

◆ 특집 ◆ 최신 정밀 설계재료 기술 III

## SCM440 의 선삭에서 윤활조건과 테이퍼 각에 따른 가공성 평가에 관한 연구

### A Study on the Machinability Evaluation According to Lubrication Conditions and Taper Angle for Turning of SCM440

최민석<sup>1</sup>, 김동현<sup>2</sup>, 황성주<sup>2</sup>, 이춘만<sup>2,✉</sup>

Min-Seok Choi<sup>1</sup>, Dong-Hyeon Kim<sup>2</sup>, Seong-Ju Hwang<sup>2</sup>, and Choon-Man Lee<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST)

<sup>2</sup> 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National Univ.)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3622

Manuscript received: 2013.11.26 / Revised: 2013.12.5 / Accepted: 2013.12.18

*Recently, in industry field, many researchers are looking for ways to reduce the use of lubricant because of environmental and economical reasons. MQL lubrication is one of many lubrication technologies. The aim of this study is to evaluate the machinability considering lubrication methods and taper angles of workpieces for turning of SCM440. Workpieces of two shapes such as workpiece with and without taper angle are used. And two lubrication methods such as MQL and Wet have been considered. And cutting force and surface roughness are used as characteristic values. Cutting speed, feed rate, injection angle and distance are used as design parameters. The characteristic values were statistically analyzed by Taguchi method. From the results, main effects plot and importance of each parameter according to conditions are analyzed. Finally, this study has been suggested the optimum machining conditions according to the lubrication methods, machining conditions and shape of workpiece.*

Key Words: Turning (선삭), MQL (최소유량윤활), Cutting Force (절삭력), Surface Roughness (표면거칠기), Taguchi Method (다구찌방법)

#### 1. 서론

지구온난화 및 환경문제에 대한 심각성이 대두되고 이에 따른 사람들의 관심이 증가하여 규제가 심해짐에 따라 제품의 개발에서 생산 및 폐기에 이르는 일련의 공정에 친환경적인 기술개발이 요구되고 있다. 그 중, 생산단계에서 친환경적인 요구수준이 높아지고 있다. 초기의 생산기술은 품질 및 생산성을 우선시하고 환경은 고려되지 않아 인체유해 및 환경오염을 유발하였다. 현재는 친환경

성과 경제성 모두를 만족하는 가공기술을 필요로 하고 있다. 생산가공 중 발생하는 유해물질은 칩, 절삭유, 폐공구 등이며 이 중 절삭유는 환경에 직접적으로 악영향을 미쳐 중요시되고 있다.<sup>1,2</sup>

절삭유로 인하여 발생하는 문제를 보완하기 위하여 절삭유를 사용하지 않는 건식가공(Dry Machining)과 미량의 절삭유만을 분무하는 세미드라이가공(Semi-dry Machining) 기술이 있다.

건식가공은 절삭유를 이용하지 않고 코팅공구를 사용하는 방법으로 생산성과 표면품질에서 효

과적이지 못하고 가공조건이 엄격하여 특정분야에 서만 사용되고 있다. 세미드라이가공은 미량의 절삭유만 분무상태로 공급하는 방식이다. 이 중, MQL 가공은 압축냉각공기와 친환경적인 식물성 오일을 이용하는 극미량 절삭유(Minimum Quantity Lubrication) 가공방식으로 세미드라이 가공기술 중 가장 많은 분야에 사용되고 있다. MQL 가공은 공구의 날 끝에 미스트 형태로 극미량의 절삭유만 분사하는 방식으로 경제적이며 친환경적이어서 많은 가공방법 중 가장 주목을 받고 있다.<sup>3,4</sup> 극미량 분사에 따른 칩배출 및 분사 부위의 정확성 등이 요구되고 가공 소재 및 공구, 절삭유 선정이 중요하다.

Hwang 등<sup>5,6</sup>은 선삭가공으로 Al6061과 SM45C 인 시편에 대해 MQL 가공과 Wet 가공을 진행하여 가공조건이 절삭력 및 표면거칠기에 미치는 영향을 수행하였고, Hwang 등<sup>7</sup>은 선삭가공에서 친환경 가공기술 및 절삭유 미립화 연구를 수행하였으며, Dhar 등<sup>8</sup>은 AISI1040의 선삭가공에서 절삭력, 표면거칠기, 칩 두께 비교를 통한 MQL 가공과 Wet 가공을 연구하였다. Hwang 등<sup>9</sup>은 선삭가공에서 절삭력과 표면거칠기 비교를 통한 Wet 가공에 비해 MQL 가공이 효과적임을 검증하였고, Rahman 등<sup>1</sup>과 Hwang 등<sup>10</sup>은 밀링에서 MQL 가공과 Wet 가공을 비교하여 MQL 가공의 경제성 및 친환경성에 관한 연구를 수행하였다. Lee 등<sup>11</sup>은 MQL과 냉풍을 이용한 선삭가공으로 SM45C에 대한 가공성을 비교 연구하였다.

많은 연구자들이 선삭에서 표면거칠기 및 절삭력에 영향을 미치는 가공조건을 찾는 연구와 더불어 MQL 가공과 Wet 가공을 비교하여 MQL 가공의 경제성 및 친환경성을 검증하였다. 하지만 MQL과 Wet등의 유회방법과 공작물 형상을 동시에 고려하여 가공성을 평가한 연구는 거의 없다. 본 연구자들은 선연구에서<sup>5,6,12-14</sup> 선삭가공 시 공작물 형상에 따른 MQL 가공성 평가를 수행한 바 있지만, 공작물의 형상을 변화시키지 않았다. 이에 본 연구에서는 시편의 재질은 SCM440으로 선정하고, 형상은 테이퍼(taper) 각도를 0°, 10° 로 변화시켰다. 가공조건과 유회조건은 고려해야 할 요소가 매우 많으므로, 선연구에서 가장 영향이 큰 인자를 고정인자로 사용하였다. 따라서 본 연구에서는 절삭속도, 이송속도, 절삭유 분사각도와 거리를 고려하여 MQL과 Wet 가공에서 절삭력과 표면거칠기에 영향을 미치는 가공성평가를 수행하였다.

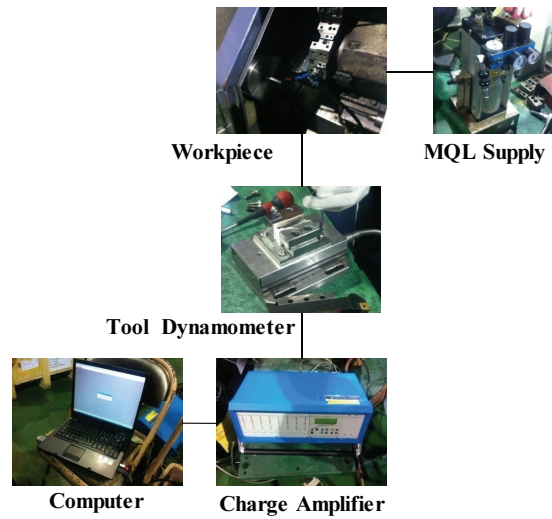


Fig. 1 Experimental set up

Table 1 Equipments and specifications

Instrument	Company	Specification
Turning machine	HWACHEON	Hi-ECO 10
Surface roughness tester	KOSAKA	VC-10
Tool Dynamometer	KISTLER	9257B
MQL device	VOGEL	Vario UFV10-001

Table 2 Specification of MQL device

Oil droplet size (μm)	Air Consumption (Nl/min)	Aerosol antity (mℓ/h)
0.5	140-300	5-150

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장비

선삭가공시 절삭력 측정을 위하여 Fig. 1과 같은 실험장비를 구성하였으며 MQL 장치, 선반, 공구동력계 등으로 구성하였다. Table 1에는 실험장비인 선반, 표면거칠기, 공구동력계, MQL장치의 사양을 나타내었고, Table 2에는 MQL 구동조건을 표기하였다.

선반은 국내 화천기계의 Hi-ECO 10으로 최대회전수 4,500 rpm, 가공물 최대길이 400 mm, 최대 가공직경 Ø220이다. 가공물의 표면거칠기 측정은 KOSAKA사의 VC-10을 사용하였고, 표면절삭력은 KISTLER사의 9257B를 사용하여 측정하였다. MQL 장치는 독일 VOGEL사의 제품을 사용하였다.

Table 3 Chemical composition of SCM440

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Contents	0.38~0.43	0.15~0.35	0.60~0.90	~0.03		0.90~0.12	0.15~0.30

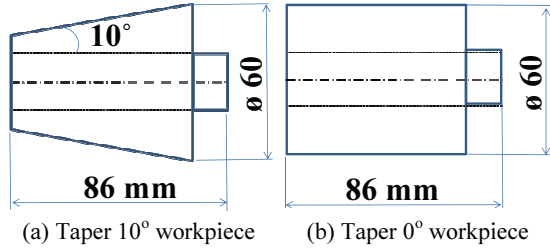


Fig. 2 Size and shape of the workpieces

### 2.2 시편 및 공구

시편의 재료는 SCM440으로서 화학적 조성은 Table 3과 같으며, 형상은 길이 86 mm, 직경 60 mm이며 시편형상은 Fig. 2와 같이 나타낸다.

절삭공구는 노즈반경(Nose radius) 0.4 mm이고 K10카바이드 인서트팁(CCGT 120404FL, TaeguTEC)을 사용하였다. 공구홀더는 외경선삭용으로 앞날각과 옆날각은 5° 이고, 절입각은 95° 이다.

### 2.3 실험조건 및 방법

이번 연구에서는 공작물 가공 중 측정된 절삭력과 가공 후 측정된 표면거칠기 분석을 목적으로 하였다.

절삭조건은 선행연구<sup>12,13</sup>를 참고하여 Table 4와 같이 가공조건에서는 절삭깊이를 고정하여 적용하였고, 윤활조건에서는 압력, 노즐직경을 고정하여 적용하였다.

가공조건 선정을 위한 설계변수는 절삭속도, 이송속도 등 2가지로 선정하였으며, 윤활조건 선정을 위한 설계변수는 노즐설치 각도, 노즐과 시편거리 등 2가지를 선정하였다. 수준은 설계변수별 3개로 정의하였고 Table 5와 같다. 각도는 노즐이 공구에 설치되는 각도이며, Fig. 3은 설치된 노즐을 나타내고 있다. 실험계획 수립은 다구찌 방법<sup>15</sup>을 활용하였으며 Table 6와 같고, 통계분석 등에 MINITAB<sup>16,17</sup>을 활용하였다.

절삭력은 공구대에 설치된 공구동력계를 통하여 가공 중 측정하였고, Fig. 2의 Taper면에 대한 주분력을 사용하였다. 표면거칠기는 중심선 평균 거칠기( $R_a$ )로 Taper면의 평균을 사용하였다.

Table 4 Cutting conditions

Depth of Cut (mm)	Pressure (bar)	Nozzle Diameter (mm)
0.2	4	6

Table 5 The design parameters and design constants

Design Parameters		1 Level	2 Level	3 Level
Machining Condition	Cutting Speed (m/min)	150	200	250
	Feed Rate (mm/rev)	0.05	0.10	0.15
Lubrication Condition	Injection Angle (°)	15	30	60
	Injection Distance (mm)	15	25	35

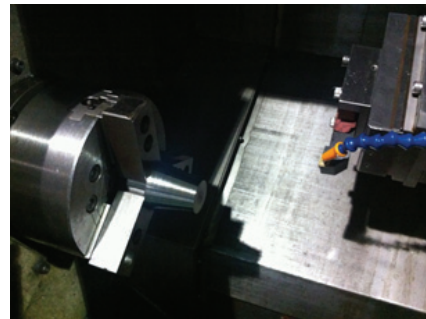


Fig. 3 Injection nozzle

Table 6 Design of Experiments

Exp. No	Cutting Speed (m/min)	Feed Rate (mm/rev)	Injection Angle (°)	Injection Distance (mm)
1	150	0.05	15	15
2	150	0.10	30	25
3	150	0.15	60	35
4	200	0.05	30	35
5	200	0.10	60	15
6	200	0.15	15	25
7	250	0.05	60	25
8	250	0.10	15	35
9	250	0.15	30	15

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 가공성에 대한 비교

MQL 가공과 Wet 가공이라는 윤활방법의 차이 및 시편의 형상변화에 따른 가공성 비교를 그래프로 표현하였다.

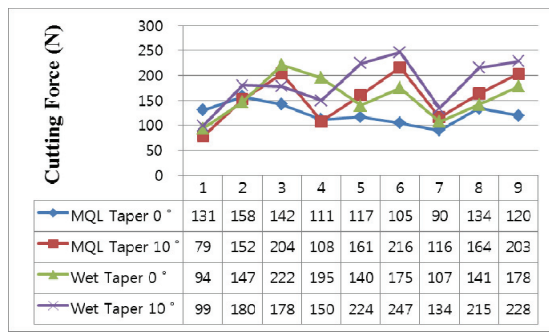


Fig. 4 Comparison of cutting force

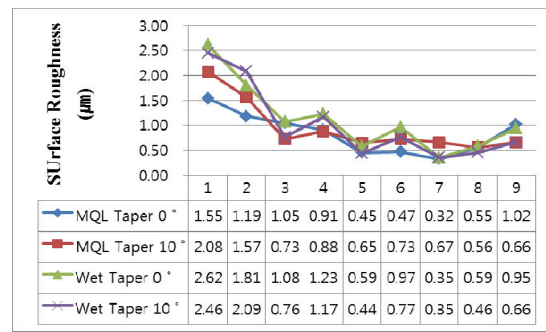


Fig. 7 Comparison of surface roughness

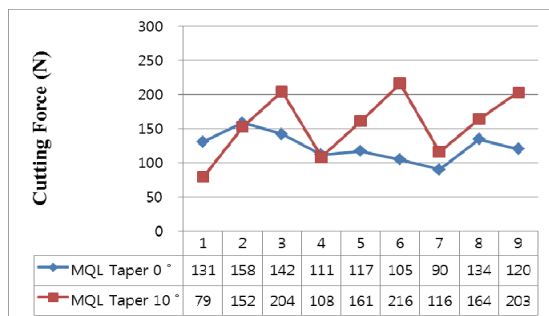


Fig. 5 Comparison of cutting force in MQL turning

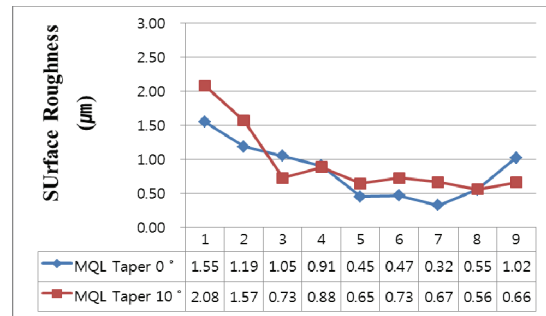


Fig. 8 Comparison of surface roughness in MQL turning

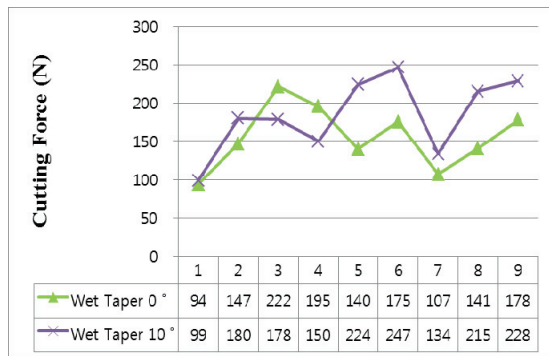


Fig. 6 Comparison of cutting force in wet turning

### 3.1.1 절삭력

Fig. 4는 4가지 시험에 대한 절삭력의 크기로 Wet Taper 10° > MQL Taper 10° > Wet Taper 0° > MQL Taper 0° 순서인 경향을 보이고 있다. 즉, MQL 가공이 Wet 가공에 비해 절삭력이 작게 소요되며, 시편의 Taper 각이 0° 일때 절삭력이 보다 작게 나타났다. Fig. 5는 MQL 가공 비교를 나타내며, 시편의 Taper 각이 0° 일때 10° 보다 더 작은 절삭력을 필요로 한다. Fig. 6은 Wet 가공 비교를 나타내며,

시편의 Taper 각이 0° 일때 10° 보다 더 작은 절삭력을 필요로 하는 경향을 보여준다.

### 3.1.2 표면거칠기

Fig. 7은 4가지 시험에 대한 표면거칠기의 크기로 Wet Taper 0° > Wet Taper 10° > (MQL Taper 0°, MQL Taper 10°) 순서인 경향을 보이고 있다. 즉, MQL 가공이 Wet 가공에 비해 표면거칠기가 우수하게 나타났다. 시편의 형상에 대한 비교에서는 Wet에서 Taper 10°의 시편이 0° 보다 거칠기가 우수하나, MQL에서는 영향이 없는 것으로 나타났다. Fig. 8은 MQL 가공 비교를 나타내며, 시편의 Taper 각 변화에 따른 표면거칠기 값의 크기는 뚜렷한 추세가 아니다. Fig. 9는 Wet 가공 비교를 나타내며, 시편의 Taper 각이 10° 에서 보다 작은 거칠기를 나타내나 큰 차이는 없다.

앞에서 살펴본 Fig. 4~9를 통해 알 수 있듯이, MQL 가공이 Wet 가공에 비해 절삭력 및 표면거칠기, 즉 가공성이 우수한 것으로 나타난다.

Taper 각에 따른 가공성 평가는 절삭력이 0°에서 보다 우수하게 나타났고, 표면거칠기는 Taper 각에 따른 영향을 미치지 않는다.

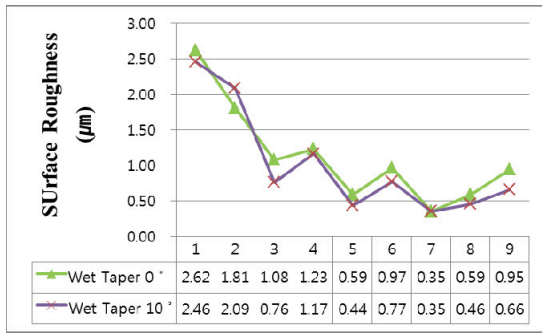


Fig. 9 Comparison of surface roughness in wet turning

Table 7 Response table for SN ratios (MQL turnings with taper 10° workpiece)

Factor Level	Cutting Speed	Feed Rate	Injection Angle	Injection Distance
1	-39.59	-36.96	-39.96	-39.73
2	-40.83	-41.01	-40.49	-40.86
3	-40.89	-43.34	-40.86	-40.72
Delta	1.31	6.38	0.90	1.14
Rank	2	1	4	3

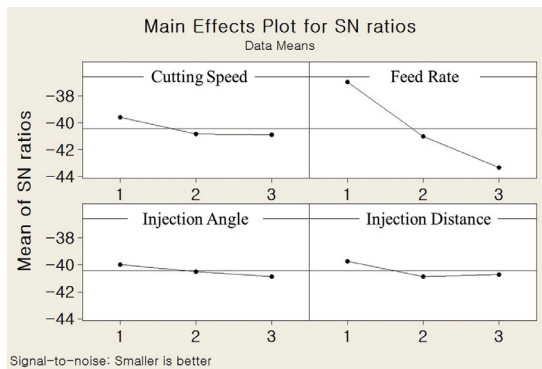


Fig. 10 Main effects plot for SN ratios (MQL turnings with taper 10° workpiece)

### 3.2 설계변수의 가공성 평가

윤활방법 및 시편의 Taper각 변화에 따른 전체 4가지 시험에 대하여 다구찌 방법을 사용하여 설계변수에 대한 평가를 나타내었다.

#### 3.2.1 MQL turnings with taper 10° workpiece

영향이 큰 설계변수는 경사가 급한 순서로 Table 7과 Fig. 10으로부터 이송속도가 영향이 가장 큰 인자임을 알 수 있다. 절삭속도 및 분사각도 그리고 분사거리는 영향이 작은 것으로 나타났다.

Table 8 Response table for SN ratios (MQL turnings with taper 0° workpiece)

Factor Level	Cutting Speed	Feed Rate	Injection Angle	Injection Distance
1	-40.11	-37.77	-38.76	-38.75
2	-37.89	-39.62	-39.14	-38.15
3	-38.06	-38.67	-38.15	-39.15
Delta	2.22	1.85	0.99	1.00
Rank	1	2	4	3

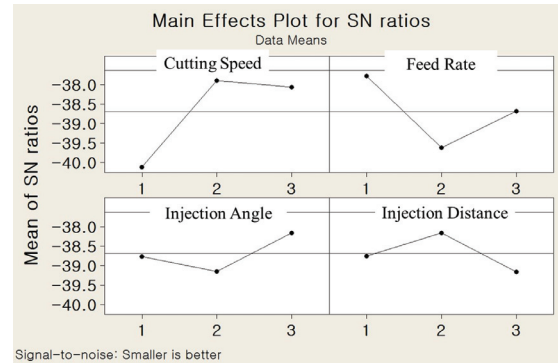


Fig. 11 Main effects plot for SN ratios (MQL turnings with taper 0° workpiece)

최적가공조건은 설계변수별로 S/N비를 최대로 가지는 절삭속도 1수준 (150 m/min), 이송속도 1수준 (0.05 mm/rev), 분사각도 1수준 (15°), 분사거리 1수준 (15 mm)의 조합이다.

#### 3.2.2 MQL turnings with Taper 0° workpiece

Table 8과 Fig. 11로부터 절삭속도의 경사가 가장 급하여 영향이 가장 큰 인자임을 알 수 있고 다음 이송속도 및 분사거리, 분사각도 순서로 나타난다.

최적가공조건은 설계변수별로 S/N비를 최대로 가지는 절삭속도 2수준 (200 m/min), 이송속도 1수준 (0.05 mm/rev), 분사각도 3수준 (60°), 분사거리 2수준 (25 mm)의 조합이다.

#### 3.2.3 Wet turnings with taper 10° workpiece

Table 9와 Fig. 12로부터 이송속도의 경사가 가장 급하여 영향이 가장 큰 인자임을 알 수 있고 다음 절삭속도가 영향을 미치는 것으로 나타난다. 분사거리 및 분사각도는 영향이 작음을 알 수 있다.

최적가공조건은 설계변수별로 S/N비를 최대로 가지는 절삭속도 1수준 (150 m/min), 이송속도 1수



Table 9 Response table for SN ratios (wet turnings with taper 10° workpiece)

Factor Level	Cutting Speed	Feed Rate	Injection Angle	Injection Distance
1	-40.35	-38.98	-41.80	-41.69
2	-43.11	-43.25	-42.26	-42.15
3	-42.44	-43.67	-41.84	-42.06
Delta	2.76	4.69	0.46	0.46
Rank	2	1	4	3

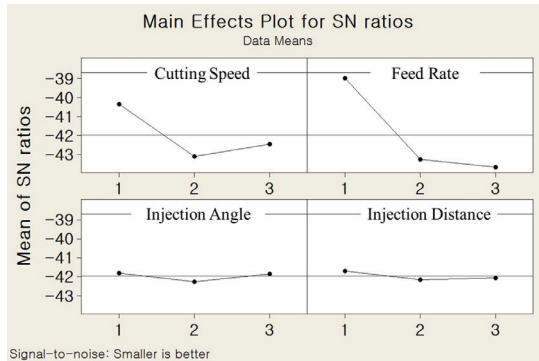


Fig. 12 Main effects plot for SN ratios (wet turnings with taper 10° workpiece)

준 (0.05 mm/rev), 분사각도 1수준 (15°), 분사거리 1수준 (15 mm)의 조합이다.

### 3.2.4 Wet turnings with taper 0° workpiece

Table 10과 Fig. 13으로부터 이송속도의 경사가 가장 급하여 영향이 가장 큰 인자임을 알 수 있고 다음 분사거리 및 분사각도, 절삭속도 순서로 나타난다.

최적가공조건은 설계변수별로 S/N비를 최대로 가지는 절삭속도 3수준 (250 m/min), 이송속도 1수준 (0.05 mm/rev), 분사각도 1수준 (15°), 분사거리 1수준 (15 mm)의 조합이다.

앞에서 살펴본 바와 같이 설계변수별 가공성 평가는 윤활방법에 따른 비교시, Wet에서는 이송속도가 가장 큰 영향을 나타낸다. MQL에서는 Taper가 10° 인 경우 이송속도이고 Taper가 0° 인 경우는 절삭속도가 가장 큰 영향을 나타낸다.

소재의 형상에 대한 비교에서는 Taper가 10° 인 경우는 이송속도의 영향이 가장 크고 분사각도 및 분사거리에 따른 영향은 작다. Taper가 0° 인 경우는 MQL은 절삭속도가 가장 크고, Wet은 이송속도가 가장 큰 것으로 나타났다.

Table 10 Response table for SN ratios (wet turnings with taper 0° workpiece)

Factor Level	Cutting Speed	Feed Rate	Injection Angle	Injection Distance
1	-40.22	-38.93	-39.42	-39.44
2	-41.53	-40.08	-41.71	-39.93
3	-39.85	-42.59	-40.46	-42.23
Delta	1.68	3.66	2.29	2.79
Rank	4	1	3	2

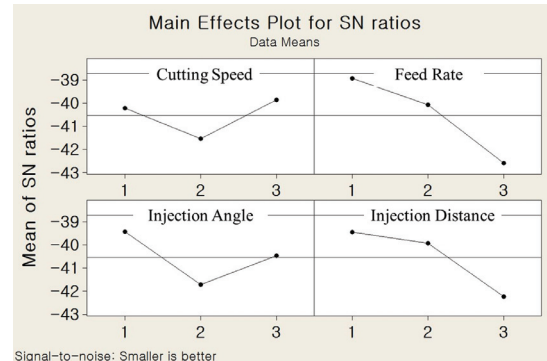


Fig. 13 Main effects plot for SN ratios (wet turnings with taper 0° workpiece)

## 4. 결론

본 연구에서는 SCM440의 선삭에서 윤활방법과 테이퍼 각에 따른 가공성을 평가하기 위해 다구찌 방법을 이용하여 실험을 설계하고, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가공성 평가를 위한 특성치는 절삭력 및 표면거칠기로 선정하였다. 가공조건의 절삭깊이, 윤활조건의 압력 및 노즐직경은 고정인자로 하고, 절삭속도, 이송속도, 노즐설치 각도 및 노즐과 시편거리를 제어가능한 설계변수로 선정하였다.
2. 윤활방법 조건은 MQL 가공과 Wet 가공을 비교분석하였고, 시편의 형상은 10° 테이퍼 각을 가진 것과 테이퍼 각이 없는 것으로 선정하여 비교실험하였다.
3. 윤활방법에 대한 비교시 MQL 가공이 Wet가공에 비해 절삭력 및 표면거칠기가 더 좋게 나타났다. 시편형상에 대한 비교시 절삭력은 테이퍼 각이 있는 시편이 보다 좋지 않게 나타났으며, 표면거칠기는 테이퍼 각이 있는 시편이 없는 시편보다 Wet 가공에서 보다 좋은 결

- 과를 나타냈고, MQL에서는 테이퍼 각에 따른 거칠기에 대한 영향이 없는 것으로 나타났다.
4. 다구찌 방법을 이용하여 분석한 결과, 가공성에 영향을 미치는 설계변수의 중요도는 이송 속도, 절삭속도, 분사거리 그리고 분사각도 순으로 나타났고, 윤활조건 보다는 가공조건이 가공성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
  5. 소재의 형상 변경에 따른 MQL과 Wet 가공시 각각의 최적가공조건을 제시하였다.

본 연구의 결과는 MQL 및 Wet 윤활을 이용한 선삭 가공에서 가공 및 윤활조건 선정에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

1. 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 Tool & Manufacture*, Vol. 42, No. 5, pp. 539-547, 2002.
2. Diniz, A. E. and Micaroni, R., "Cutting Conditions for Finish Turning Process Aiming: the Use of Dry Cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 8, pp. 899-904, 2002.
3. Kang, J. H., "Environmentally Conscious Machining Technology and Machine-tool," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 9, No. 1, pp. 9-17, 2000.
4. Lee, K. H. and Kim, J. Y., "Overview and Future Direction of Cleaner Production System," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 20, No. 8, pp. 12-16, 2003.
5. 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 Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 15, No. 4, pp. 83-91, 2006.
6. Hwang, Y. K., Chung, W. J., and Lee, C. M., "Experimental Study of Cutting Force and Surface Roughness Prediction in MQL Turning of Al 6061," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 25, No. 6, pp. 159-167, 2008.
7. Hwang, J., Chung, E. S., and Hwang, D. C., "A Study on the Environmentally Conscious Machining," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 20, No. 2, pp. 50-57, 2003.
8. 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, No. 1, pp. 93-99, 2006.
9. Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "Surface Roughness and Cutting Force Prediction in MQL and Wet Turning Process of AISI 1045 using Design of Experiments," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 8, pp. 1669-1677, 2010.
10. Hwang, Y. K., Lee, C. M., and Park, S. H., "Evaluation of Machinability according to the Changes in Machine Tools and Cooling Lubrication Environments and Optimization of Cutting Conditions Using Taguchi Method," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, No. 3, pp. 65-73, 2009.
11. Lee, J. H., Lee, S. J., Lee, S. W., and Choi, H. J., "Characteristics of Environment-friendly Semi-dry Turning," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 19, No. 10, pp. 221-226, 2002.
12. Kim, D. H., Kang, D. W., Cha, N. H., and Lee, C. M., "Experimental Study on the Optimized Lubrication Conditions in MQL Turning of Workpieces with Taper Angle," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 63-69, 2013.
13. Kim, D. H., Choi, J. Y., and Lee, C. M., "A Basic Study on the Surface Roughness in Turning Process Considering Taper Angle Variation," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 16-21, 2011.
14. Choi, C. H., Kim, D. H., and Lee, C. M., "A Study on Cutting Characteristic of Tapered Groove in Turning," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 27-32, 2011.
15. Lee, S. B., "Taguchi Method Applying by using Minitab," *Erectech Inc*, pp. 37-40, 2006.

16. Lee, S. H., "Data Analysis of Engineering Statistics by using Minitab," Eretec Inc, pp. 855-873, 2008.
17. Eretech, "MINITAB Realese 14," Eretec Inc, pp. 689-704, 2005.