

# Tapping 가공 온도 최소화를 위해 미스트 노즐 적용 절삭유 공급에 따른 냉각조건 최적화

오창혁\*, 김영신\*\*, 전의식\*\*\*,#

\*공주대학교 기전공학과, 제이팩, \*\*공주대학교 생산기술연구소, \*\*\*공주대학교 미래융합공학과

## Optimization of Cooling Conditions by Supplying Cutting Oil Applied with Mist Nozzle to Minimize Tapping Processing Temperature

Chang-hyok Oh\*, Young-Shin Kim\*\*, Euy-Sik Jeon\*\*\*,#

\*Department of Mechanical and Electrical Engineering Graduate School of Kongju National UNIV.,

\*\*Industrial Technology Research Institute, Kongju National UNIV.,

\*\*\*Department of Future Convergence Engineering, Kongju National UNIV.

(Received 15 March 2022; received in revised form 18 April 2022; accepted 21 April 2022)

### ABSTRACT

When processing parts, the cutting oil can improve the cooling performance of the workpiece and tool to increase the precision of the workpiece or extend the life of the tool and facilitate chip extraction. Since such cutting oil has a harmful effect on the environment and the human body due to additives such as sulfur, research on a minimum lubrication supply method using an eco-friendly oil is recently underway. The minimum lubrication supply method minimizes the amount of cutting oil used during processing and processes it, which can reduce the amount of cutting oil used, but has a problem in that cooling performance efficiency is poor. Therefore, this study conducted a study on mist cooling of lubricants to reduce the amount of cutting oil used and maximize the cooling effect of processing heat generated during tapping processing. Spray pressure, processing speed, direction, and lubricant spray amount, which are considered to have an effect on cooling performance, were set as process conditions, and the effect on temperature was analyzed by performing an experiment using the box benquin method among experiments were analyzed. Through the experimental analysis results, the optimal conditions for mist and processing that maximize the cooling effect were derived, and the validity of the results derived through additional experiments was verified. In the case of processing by applying the mist lubrication method verified through this study, it is considered that high-precision processing is possible by improving the cooling effect.

**Keywords** : : Mist Nozzle(미스트 노즐), MQL(최소윤활공급), DOE(실험계획분석법) Tapping(나사가공)

## 1. 서 론

절삭가공시 제품이나 부품 등을 가공하는 과정에 사용되는 절삭유제는 고품질, 고능률 생산을 이루면서 공구 수명 연장에도 기여하고, 가공시 절삭유제를 다량으로 공급하며 절삭가공을 수행 하고 있는 것이 현

# Corresponding Author : osjun@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-521-9284

실이다. 이러한 절삭유제는 윤활제로서의 성능을 높이기 위해 인이나 유황 등 각종 첨가제가 혼합되어 있는 것도 있으며 환경이나 인체에 유해한 영향을 미치므로 절삭유제를 친환경 유제로 사용한다든지 사용량을 줄이는 등 다양한 방법이 시도되고 있다.<sup>[1]</sup>

절삭유제는 절삭유의 폐액 처리가 발생하지 않도록 하기 위해 소량만 사용하고, 전력 소모가 있는 순환펌프를 사용하지 않으며, 필요한 최소량의 절삭유제를 공구의 날끝이나 가공점에 직접 공급하는 최소 윤활 공급 MQL(Minimal Quantity Lubrication) 방식에 대해 절삭가공분야에서 다양한 방법으로 연구 되고 있다<sup>[2]</sup>. MQL 방식은 미스트 사용량을 줄이는 장점은 있으나 냉각효율이 떨어지는 단점이 있다.

가공 시 발생하는 열은 공구의 마모 및 피삭재의 효율이나 가공품의 품질에 영향을 주며, 절삭시 공구에 생성되는 <sup>[9]</sup>구성인선에 영향을 주므로 가공시 절삭유제에 의한 냉각은 필수조건이다.

밀링가공 분야에서는 공급분사 각도, 방향 및 거리에 따른 가공특성 및 냉각에 대한 특성을 실험을 통해 분석 하였고<sup>[3]</sup>, 선삭과 엔드밀 가공에서는 냉각을 위해 MQL, 습식(Wet), 건식(Dry) 3가지 가공 방법을 비교 검증을 하였다<sup>[4,7]</sup>. 드릴링에서는 MQL의 단점인 공구나 모재의 냉각효율을 높이기 위해 공구 주위에 Sealed cover를 장착하여 분무된 절삭유제를 공기외부에 분산되는 것을 최소화하여 냉각 효율성을 높이거나 다방향성 Nozzle을 장착하여 유동해석을 통해 냉각 효율을 높이는 등 다양한 방법으로 연구가 진행되었다<sup>[5,6]</sup>.

본 논문에서는 탭핑 가공시 최소 윤활 공급(MQL)가공 방식을 적용하여 절삭유제의 사용량을 최소화 하며 냉각효율을 최대화 하기 위한 연구를 수행하였다. 절삭유제 공급시 미스트 분무를 이용하여 분무조건 및 가공조건에 따른 온도특성을 실험적으로 분석하였다. 효율적인 실험분석을 위해 <sup>[8]</sup>실험계획법 중 반응표면 분석법을 활용하였으며, 공정변수는 노즐의 위치, 절삭유제 공급압력, 절삭유제 분무량, Tap 회전수로 설정하였으며, 공정변수에 따른 가공특성은 공구 온도로 설정하였다. 공정조건에 따른 가공특성 분석을 통해 공구 온도에 영향을 미치는 인자를 분석하고, 냉각효과를 최대화 하는 최적화 조건을 도출하였다. 또한 도출된 최적조건의 추가실험을 통해 도출된 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 실험대상 및 방법

### 2.1 실험장치 및 대상

태핑(Tapping) 실험에 사용된 장비는 HEENAM의 Tapping M/C(HN-400) 모델이며, 장비의 제원은 Table 1과 같다. 실험에 이용한 절삭 공구는 OSG 스파이럴 탭으로 M12×1.75 OH2 HSSE를 사용했으며, 시편은 일반적인 난삭제로 분류된 SUS 304를 두께 8.0mm로 Laser 가공하여 태핑가공을 수행하기 위한 시험시편을 제작하였다. Tapping 실험을 위해 Fig. 1의 시험시편을 도면화 하여 Laser 가공으로 제작하였다. 8.0(t)×220×88 Hole 을  $\phi 10.5$ 로 제작하였으며 M12의 나사를 연속 작업하기 위해 Hole 24ea를 제작하였다. Mist Nozzle의 분사 압력 및 절삭유제 공급량 조절을 하기 위해 KCC정공의 레귤레이터&오일러 (Kau301a-03G) 모델을 채택하였으며, 태핑 가공 시 발생하는 가공온도를 측정 하기 위해 Fluke 열화상카메라 (TI125)로 측정하였다. 열화상카메라의 제원은 Table 2와 같고, 시편 SUS 304 물성은 Table 3과 같고, 실험에 사용한 절삭유제의 종류는 이레산업의 ST-501을 사용하여 실험을 진행하였다.

Table 1 Specification of the tapping M/C

List	Unit	Size
Cutting ability	mm	23
Main axis of moving distance	mm	100
Table moving distance	mm	420
The main rotation speed	rpm	158~1375
The main taper	J.T or M.T	M.T #2

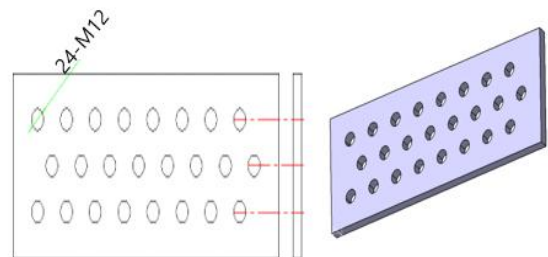


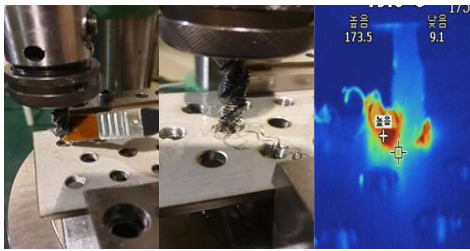
Fig. 1 Drawing for making experimental specimens

**Table 2 Thermal imaging camera**

Product characteristics	
The minimum focal length	150mm (about 6in)
Thermal sensitivity(NETD)	30°C at a target temperature of 0.08°C or less
Temperature measurement range	-20°C to +150°C
Internal digital camera (visible light)	2 megapixel industrial performance
Frame speed	9Hz only

**Table 3 Materials information (SUS 304)[%]**

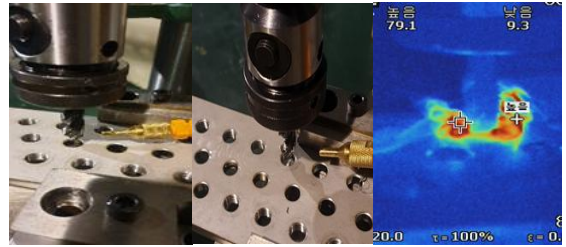
Cr	Ni	C	Si	Mn	P
18.0	8.0	0.08	1.00	2.00	0.04
~20.0	~10.5	less	less		less



**Fig. 2 Supply brush system**

## 2.2 기초 실험

태핑 가공시 미스트 형태를 통한 절삭유 공급방식의 냉각 효과를 확인하기 위해 기초 실험을 수행하였으며, 가공시 공구의 온도를 기존방식과 비교 분석하였다. 비교 실험을 통해 기존 Brush type과 Mist nozzle type 방식 모두 공구의 회전수를 220rpm으로 설정하여 공구의 온도를 측정하였다. 이때 Mist nozzle type 경우 압축 공기 압력은 2bar, 태핑유 공급은 2ml/min로 실험을 진행하였다. 연속 가공시 공구에 남아 있는 잔여열로 인해 Tap의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위해 가공후 온도를 측정하여 13~15°C의 기본 온도 도달 후에 다음 실험을 진행하였다. Fig. 2는 Brush type의 태핑가공 장면과 가공부 온도를 나타낸 곳이고, Fig. 3은 MQL Mist nozzle type의 가공 장면과 온도를 나타낸 것이다. Brush type 가공일 때는 Table 3과 같이 168~181°C 상당히 높은 열이 발생함을 확인하였다.



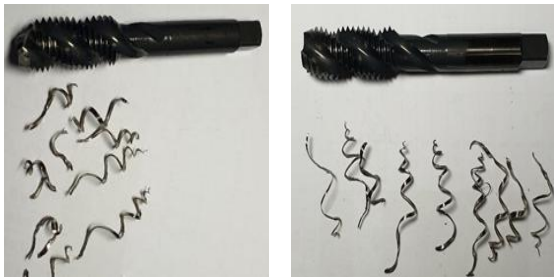
**Fig. 3 Mist nozzle system**

**Table 4 Temperature of the bursh type and mist nozzle supply type[°C]**

No.	Brush type	Mist nozzle type
1	175.4	87.2
2	168.2	79.1
3	173.5	101
4	181.2	85.2
5	170.5	93.4
Average	173.8	89.2

또한 Mist nozzle type의 가공은 기존 Brush type 보다 냉각 성능 향상을 보여주며 87~101°C의 가공온도가 측정되었다. 여기에 기본 온도를 낮추기위해 Mist nozzle type 분사방식을 적용했을 때는 5~10sec 내에 12°C 정도의 온도로 공구가 냉각되어 연속작업시 온도의 영향을 받지 않는 환경에서 작업을 진행하여 가공시 여유시간을 적용하여 공정을 진행 하였다. 기초실험 후 Brush type과 Mist nozzle type의 가공된 칩의 형태를 비교 분석한 결과 Fig. 4(a)와 같이 Brush type 공급방식은 Chip의 형태가 굵고 거칠며, 열단형 칩생성으로 여러조각의 형태로 보이며, 공구에 열이나 구성인선의 생성으로 Work point 부분이 파손이 되어 공구의 수명이 짧은 것으로 나타났다.

Fig. 4(b)에 나타난 Mist nozzle type의 Chip 형태는 유동형으로 자연스럽게 매끄러우며 가늘고 긴형태로 생성되는 것을 확인할 수 있으며, 공구의 외관도 처음 사용한 시점과 동일한 형태를 보여주고 있는 것을 확인할 수 있다. 기초실험 분석 결과 공구의 성능 및 제품 품질에 영향을 주는 온도 비교 측정에 Brush type과 Mist nozzle type 적용을 실시하여 비교한 결과 Mist nozzle type이 냉각에 있어 더 효과적으로 나타났다.



(a)Brush Type(Brocken Tap) (b)Mist Nozzle Type

**Fig. 4 Chip shape according to cooling type**

가공 시 생성되는 잔여칩의 배출에도 Mist nozzle type이 더 효과적이었으며, 기존방식의 작업은 구성인선의 생성, 가공면 주위의 잔여칩이 남아 있어서 연속 가공시에는 공구 수명단축에 영향을 주었다.

### 2.3 반응표면분석법에 의한 실험 설계

태핑 가공시 Mist nozzle type의 냉각 효과를 극대화하기 위해 다양한 공정 조건에 따른 냉각온도 특성을 분석하고자 하였다. 기초실험을 토대로 미스트 분무방식의 특성치를 공구 온도로 설정하고, 노즐의 위치, 압축 공기의 공급압력, 탭핑유체의 분무량, 공구의 회전수(절삭속도)를 공정변수로 하여 실험계획법 중 반응표면 분석법을 이용하여 실험계획을 수립하였다. 온도에 영향을 미칠 것으로 사료되는 4인자 3수준의 공정변수를 설정하고 반응표면 분석법 중 Box-Behnken법을 이용하여 실험을 설계하였다.

중앙점 9점 실험을 포함한 총 45번의 실험을 계획하고 수행하였다. 실험결과를 토대로 공정변수와 냉각특성의 상관관계를 분석 하고 냉각특성을 최대화 하기 위한 최적조건을 도출하였다. 압력은 압축공기의 생성 가능 조건과 분사장치의 범위에 따라 1bar 3.5bar 6ar로 설정하였으며 Mist nozzle 분무량 1ml/min, 2ml/min 3ml/min은 Tap가공 가능조건을 고려하여 설정하였다. 공구의 회전수는 220rpm 330rpm 440rpm Nozzle의 위치는 정방향 역방향 중앙방향인 수준으로 설정하였다.

가공방식의 연속작업에 있어 온도상승의 기준을 정하기 위해 기초실험에 적용하였던 1실험 실시 후 공구 및 시편에 냉각 여유시간을 주어 작업의 추가 온도상승이 발생하지 않도록 충분한 냉각시간을 적용하여 온도를 기준온도 이하로 냉각되었을 때 마다 실험을 진

**Table 5 Measurement results according to experimental design conditions**

	Pressure (P)	Spray amount (A)	Evolutions (E)	Direction (D)	Temperature (T)
Unit	bar	ml	rpm	-	°C
1	1	1	330	front	123.2
2	6	1	330	front	83.2
3	1	3	330	front	115.4
4	6	3	330	front	85.3
5	1	2	220	front	99.4
6	6	2	220	front	71.6
7	1	2	440	front	121.2
8	6	2	440	front	74.1
9	3.5	1	220	front	85.2
10	3.5	3	220	front	86.4
11	3.5	1	440	front	102.3
12	3.5	3	440	front	89.7
13	3.5	2	330	front	91.1
14	3.5	2	330	front	82.3
15	3.5	2	330	front	79.6
16	1	1	330	center	112.1
17	6	1	330	center	83.7
18	1	3	330	center	110.8
19	6	3	330	center	81.5
20	1	2	220	center	85.4
21	6	2	220	center	77.4
22	1	2	440	center	123.7
23	6	2	440	center	78.2
24	3.5	1	220	center	86.1
25	3.5	3	220	center	85.3
26	3.5	1	440	center	94.5
27	3.5	3	440	center	96.6
28	3.5	2	330	center	68.1
29	3.5	2	330	center	88.2
30	3.5	2	330	center	80.5
31	1	1	330	back	101.8
32	6	1	330	back	87.2
33	1	3	330	back	116.7
34	6	3	330	back	82.8
35	1	2	220	back	103.2
36	6	2	220	back	85.6
37	1	2	440	back	119.3
38	6	2	440	back	69.6
39	3.5	1	220	back	85.1
40	3.5	3	220	back	74.5
41	3.5	1	440	back	98.8
42	3.5	3	440	back	85.9
43	3.5	2	330	back	81.3
44	3.5	2	330	back	82.0
45	3.5	2	330	back	77.4

행하였다. Table 5는 Box-Behnken법에 의해 설계된 실험 조건에 따른 온도측정 결과를 나타낸 것이다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1 온도측정 결과 분석

가공 조건에 따른 특성치 측정 결과 MINITAB을 이용하여 통계적 분석을 수행하였으며, Fig. 5에 온도에 미치는 인자별 주효과도를 나타내었다. 설정한 인자 중 노즐의 위치는 온도에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있으며, 분무압력과 분무량의 경우 곡률 효과가 있음을 확인하였다. 미스트 분사 압력의 경우 초기 압력이 증가할 경우 온도가 감소하다 일정 구간 이상에서는 온도가 다시 상승하는 특징을 보인다. 또한 미스트 양의 경우도 마찬가지로 냉각온도가 감소하다 증가하는 변곡점이 발생함을 알 수 있다. 회전속도의 경우 온도에 유의한 영향을 미치며 속도가 증가할수록 온도 또한 증가하는 일반적인 경향을 보였다. Fig. 6은 인자간 교호작용을 나타낸 그래프로 압력과 회전속도의 교호작용이 발생함을 확인할 수 있다. 이는 분사 압력이 낮을 때는 회전 속도에 의한 영향이 크게 나타나고 분사 압력이 높을 때는 가공속도에 의한 영향이 상대적으로 적게 나타남을 확인할 수 있다.

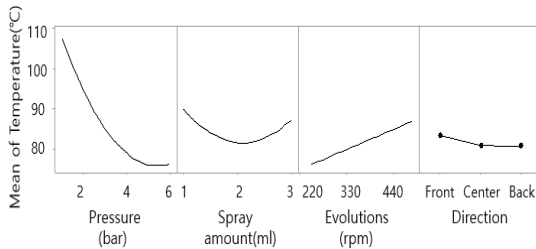


Fig. 5 Main effects plot for Temperature

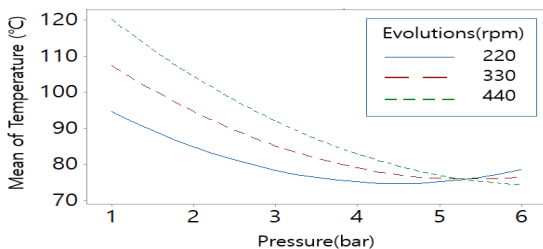


Fig. 6 Interaction plot for Temperature

Table 6 ANOVA

Source	DF <sup>1)</sup>	Adj SS <sup>2)</sup>	Adj MS <sup>3)</sup>	F-Value <sup>4)</sup>	P-Value <sup>5)</sup>
Model	8	8847.86	1105.98	35.10	0.000
Linear	5	6565.02	1313.00	41.66	0.000
Pressure	1	5766.00	5766.00	182.97	0.000
Amount	1	43.47	43.47	1.38	0.248
Evolutions	1	690.15	690.15	21.90	0.000
Direction	2	65.39	32.70	1.04	0.365
Square	2	1624.24	812.12	25.77	0.000
P × P	1	1174.07	1174.07	37.26	0.000
A × A	1	557.46	557.46	17.69	0.000
2-Way Interaction	1	658.60	658.60	20.90	0.000
P × E	1	658.60	658.60	20.90	0.000
Error	36	1134.49	31.51		
Lack of Fit	30	844.19	28.14	0.58	0.849
Pure Error	6	290.30	48.38		
Total	44	9982.35			

- 1) DF : Degree of freedom; 2) Adj SS : Sum of squares;
- 3) Adj MS : Mean of square; 4) F-Value : MSTR/MSE;
- 5) p-Value : The criterion for determining the significance level and the reference value is less than 0.05.

Table 6은 주효과 및 교호작용의 분산분석표이다. 유의하지 않은 고차항의 교호작용은 모두 오차항으로 풀링 하였으며, 주효과 중 분사 압력 및 회전 속도의 경우 온도에 유의미한 인자임을 확인할 수 있으며 분사압력과 분사량의 곡률효과 및 압력과 회전속도의 교호작용이 유의미한 인자임을 확인할 수 있다. 아래 도출된 회귀식 (1), 회귀식 (2), 회귀식 (3)은 노즐의 각 위치에 따른 냉각온도를 예측할 수 있는 회귀를 나타낸

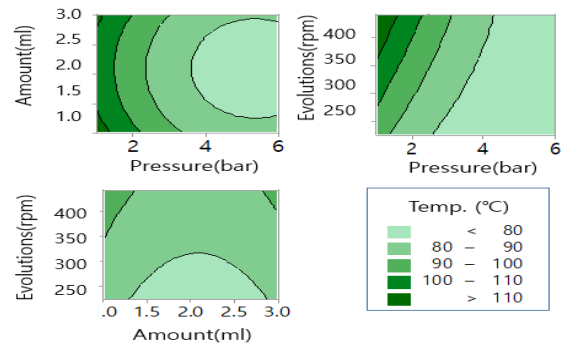


Fig. 7 Contour plots of temperature

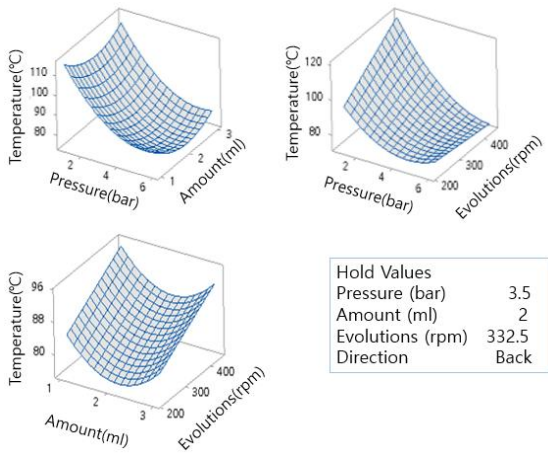


Fig. 8 Surface plot of temperature

5.61369이며 R제곱 값은 88.64%의 높은 적합치가 나타났으며 수정과 예측은 86.11%로 확인되었다.

$$\text{Temp.} = 108.0 - 8.62P - 29.64A + 0.1450S + 1.642P \times P + 7.07A \times A - 0.02731P \times S \quad (1)$$

$$\text{Temp.} = 105.5 - 8.62P - 29.64A + 0.1450S + 1.642P \times S \quad (2)$$

$$\text{Temp.} = 105.4 - 8.62P - 29.64A + 0.1450S + 1.642P \times P + 7.07A \times A - 0.02731P \times S \quad (3)$$

Fig. 7의 등고선도 및 Fig. 8 표면도를 통해 공정변수의 변화에 따른 온도를 확인하였으며, 분무량×압력, 회전수×압력, 회전수×분무량 변화에 따라 온도변화 차이가 발생하였으며, 위치에 따른 온도변화는 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 또한 분무량과 압력, 속도와 분무량에서 곡률효과가 있음을 확인할 수 있다. 표면도와 등고선도는 작성 시 2가지 인자에 따른 온도값으로 표현되므로 Hold value는 분사압력의 경우 3.5bar, 분사량 2ml, 회전속도 330rpm, 방향은 뒤쪽으로 설정하여 작성하였다.

실험결과 곡률효과를 확인하였으며 이를 통해 냉각효과를 최대화 하기 위한 최적 조건을 도출하고자 하였다. 반응 최적화 도구를 이용하여 Fig. 9의 그림과 같이 온도를 최소화 하려는 조건을 도출하였다. 도출된 최적 공정조건은 분사 압력 4.4848, 분무량 2.0949, 회전수 224rpm, 위치 역방향으로 도출되었으며, 온도

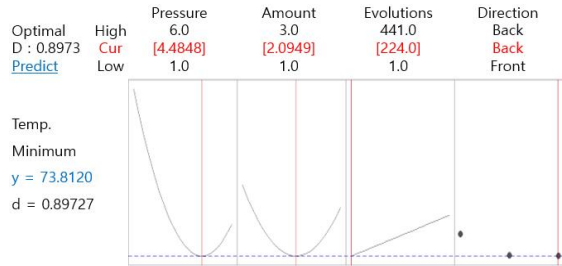


Fig. 9 Optimized response plot

Table 7 Comparison of validation experiments(result)

Parameters	Initial condition		DOE Result	Experimental result
	Brush type	Mist nozzle type		
Pressure(bar)	2	2	4.4848	4.5
Amount(ml)	2	2	2.0949	2
Evolutions(rpm)	220	220	224.0	220
Direction	-	Front	Back	Back
Cooling temp.	173.8	89.2	73.812	67.65

의 적합치가 73.81도로 예측되었다. Table 7은 실험계획법으로 최적의 조건을 것이다. 데이터 값과 적합치 간 거리의 표준편차 S는 도출한 Data를 확인하기 위한 검증실험의 결과로 기초실험인 Brush type과 비교 Mist nozzle type이 94% 이상의 냉각효과를 나타내었고, 실험계획법을 통해 얻은 최적조건의 실험과는 156.9%의 높은 냉각효과와 온도 최소화 적합치를 나타낸 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구는 절삭 가공시 절삭 유제를 미스트화 하여 공급해 공구의 냉각온도에 따른 가공의 최적 절삭 조건을 평가하는 실험을 실시하였다. 실험계획을 수립하고 변수들을 설정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 공구의 냉각온도를 평가하기 위해 가공 유제 공급의 압력, 분무량, 공구의 회전수, 노즐의 위치로 평가를 하였다. 기초 실험을 진행한 결과 기존 방식대비 미스트 노즐 적용 방식이 냉각효율에 좋은 결과를 확인하였다. 4 요인을 3수준으로 설계한 실험 결과 온도의 영향을 끼치는 요인은 압력, 분무량, 회전수로 나타났

으며, 인자의 곡률효과를 확인할 수 있었다. 실험결과를 토대로 압력 4.5 bar, 분무 2ml, 회전수 224rpm, 위치는 역방향일 때 조건으로 도출 되었으며 추가실험을 통해 도출된 조건의 타당성 검증하여 미스트 노즐 냉각 조건의 최적조건임을 검증하였다. 본 연구를 통해 미스트노즐의 냉각 특성을 분석하고 최적조건을 도출 하였으며 연구 결과를 토대로 다양한 가공 조건에 미스트 냉각 적용 시 냉각성능을 향상 시켜 가공제품의 품질 향상에 기여할 것으로 사료한다.

## REFERENCES

1. Lee, Y. H., Trend of MQL Processing Dairy Monthly Mechanical Technology Reporter, January issue, pp. 122-127, 2011.
2. Takashi, N., Trends in Processing Oil for Environmental Responses, February issue pp. 103-108, 2006.
3. Lee, J. H., Ko, T. J., and Baek, D. G., "A study on the optimal cutting conditions of MQL milling processing using reaction surface analysis", Journal of Precision Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 43-50, 2008.
4. Park, H. C., Kang, J. W., Park, K. B., Cho, Y. T. and Jung, Y. K., "A study on the efficient drilling processing of Inconel601 using MQL", Paper collection of the Spring Autumn Conference of the Korean Mechanical Engineering Association, pp. 27-27, 2015.
5. Kang, M. G., Min, B. K., Kim, T. G., Lee, S. W. and Park, K. H., "Experiment on the surface properties of titanium alloys according to lubrication cooling methods", Korean Precision Engineering Association, pp. 1086-1086, 2015.
6. Jung, J. H., Park, Y. S., Song, K. H. and Cho, M. W., "A Study on Nozzle Design for Improving the Performance of MQL, Paper Collection of the Academic Presentation Conference of the Korean Society of Production and Manufacturing", pp 199-199, 2018.
7. Hong, K. P., Song, K. H., Lee, I. C., Kang, D. S., Jung, J. H., Lim, D. W., Kim, U. Y. and Baek, S. Y., "A Study on the Optimization of Plastic Mold Steel Processing Using the MQL Supply System", Korean Journal of Machinery Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 7-14, 2017.
8. Choi, M. S., Kim, D. H., Hwang, S. J. and Lee, C. M., "A study on the evaluation of workability according to lubrication conditions and taper angle in the cutting of SCM440", Korea Precision Engineering Journal, Vol. 31, No 1, pp. 35-42, 2014.
9. Lee, J. G. and Choi, M. S., "A Study on the Tapping and Tap Shape of STS304", Journal of Precision Engineering, Vol. 17 No. 11, pp. 55-62, 2000.
10. Hwang, Y. G., Lee, C. M. and Jung, J. Y., "A Study on the Improvement of Processability of MQL Pre-Cutting Processing Using Experimental Planning Method", Paper Collection of the Academic Presentation Conference of the Korean Society of Production and Manufacturing, pp. 629-634, 2006.