 소각하면 발암성 유해물질인 다이옥신이 발생한다. 또한 절삭유에 부착된 칩이나 폐기물 등이 소각되거나 가공 중 절삭열에 의해서도 다이옥신이 발생될 수 있기 때문에 환경에 끼치는 영향은 매우 크다.^{2,4}

한편, 환경에 관한 국제규격 ISO14000 에서 작업환경에 대한 규제가 강화됨에 따라 절삭유 처리에 관한 관심이 증가하고 있고, 이에 따라서 설비 및 유지관리와 관련한 비용이 증가하고 있다. 이러한 절삭유 관리 비용은 총생산 비용의 7~17%가

되며, 공구 비용에 비해 4 배 이상이 든다는 통계도 발표되었다.^{5,6}

이상과 같은 이유로 생산현장에서는 환경친화적인 가공이 늘어나는 추세이다. 환경 친화적 가공기술은 크게 나누어 건식 가공(Dry Cutting), 반건식가공(Semi-Dry Cutting)으로 나눌 수 있다. 건식가공은 절삭유를 사용하지 않는 순수한 건식가공으로서 주로 코팅공구, 세라믹 공구 등이 사용된다.⁷

반건식 가공은 -30℃의 압축냉각공기에 의한 가공(냉풍가공)과 환경 친화적인 식물성 오일을 미세입자(Mist)로 만들어 아주 적은 미량을 이용하는 극미량절삭유(MQL: Minimum Quantity Lubrication)에 의한 가공, 그리고 이들 두 가지가 함께 이용되는 가공방법들이 있다.⁸

이 중에서 MQL 가공기술은 기체를 반송매체로 하여 안개상 유회액을 날 끝에 도포하는 방법의 총칭이다. 이러한 가공은 1994 년경 독일에서 개발된 기술로 절삭점을 냉각시키기보다는 유회에 의해 공구와 칩 사이의 마찰열을 감소시키고 표면 거칠기를 향상시킬 목적으로 개발되었다.⁹

본 연구에서는 MQL 밀링가공에서 절삭성의 관점에서 최적의 절삭조건을 선정하는 한가지 방법을 제안하고자 한다. 이러한 목적으로 반응 표면분석법의 하나인 중심합성법을 이용하여 실험을 계획하며, 실험을 통하여 얻은 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모 데이터를 바탕으로 반응표면분석을 이용하여 최적의 절삭조건을 규명하고자 한다.

2. 실험계획법

실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것이다.¹⁰ 즉, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의한다. 이러한 방법으로는 요인배치법, 분할법, 교락법, Taguchi 실험계획법, 반응표면계획법 등이 있다. 이 중에서 반응표면계획법은 통계적 분석방법의 하나인 반응표면분석을 염두에 두고 데이터 수집계획을 세울 때 사용되는 실험계획법으로 중심합성계획법, 회전계획법, 심플렉스법 등이 여기에 속한다.

반응표면분석법은 여러 개의 입력변수(설명변수) x_1, x_2, \dots, x_k 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 출

력변수(반응변수)¹¹에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.¹¹

반응표면분석법에서는 입력변수 변화에 따른 출력변수 값의 변화, 입력변수에 대한 출력변수의 최적화, 적은 수의 실험으로 추정되는 반응표면을 얻는 과정을 통해 반응표면분석을 실시한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에서는 탄소강인 SM45C 재료와 무코팅 고속도공구강 2 날, 직경 10mm 평엔드밀 (한국 OSG(주))의 공구를 이용하여 머시닝센터에서 실험을 실시하였다. (Table 1) MQL 가공은 공기 압축기에서 생성된 공기를 공기필터를 이용하여 수분을 제거한 후 MQL 공급 장치에 공급하고 MQL 공급 장치에서 생성된 미세입자를 주축 외부로 통해서 절삭점에 공급하게 된다. (Fig. 1)

Table 1 Instruments and specification

Instrument	Specification	Company
Machining center	ACE-45V	Daewoo
Oil mist generator	1005	With industry
Tool dynamometer	9257B	Kistler
Charge amplifier	5019B	Kistler
Data acquisition	DT-9816A	Data translation
Microscope		Mitutoyo
Surface roughness measurement	301	Mitutoyo

3.2 실험계획

본 실험에서는 실험인자로서 절삭성에 가장 많은 영향을 미치는 주축속도, 이송속도, 절입깊이(반경방향), 유회유량의 4 인자를 선택하여 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모에 미치는 인자의 영향에 대한 반응을 규명하기 위하여 반응표면 실험을 수행하였다.

반응표면실험 설계를 위하여 본 연구에서는 중심합성법을 사용하였다. 중심합성법에는 Cube 모형과 Axial 모형이 있으며 본 실험에서는 축 점(axial

Table 2 Level of factors

level	Spindle speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	DOC (mm)	Lubrication (cc/hour)
2	1200	100	0.2	2
1	1400	150	0.4	6
0	1600	200	0.6	10
-1	1800	250	0.8	14
-2	2000	300	1.0	18

point), 중심점(center point), 요인 실험점(cube point)을 갖는 Cube 모형으로 설계하여 총 27 회 실험하였다.

Table 2 는 중심합성법에서 필요한 독립변수의 수준을 나타낸다. 독립변수의 수준은 절삭공구 회사에서 추천하는 추천 절삭조건을 중심으로 정하고 수준을 정하였다.

MQL 가공방식에 사용된 절삭유는 Blaser swisslube 사의 식물성 절삭유중 비수용성 절삭유로서 인체에 무해한 절삭유를 사용하였다. 절삭유의 세부사항은 Table 4 와 같다.

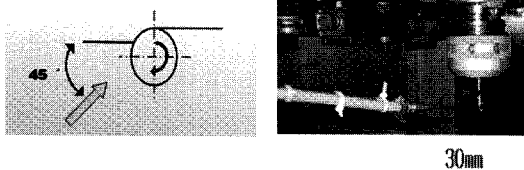


Fig. 1 Injection direction and nozzle set-up

MQL 가공에서는 MQL 의 분사방향에 따라 가공 특성이 달라 질 수가 있다. 따라서 본 실험에서는 사전 실험을 통하여 분사 각도와 Nozzle 과 절삭점간의 거리를 결정한 후 실험을 실시하였다. MQL 미스트 노즐 분사각은 45° 로 Fig. 1 과 같이 공급하였으며, 노즐과 절삭점간의 거리는 30mm 로 실험을 실시하였다.

Table 3 Fixed experimental conditions

Air pressure	6Bar
Nozzle diameter	10mm
Distance to cutting point	30mm
Injection direction	45°
Axial depth of cut	7mm

Table 4 Specification of MQL lubrication

Type	Base	Density at +20°C (g/cm ³)	Flash point (°C)	pH value
Vascomill	Vegetable oil	0.95	180	8.6 - 9.0

Table 5 Design of experiment and results

No.	rpm	Feed rate (mm/min)	DOC (mm)	Lubrication (cc/hour)	Cutting force [N]	Roughness [μm]	Tool wear [mm]
1	1400	150	0.4	6	125.82	4.123	0.283
2	1400	150	0.4	14	113.66	5.315	0.302
3	1400	150	0.8	6	188.37	3.988	0.195
4	1400	150	0.8	14	167.21	5.598	0.236
5	1400	250	0.4	6	225.37	4.341	0.316
6	1400	250	0.4	14	194.04	5.794	0.334
7	1400	250	0.8	6	314.81	5.063	0.224
8	1400	250	0.8	14	272.68	6.714	0.306
9	1800	150	0.4	6	116.23	3.860	0.277
10	1800	150	0.4	14	122.43	4.440	0.292
11	1800	150	0.8	6	171.79	3.617	0.182
12	1800	150	0.8	14	166.78	4.696	0.219
13	1800	250	0.4	6	204.62	4.123	0.294
14	1800	250	0.4	14	186.42	4.376	0.298
15	1800	250	0.8	6	287.72	5.026	0.194
16	1800	250	0.8	14	258.64	6.288	0.284
17	1200	200	0.6	10	224.13	4.205	0.217
18	2000	200	0.6	10	184.38	5.938	0.291
19	1600	100	0.6	10	128.52	5.111	0.316
20	1600	300	0.6	10	264.78	5.612	0.188
21	1600	200	0.2	10	87.36	2.954	0.198
22	1600	200	1	10	281.31	5.132	0.269
23	1600	200	0.6	2	204.54	5.493	0.268
24	1600	200	0.6	18	184.40	3.983	0.236
25	1600	200	0.6	10	192.65	4.644	0.254
26	1600	200	0.6	10	193.19	4.740	0.262
27	1600	200	0.6	10	192.82	4.755	0.258

또한, 본 실험 시 고정되는 실험조건들은 Table 4 에 나타내었다. MQL 밀링 절삭가공 실험의 측정 대상은 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모이다. 실험 방법은 HSS 엔드밀을 이용하여 측면절삭을 각 실험조건별로 총 12m 의 길이를 가공하며, 실험 결과 값의 측정은 2m 간격으로 측정을 하였다.

3.3 실험결과

Table 5 는 요인 실험점(16 회), 축 점(8 회), 중심 점(3 회)의 총 27 회의 실험조건과 실험결과 값을 나타내었다. 절삭력과 표면 거칠기의 결과 값은 초기 400mm 의 가공 중 4 번의 측정을 한 데이터의 평균값이며, 공구마모의 결과 값은 12m 가공지점에 대한 값이다.

4. 실험결과 분석

4.1 반응표면분석

반응표면실험의 분석을 위해 통계 분석 프로그램인 MINITAB 을 사용하였다. Table 5 의 실험 결과를 이용하여 반응표면 모형을 구축한 후, 모형 적합(model fitting)을 이용하여 반응값에 대한 2 차 다항모형의 추정식을 구하였다.

반응표면 모형의 구축 및 회귀식 추정을 위해 모든 인자에 대한 반응표면 형태를 고려하는 Full quadratic 형으로 예측모형을 설정하여 구한 후 잔차 분석과 분산분석표의 적합성 결과, 결정계수를 이용하여 선택한 회귀모형의 적합여부를 판정하였다.

4.1.1 절삭력

MQL 밀링 가공 시 절삭력에 대한 반응표면 모형의 적합성을 판단하기 위해서 분산분석을 이용하여 모형의 적합성을 판단하였다. Table 6 은 절삭력에 대한 분산분석의 결과 값을, Fig. 2 는 잔차 분석 그래프를 나타낸 것이다.

실험을 통해 얻어진 절삭력으로 분산분석 결과는 결정계수가 0.998 로 나타나 분석을 통하여 얻어진 회귀식이 99.8%의 설명력을 가짐으로 회귀모형의 구축이 잘 이루어졌다고 판단되어지며 적합결여에 대한 유의 확률도 0.057 로써 0.05 보다 크므로 선택한 회귀모형은 적합하다고 판단되어진다. 결정계수(R^2)는 회귀식이 갖는 설명력의 효율성을 비교하기 위해 사용되는 통계량이다. 결정계수는 개념상 평균에서 회귀선까지의 거리와 평균

Table 6 ANOVA table for cutting force

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	89534.6	89534.6	6395.33	5924.2	0.00
Linear	4	87277.4	1837.54	459.38	425.54	0.00
Square	4	533.7	533.66	133.41	123.59	0.00
Interaction	6	1723.62	1723.62	287.27	266.11	0.00
Residual Error	DF	13.0	12.95	1.08		
Lack of Fit	10	12.8	12.80	1.28	16.79	0.057
Pure Error	2	0.2	0.15	0.076		
Total	26	89547.6				

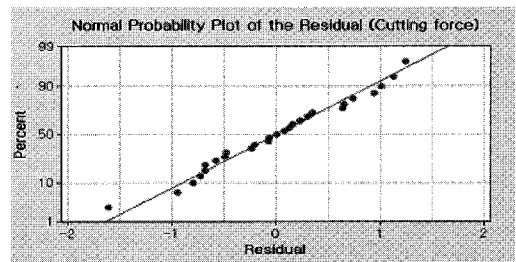


Fig. 2 Normal probability plot of the residuals for cutting force

에서 관측점까지의 거리의 비율로 설명할 수 있으므로 0 과 1 사이의 값을 가진다. 결정계수가 1 에 가까울수록 회귀식의 설명력은 높아지며 0 에 가까울수록 회귀식의 설명력은 낮아진다. 일반적으로 결정계수가 0.3 이상이면 유의미한 것으로 판단하며 최초 연구일 경우 독립변수 도출의 어려움을 고려하여 0.15 까지도 유의미한 연구로 판단하는 경향이 있다.

위의 분석결과로부터 MQL 밀링 가공 시 주축 회전수, 이송속도, 절삭 깊이, 윤활유량에 따른 절삭력을 나타내는 2 차 다항식을 최소자승법으로 나타내었다.

$$F = 84.109 - 0.195r + 0.612f + 450.358d - 5.268l - 67.940dd + 0.029ll - 0.137rd + 0.005rl + 0.665fd - 0.009fl - 3.959dl$$

위 식에서의 F =Cutting force, r =rpm, f =Feed rate, d =DOC (radial), l =Lubrication quantity 이다.

4.1.2 표면거칠기

MQL 밀링 가공 시 표면 거칠기에 대한 반응 표면 모형의 적합성을 판단하기 위해서 분산분석을 이용하여 모형의 적합성을 판단하였다. Table 7 은 표면 거칠기에 대한 분산분석의 결과 값을, Fig. 3 은 잔차 분석 그래프를 나타낸 것이다.

실험을 통해 얻어진 표면 거칠기로 분산분석 결과로 결정계수가 0.927 로 나타나 분석을 통하여 얻어진 회귀식이 92.7%의 설명력을 가짐으로 회귀 모형의 구축이 잘 이루어졌다고 판단되어지며 적합결여에 대한 유의 확률도 0.054 이므로 선택한 회귀모형은 적합하다고 판단되어 진다.

위의 분석결과로부터 MQL 밀링 가공 시 주축 회전수, 이송속도, 절삭 깊이, 윤활유량에 따른 표면 거칠기를 나타내는 2 차 다항식을 최소자승법으로 나타내었다.

$$R_a = 11.524 - 0.0056r - 0.0627f + 1.034d + 0.692l + 0.001ff - 4.0557dd + 0.0007ll + 0.0002rd - 0.0002rd + 0.00268fd + 0.00003fl + 0.0244dl \quad (2)$$

Table 7 ANOVA table for surface roughness

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	18.7236	18.7236	1.3374	24.66	0.000
Linear	4	14.7819	1.50324	0.3758	6.93	0.004
Square	4	1.9649	1.96488	0.4912	9.06	0.001
Interaction	6	1.9769	1.97691	0.3294	6.07	0.004
Residual Error	DF	0.6509	0.65093	0.0542		
Lack of Fit	10	0.6437	0.64368	0.0643	17.75	0.054
Pure Error	2	0.0073	0.00725	0.0036		
Total	26	19.3746				

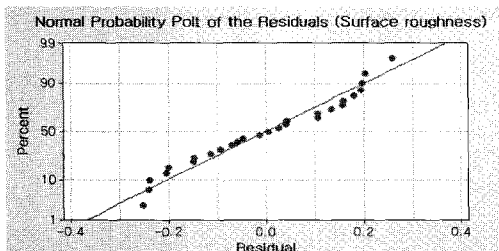


Fig. 3 Normal probability plot of the residuals for surface roughness

위 식에서의 R_a =surface roughness, r =rpm, f =Feed rate, d =DOC(Radial), l =Lubrication quantity 이다.

4.1.3 공구마모

MQL 밀링 가공 시 공구마모에 대한 반응표면 모형의 적합성을 판단하기 위해서 분산분석을 이용하여 모형의 적합성을 판단하였다. Table 8 은 공구마모에 대한 분산분석의 결과 값을, Fig. 4 는 잔차 분석 그래프를 나타낸 것이다.

실험을 통해 얻어진 공구마모 데이터로 분산분석 결과로 결정계수가 0.899 로 나타나 분석을 통하여 얻어진 회귀식이 89.9%의 설명력을 가짐으로 회귀 모형의 구축이 잘 이루어졌다고 판단되어지며 적합결여에 대한 유의 확률도 0.065 이므로 선택한 회귀모형은 적합하다고 판단되어진다. 위의 분석 결과로부터 MQL 밀링가공 시 주축회전수, 이송속도, 절삭 깊이, 윤활유량에 따른 표면 거칠기를 나타내는 2 차 다항식을 최소자승법으로 나타내었다.

Table 8 ANOVA table for tool wear

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.04903	0.04903	0.003502	17.47	0.000
Linear	4	0.04494	0.00321	0.000805	4.01	0.027
Square	4	0.00056	0.00056	0.000140	0.70	0.608
Interaction	6	0.00352	0.00352	0.000588	2.93	0.053
Residual Error	DF	0.00240	0.00240	0.000200		
Lack of Fit	10	0.00237	0.00237	0.000237	14.84	0.065
Pure Error	2	0.00003	0.00003	0.000016		
Total	26	0.05144				

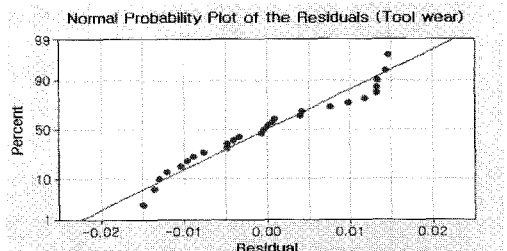


Fig. 4 Normal probability plot of the residuals for tool wear

$$T_w = 0.854057 - 0.000359r - 0.003132f - 0.081042d + 0.001318ll - 0.082812dd + 0.000128rd + 0.00055fd - 0.005dl \quad (3)$$

위 식에서의 $T_w=Tool\ wear$, $r=rpm$, $f=Feed\ rate$, $d=DOC(Radial)$, $l=Lubrication\ quantity$ 이다.

4.2 최적절삭조건

추정된 회귀모형을 이용하여 MQL 밀링가공에서의 절삭성을 향상시킬 수 있는 최적조건을 구하고, 인자들이 특성치에 미치는 영향을 분석하였다. MQL 밀링가공의 최적조건을 도출하기 위해서 만족도 함수를 이용하였다.

4.2.1 만족도 함수

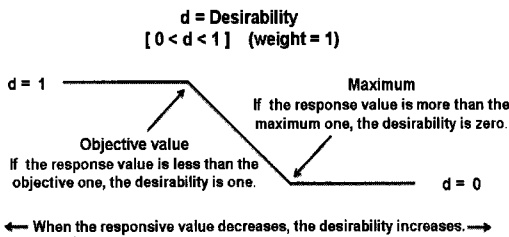


Fig. 5 Desirability function

만족도 함수의 기법은 여러 종류의 단위를 가지는 반응값들을 단일 척도로 표현해야 하는 상황에서 널리 이용되는 기법이다. 만족도(Desirability)란 반응 최적화에서 솔루션이 모든 반응에 대한 목표를 전체적으로 만족하는 정도를 측정하는 척도이다. 만족도에는 개별 만족도(d)와 합성된 만족도(D)가 있으며, 특히 합성된 만족도의 범위는 0에서 1 까지며, 1 은 이상적인 경우를 나타내고 0 은 하나 이상의 반응이 허용한계를 벗어난다는 것을 뜻한다. Fig. 5 는 만족도 함수로, 최소화 할수록 좋은 반응변수(목적=최소화)에 대한 개별 만족도를 보여주고 있다. 즉, 반응변수가 목적에 가까울수록 개별 만족도는 1 이 되고, 반응변수가 상한에 가까울수록 개별만족도는 0 이 된다.

4.2.2 최적절삭조건선정

실험을 통하여 얻은 절삭성을 이용하여 만족도 함수를 도출하였다. 만족도 함수 도출 시 각각의 반응값들의 가중치는 동등하게 1 씩을 주었다. 즉,

반응값에 대한 가중치는 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모가 독립적인 성질을 갖는 것이 아니라 서로 연관성을 가지고 있기 때문에 어느 하나의 반응값에 대하여 높은 가중치를 부여하지 않았다. Fig. 6 은 인자들의 수준을 변화시켰을 때 얻을 수 있는 반응변수의 최적값과 개별 인자들의 수준을 나타낸 것이다. Fig. 6 에서의 D 는 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모의 합성된 만족도를 나타내고, d 는 하나의 특성치에 대한 개별 만족도를 나타내고 있다. 합성 만족도가 1 에 가까운 0.98569 를 나타내고, 그에 해당하는 최적의 절삭조건은 주축속도 1600 rpm, 이송속도 212mm/min, 반경방향 절입량 0.2mm, 윤활량 11.6cc/hr 이다.

절삭력에는 이송속도와 절입량이 낮을수록 절삭력 값이 작게 나왔으며, 주축속도와 윤활유의 양은 큰 영향을 미치지 않았다. 표면 거칠기에서는 4 개의 인자 모두 큰 영향을 미치고 있다. 4 개의 인자가 표면 거칠기에 미치는 영향은 비선형으로 나타났으며, 윤활유의 양이 많을수록 표면 거칠기가 좋게 나타난다. 공구마모는 이송속도가 공구마모에 가장 큰 영향을 미치며, 이송속도가 빠를수록 공구마모의 양이 작게 나타난다는 것을 보여 준다.

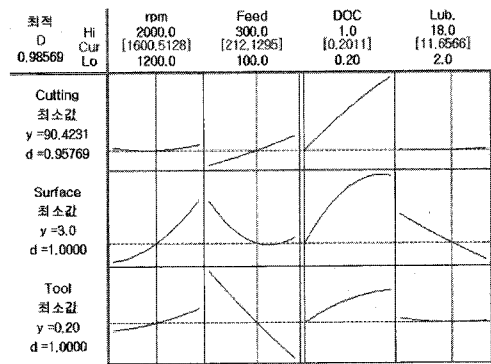


Fig. 6 Optimal cutting condition plot in MQL milling

4.2.3 등고선도, 표면도

등고선도에서는 동일한 반응을 가진 모든 점이 2 차원으로 표시되어 상수 반응 등고선을 나타낸다. 표면도는 등고선도와는 달리 반응표면이 3 차원적으로 표시되어 더욱 정확한 반응값을 알 수 있다. Fig. 7-12 는 인자들간의 변화에 따른 반응변수의 변화를 나타내는 등고선 및 표면도이다.

4 개의 인자들 중 중요 인자 2 개를 제외한 나

머지 2 개의 인자는 최적조건으로 고정을 시키고 반응값에 가장 영향을 미치는 2 개의 인자의 변화에 따른 반응표면을 분석하였다.

주축회전속도와 반경방향 절입량의 관계를 보았을 때 두 변수 모두 작을 때 표면 거칠기가 양호하게 나타났다. 공구마모는 이송속도가 높고 반경방향 절입량이 작을 때 양호하게 나타났다.

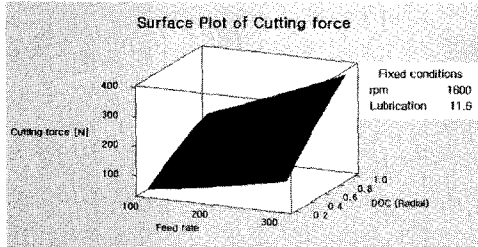


Fig. 7 Surface plot of cutting force

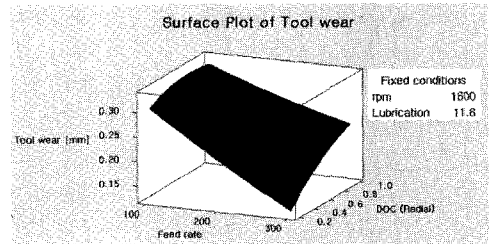


Fig. 11 Surface plot of tool wear

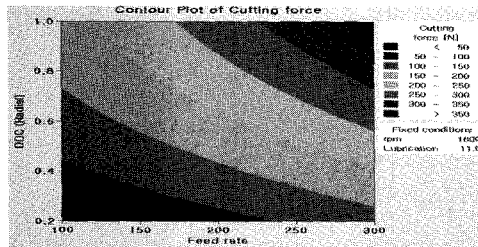


Fig. 8 Contour plot of cutting force

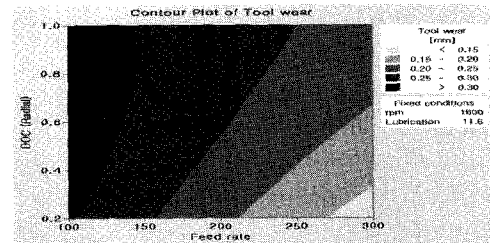


Fig. 12 Contour plot of tool wear

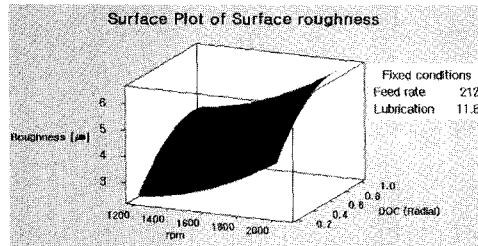


Fig. 9 Surface plot of surface roughness

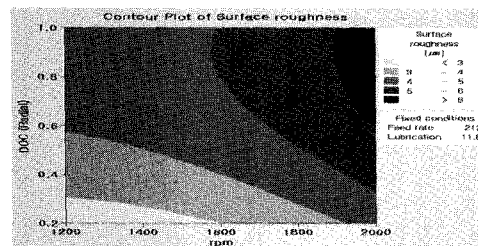


Fig. 10 Contour plot of surface roughness

절삭력의 경우 이송속도와 반경방향 절입량의 변화에 따른 반응표면을 보았을 때, 이송속도와 절입량이 작을수록 절삭력이 작아지는 것을 그래프를 통해서 알 수 있다. 표면 거칠기의 경우는

실험을 통하여 얻어진 회귀모델과 최적의 절삭 조건에 대한 검증의 단계로 얻어진 최적조건에 대해 검증 실험을 실시하였다. Table 9 는 분석으로 얻어진 예상된 절삭성과 2 회의 실험을 통해 얻어진 결과 값의 평균값을 나타낸 것이다. 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모의 실험에서 예측한 값과 실험 결과의 값이 오차범위 이내에서 거의 일치 한다고 판단하고 추정한 회귀모형에 의해 제시된 식이 잘 맞음을 확인 하였다. 따라서 회귀모형의 식을 이용하여 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모를 예측할 수 있다고 판단되어 진다.

Table 9 Multiple response analysis and experiment result

	Cutting force [N]	Surface roughness [μm]	Tool wear [mm]
Estimated response	90.4231	3.0	0.2
Experiment results	98.298	3.09	0.213

5. 결론

본 연구에서는 MQL 밀링가공에서의 최적 절삭조건을 도출함을 목적으로 절삭성에 영향을 미치는 4 개의 인자에 대해 실험계획법을 통하여 실험을 실시하였다. 반응표면 분석을 통하여 가공조건에 따른 절삭력과 표면 거칠기, 공구마모의 분산분석을 수행하였으며, 다항 회귀모델을 추정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 실험에서 사용된 인자인 주축회전속도, 이송속도, 반경방향 절입량, 윤활유량은 MQL 밀링가공의 절삭성에 영향을 미치는 주요 인자들이다. 절삭력의 경우 이송속도, 반경방향 절입량이, 표면 거칠기는 주축회전속도, 반경방향 절입량, 공구마모에서는 이송속도, 반경방향 절입량이 각각 다른 인자들에 비해 큰 영향을 미친다.

2) 반응표면분석을 통해 절삭력, 표면 거칠기, 공구마모의 분산분석과 이차 다항 회귀모델을 구축하여 정확한 예측이 가능하다고 판단되어진다.

3) 만족도 함수를 이용하여 최적절삭조건이 도출가능 하였으며, 실험을 통하여 예측값에 대한 검증은 마쳤다.

참고문헌

1. Chang, Y. S., "Evaluation and Optimization of Machining Process Considering Environmental Effects," J. of the KSPE, Vol. 17, No. 4, pp. 209-219, 2000.
2. NIOSH, "Criteria for a Recommended Standard Occupational Exposure to Metalworking Fluids," US. Dep. of Health and Human Services, CDC. NIOSH Publication No. 98-116, 1998.
3. Aronson, R. B., "Why Dry Machining," Manufacturing Engineering, Vol. 114, No. 1, pp. 33-36, 1994.
4. Hwang, J. and Chung, E. S., "A Study on the Environmentally Conscious Machining Technology Cutting Fluid Atomization and Environmental Impact in Grinding Operation (I)," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 6, pp. 61-69, 2005.
5. Cselle, T., "New Direction in Drilling," Manufacturing Engineering, Vol. 115, No. 2, pp. 70-90, 1995.
6. Lee, H. J., Cho, W. S., Chung, J. K., Park, C. W. and

Kim, Y. J., "Environment-friendly Metal Cutting Technology Using Cooled Air," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 6, pp. 114-120, 2001.

7. Makiyama, T., "Advanced Near Dry Machining System," HORKOS CORP., 2000.
8. Lee, H. J. and Lee, S. J., "Environment-friendly Cutting Process Technology," J. of the KSPE, Vol. 18, No. 9, pp. 31-36, 2001.
9. Zbigniew, Z., Goerge, H. and Xiaoguang, Z., "Dry Machining of Metals with Liquid Nitrogen," SME, Technical Paper, MR 99-252, 1999.
10. Park, S. H., "Design of Experiment," Minyoungsa, pp. 372-398, 2003.
11. Istadi, I. and Amin, N. A. S., "Optimization of Process Parameters and Catalyst Compositions in Carbon Dioxide Oxidative Coupling of Methane over CaO-MnO/CeO₂ Catalyst Using Response Surface Methodology," Fuel Processing Technology, Vol. 87, pp. 449-459, 2006.