

MQL 공급시스템을 이용한 플라스틱 금형강 가공 최적화에 관한 연구

홍광표*, 송기혁*, 이인철*, 강동성*, 정재화*, 임동욱*, 김운용**, 백시영*.#

*인하대학교 기계공학과

**인하대학교 재료공정공학과

A Study on The Optimization of Plastic Mold Steel Machining Using MQL Supply System

Kwang-Pyo Hong*, Ki-Hyeok Song*, In-Cheol Lee*, Dong-Sung Kang*, Jae-Hwa Chung*,
Dong-Wook Lim*, Woon-Yong Kim**, Si-Young Beck*.#

*Department of Mechanical Engineering, Inha UNIV.

**Department of Material Process Engineering, Inha UNIV.

(Received 1 August 2017; received in revised form 11 September 2017; accepted 13 September 2017)

ABSTRACT

This study manufactured a minimum quantity lubrication (MQL) supply system and identified the optimal MQL machining cutting conditions for plastic mold steel (SCM440). A series of experiments were consisted of twice. Optimal cutting conditions were derived using the Taguchi method, and cutting force variance; surface roughness; tool wear; and cutting temperature in dry, wet, and MQL machining were measured experimentally for these optimal conditions. The measured results decreased from dry to wet and MQL machining, being particularly large for dry machining due to increased cutting time. Measured MQL machining metrics were similar to those for wet machining, particularly for surface roughness, which is an index of machining quality.

Key Words : Minimum Quantity Lubrication(최소윤활), Plastic Mold Steel(플라스틱 금형강), Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면 거칠기), Tool Wear(공구마모), Cutting Temperature(절삭온도)

1. 서 론

최근 산업분야에서 기술적인 동향은 고정도 기술, 고능률화, 고기능화 등 고도화와 함께 환경 문제에 대한 요구 및 법규가 더욱 강력해 지고 있다. 특히, 제품의 제조에서 폐기에 이르기까지 전

과정에 걸쳐 현장의 환경 문제에 대한 관심이 높아지고 있다.^[1-4] 기존 절삭 가공 시 사용했던 습식성 금속가공유는 절삭열의 냉각작용과 절삭공구 및 피삭재의 마찰에서의 윤활작용, 칩 배출, 방식작용 등을 위하여 사용되고 있다. 이러한 금속 가공유에는 절삭성능의 향상을 위하여 염소, 인, 유황 등의 극압첨가제를 함유하고 있다. 또한 염소화합물의 소각 시 발암성 유해물질인 다이옥신이 발생하며, 이러한 유해물질은 작업자의 건강에 매우 나쁜 영향을 미치며, 환경을 심각하게 오

Corresponding Author : beck@inha.ac.kr
Tel: +82-32-860-7306, Fax: +82-32-868-171

염시키고 있다. 한편, ISO 14000(보건국제규격)에서는 작업환경에 대한 관심과 변화가 증가함에 따라 규제가 강화되는 한편 금속가공유에 대한 처리비용 및 설비 유지관리 비용이 증가하고 있다. 절삭유 관리비용은 절삭에 이용되는 공구비용에 대비하여 약 4배 이상이 필요하다^[5-7]. 따라서 선진국에서는 작업환경에 대한 규제가 점차 강화됨에 따라 환경 친화적인 기술로 가공을 할 수 있는 공작기계의 개발과 환경 친화적 관점의 극미량절삭유 및 처리기술의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 비열처리 고경도 금형강재로 가장 많이 사용하고 있는 플라스틱 금형강 (SCM440)을 피절삭재로 선정하고, 평엔드밀 가공 시 평균입자크기 0.5 μm 의 오일 미스트(oil-mist) 공급이 가능한 MQL(minimum quantity lubrication)공급시스템을 이용하였다. 가공 조건에 따른 절삭특성을 검토하기 위하여 실제 생산현장에서 사용하는 절삭조건을 MQL을 이용한 가공 조건으로 선정하였으며 습식(wet)가공과 건식(dry)가공, MQL 가공에서의 절삭력과 , 표면 거칠기, 공구마모를 분석하였으며 가공 최적화를 위하여 실험계획법^[8-9]을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 MQL 공급시스템

MQL 공급시스템은 미스트 형식으로 윤활유를 절삭날에 분사가 가능한 방법이다. MQL 공급시스템은 현재에는 자동차용 부품, 선박용 부품, 항공용 부품 등 다양한 가공에 사용되고 있다. 기존의 순환 공급방식 시스템은 가공유 소모량이 매우 큰 반면 MQL 공급시스템은 소모량의 최소화가 핵심기능이며, 다양한 절삭 가공 분야에서 사용되고 있다. MQL 공급시스템은 최소 가공유 소모량(약 5~150ml/hr)만을 사용하는 기술로 기존의 습식윤활과 비교하여 매우 적은 윤활유를 사용한다.

2.2 MQL 공급방식의 분류

MQL 공급시스템의 가공유 공급방식은 외부공

급(external)방식과 내부공급(internal)방식으로 분류할 수 있다. 외부공급방식은 기존의 공작기계에 설치가 가능하며, 대부분의 공작기계에 적용이 가능하다. 분사 노즐을 통해 압축공기(compressed air)를 공급하며, 오일 미스트 공급량의 조절이 가능하다. 내부공급방식은 스핀들과 절삭공구의 내부에 중심부를 관로로 이용하여 콜로이드(colloid) 상태의 에어로졸(aerosol)을 절삭이 이루어지는 지점에 효과적으로 공급한다. 따라서 매우 깊은 구멍을 높은 절삭 속도로 가공할 수 있다.

2.3 MQL 공급시스템 설계

본 연구에서는 전자 솔레노이드 밸브 제어(solenoid operated valve control)의해 개폐가 가능한 노즐을 단독 또는 여러 조합으로 개폐하여 에어로졸의 농도 및 유량을 제어할 수 있도록 설계하였다. Fig. 1은 MQL 공급시스템의 노즐(nozzle)이며, 3개의 벤츄리 효과(venturi effect)를 얻을 수 있는 구멍을 가지고 있으며, 각각의 노즐구멍은 독립적 또는 조합을 통해 다양한 유량 조절이 가능하다. Fig. 2는 자체 개발한 MQL 공급시스템의 전체 조립도를 3차원 모델링으로 나타낸 것으로 4개의 전자 솔레노이드 밸브, 상부, 하부, 노즐, 압력탱크를 나타내고 있다.

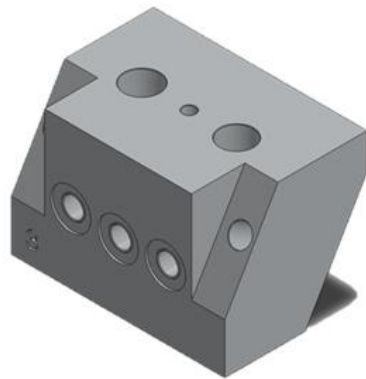


Fig. 1 Developed Nozzle

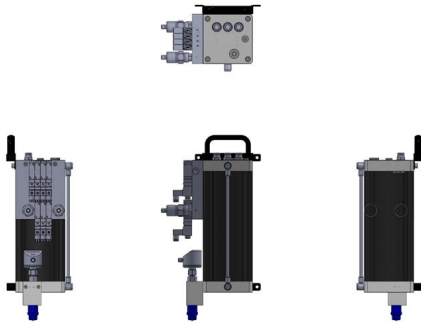


Fig. 2 Developed MQL supply system

2.4 MQL 공급시스템의 성능 평가

MQL 공급 시스템의 성능 평가를 위해 차압(differential pressure)을 이용한 분사 시험을 수행하였으며 입자크기, 내압성, 공급 유량을 에어로졸 스펙트로미터(aerosol spectrometer Model 1.108, Grimm, Germany)로 측정하였다. 총 5개의 시료를 사용하여 에어로졸의 평균입자 크기 및 입주분포에 따른 입자크기별 질량을 측정하며 에어로졸을 공급하고 등속흡인샘플러(isokinetic sampler)을 통해 등속흡인상태를 측정한다. 측정 결과는 입자크기별 계수 및 분포를 측정데이터로 사용하였다. Fig. 3은 스펙트로미터와 등속흡인샘플러를 장착하여 구성된 에어로졸 분사장치(aerosol sprayer)이다.



Fig. 3 Aerosol Sprayer

2.4.1 Aerosol 입자특정 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 평균적인 입자크기별 계수 및 분포를 나타내고 있으며 Table 1은 샘플 별 입자 측정 결과를 나타내고 있다. 주입압력 6 bar에서 시험 하였으며, 에어로졸의 평균 입자크기는 0.5 μm 를 유지하고 있으며, 에어로졸 탱크 입주분포량은 약 90%를 나타내고 있다.

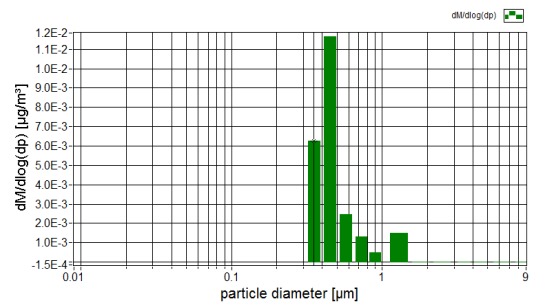


Fig. 4 Mass by particle size ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

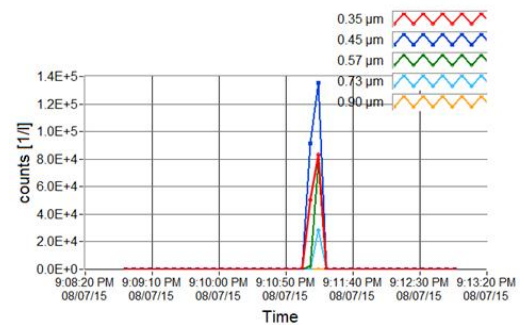


Fig. 5 Particle size and number of particles

Table 1 Measured results of aerosol particle with sample number

No.	Ave. particle size (μm)	Occupancy distribution (%)	Remarks (6 bar standard)
1	0.5	App. 90%	Good
2	0.5	App. 90%	Good
3	0.5	App. 93%	Good
4	0.5	App. 91%	Good
5	0.5	App. 90%	Good

Table 2 Measured results of pressure resisting quality with sample number

No.	Injection pressure (bar)	Safety valve (bar)	Remarks (9.5 bar standard)
1	9.5	9.5	Good
2	9.5	9.5	Good
3	9.5	9.5	Good
4	9.5	9.5	Good
5	9.5	9.5	Good

2.4.2 내압성 시험 결과

내압상승에 따른 에어로졸 탱크의 안전성 확보를 위해 내압성 시험을 수행하였으며 외부 누유(oil leak)와 누기(damp)는 발견되지 않았다. Table 2는 내압성 시험결과이며, 증압기를 이용하여 약 9.5 bar 증압상태에서 누유 및 누기를 육안으로 검사한 결과 상태는 양호하였다.

3. 실험

3.1 실험장치 구성

본 연구를 위한 절삭 실험은 Vertical CNC machining center(DNM 400)를 사용하였으며 외부 공급방식의 MQL 공급시스템을 적용하였다. Fig. 6은 MQL 공급시스템의 설치 모습을 사진으로 보여준다.



Fig. 6 Used MQL supply system

3.2 피삭재 및 절삭공구

3.2.1 피삭재

가공에서 사용된 피삭재는 플라스틱 금형강(SCM440)으로 사출 성형에 적용되는 금형 소재이다. Table 3은 플라스틱 금형강의 화학적 성분을 나타내고 있으며 Table 4는 플라스틱 금형강의 기계적 특성을 나타내고 있다.

3.2.2 절삭공구 및 절삭유

절삭공구는 HSS Co8 TiAlN 코팅 2날 평엔드밀을 사용하였다. 또한 습식, 건식, MQL 공급시스템의 3가지 방법을 사용하여 절삭가공을 수행하기 위해 습식절삭에서는 1종 3호의 비수용성 절삭유를 사용하였으며, MQL 공급시스템을 이용한 절삭에서는 피삭재(SCM440)의 기계적 특성을 고려하여 K社의 ACRO MQL 45를 사용하였다.

3.3 실험방법 및 실험조건

본 실험에서는 MQL 공급시스템을 이용한 가공에서의 최적화 조건을 도출하기 위하여 플라스틱 금형강(SCM440)에 대한 일반적인 절삭조건으로 절삭 가공을 수행하였다. Table 5는 본 연구에 적용된 1차 절삭조건을 나타내고 있다.

Table 3 Chemical composition of workpiece

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
%	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
	0.43	0.35	0.15	0.02	0.02	0.45	50	0.30

Table 4 Mechanical properties of workpiece

Items	Conditions
Yield strength (Pa)	>830
Tensile strength (Pa)	>980
Elongation (%)	>12
Hardness (HB)	255

Table 5 Conditions for first experiments

Items	Conditions
Spindle speed (rpm)	1600, 1800, 2000
Feed (mm/min)	60, 69, 78
Workpiece	SCM440
Diameter D (Ø)	5
Coating materials	TiAlN
Cooling type	Dry, Wet, MQL
Oil mist flow rate Q (ml/h)	10, 15, 20

1차 가공실험을 위해 실험계획법 중 하나인 다 구치 분석기법을 활용하여 주축회전수(rpm), 이송 속도(feed), 유량(flow rate)에 따른 총 27회의 MQL 공급시스템을 이용한 절삭가공을 수행하였으며 가공조건을 Table 6에 나타내었다. 주 효과(main effect) 분석을 위해 $L_9(3^3)$ 의 직교배열표(orthogonal arrays)를 Table 7에 나타내었으며 망소 특성(smaller the natter characteristics)을 분석하기 위해 S/N 비(signal-Noise ratio)를 분석하였다. 앞서 실험계획법을 통해 분석된 절삭조건을 이용하여 건식절삭가공, 습식절삭가공, MQL 공급시스템을 이용한 2차 절삭가공실험을 실시하고 이에 따른 공구마모(tool wear), 절삭력(cutting force), 표면 거칠기(surface roughness)를 측정하였다. Table 8은 2차 실험가공을 위한 실험조건을 나타내고 있으며 특성분석을 위해 공구동력계(kistler 9272, USA), 3차원 표면 형상 측정기(non-contact 3D surface profiler; NV 7300, Zygo, USA), 공구현미경(ICS-Pro, sometechnvision, Korea)과 열화상 카메라(TE-M1, Basecamp C&M, Korea)를 이용하였다.

Table 6 Factor levels for the selection of cutting conditions

Level	Factor		
	A: rpm	B: Feed	C: Flow rate
1	1600	60	10
2	1800	69	15
3	2080	78	20

Table 7 Orthogonal arrays

No.	Cutting parameters				Cutting force
	A: rpm	B: Feed	C: Flow rate	Ra	
1	1600	60	10	1.855	225.1
2	1600	60	10	2.099	241.1
3	1600	60	10	1.879	254.5
4	1600	69	15	2.293	256.9
5	1600	69	15	2.055	249.8
6	1600	69	15	1.930	249.8
7	1600	78	20	2.181	274.6
8	1600	78	20	1.977	274.6
9	1600	78	20	2.614	367.7
10	1800	60	15	1.258	231.1
11	1800	60	15	1.203	241.8
12	1800	60	15	1.394	202.7
13	1800	69	20	1.178	188.2
14	1800	69	20	1.297	174.4
15	1800	69	20	1.121	174.4
16	1800	78	10	1.642	246.5
17	1800	78	10	1.501	214.6
18	1800	78	10	1.284	199.2
19	2080	60	20	0.455	159.1
20	2080	60	20	0.721	159.1
21	2080	60	20	0.583	212.1
22	2080	69	10	0.800	168.5
23	2080	69	10	0.582	169.1
24	2080	69	10	0.854	162.6
25	2080	78	15	0.843	187.4
26	2080	78	15	0.668	183.9
27	2080	78	15	0.538	188.6

Table 8 Conditions for 2nd experiment

Items	Conditions
Spindle speed(rpm)	2080
Feed(mm/rev)	60mm/min
Workpiece	KP4
Diameter Ø	5
Coating material	TiAlN
Cooling type	Dry, Wet, MQL(20ml/h)
Depth	2mm
Pitch	2mm

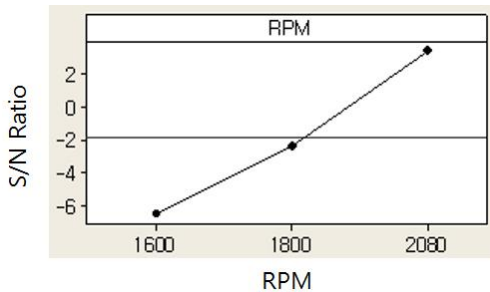
4. 실험 결과

4.1 1차 실험결과

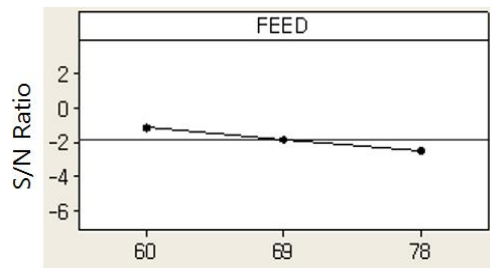
1차 실험조건을 통해 수행된 절삭가공 결과는 망소특성으로 분석된 S/N비로 Table 9에 나타내었으며 가장 큰 영향을 미치는 인자는 주축회전수이며, 이송속도와 유량 순으로 나타났다. Fig. 7은 S/N비에 대한 각 인자들의 주효과도를 나타내고 있다. 이를 통해 주축회전속도가 표면 거칠기와 절삭력에 비해 가공 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

Table 9 Response results for S/N ratio

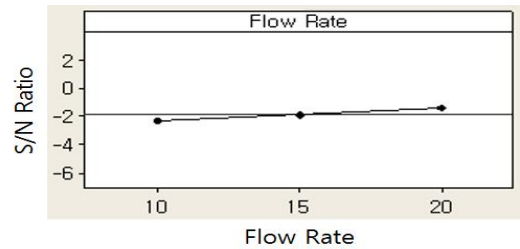
Level	rpm	Feed	Flow rate
1	-6.454	-1.155	-2.257
2	-2.405	-1.861	-1.824
3	3.378	-2.465	-1.401
Delta	9.832	1.311	0.856
Rank	1	2	3



(a) rpm



(b) feed



(C) flow rate

Fig. 7 Main effect for S/N ratio

4.2 2차 실험결과

공구마모는 절삭가공이 진행됨에 따라 외주날 윗면에서 마모가 발생하였다. Fig. 8은 각 가공방식에서 절삭시간에 따른 공구마모를 그래프로 보여주고 있으며, 공구마모량은 건식가공이 395.236 μm 으로 제일 크며, 그 다음은 MQL가공 269.879 μm , 습식가공121.111 μm 순으로 확인되었다. 절삭가공이 진행됨에 따라 공구 마모가 외주날 윗면에서 점진적으로 커졌으며, 특히 가공시간 약 30분을 기점으로 MQL가공에서의 마모수치가 급격하게 증가하였다. 이는 MQL 가공이 습식가공의 절삭유에 비해 에어로졸의 분포가 공구에 적절히 확산되지 않는 것으로 판단된다. 절삭력(cutting force)은 건식가공이 제일 크며, 그 다음은 MQL가공, 습식가공 순으로 확인되었다. Fig. 9는 절삭력 측정 결과를 나타내고 있다. 건식가공의 경우 약30분~40분의 절삭시간을 기준으로 급격히 절삭력이 증가했으며, MQL가공의 경우 습식절삭시간에 대비하여 절삭시간의 흐름에 따라 큰 차이가 생기지 않는 것을 확인했다. 표면 거칠기는 비접촉식 3차원 표면 형상 측정기 (NewView 7300, ZYGO, USA)를 이용하여 측정하였으며 그 결과는 건식가공은 1.3116 μm 에서 3.3626 μm , 습식가공은 1.2626 μm 에서 2.3314 μm , MQL가공은 1.2432 μm 에서 2.5996 μm 로 측정되었다. 즉 표면 거칠기는 냉각작용과 윤활작용이 제일 뛰어난 습식가공, MQL가공, 건식가공 순으로 확인되었다. 표면 거칠기의 측정값을 보면 알 수 있듯이 건식절삭을 제외한 MQL가공과 습식가공에서의 표면 거칠기 측정값이 유사한 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 MQL 공급 시스템을 이용하여 1차 가공실험을 통해 플라스틱 금형강 절삭을 수행하였으며 최적절삭조건을 도출하였다. 2차 가공 실험에서는 습식, 건식, MQL절삭을 통한 실험결과를 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 1차 가공에서는 표면 거칠기와 절삭력에 가장 큰 영향을 주는 요소는 주축회전수(rpm)와 이송속도(feed)임을 확인하였다.
- 2) 2차 가공에서는 공구 마모 측정 결과 외주날 윗면에서 마모가 크게 발생되었음을 확인하였으며, 공구마모는 건식가공, MQL가공, 습식가공의 순으로 측정되었다.
- 3) 습식가공과 MQL가공만을 비교하였을 때 약 30분 이후의 가공시간에서는 점점 습식가공에 대비하여 MQL가공의 공구마모가 감소함을 확인하였다.
- 4) 절삭력은 MQL가공과 습식가공이 절삭시간의 흐름에 따라 큰 차이가 발생하지 않았으며 일정 가공시간을 기준으로 절삭력이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.
- 5) 표면 거칠기는 건식가공, 습식가공, MQL가공 모두 가공시간 약 10분정도까지는 거칠기의 측정값이 거의 동일한 추세를 보이나 가공시간이 증가함에 따라 공구마모의 영향으로 표면 거칠기의 점점 나빠지는 것을 확인하였다. 각 가공방법 중 표면 거칠기 측정결과 MQL가공과 습식가공은 유사한 표면 거칠 값을 나타내었다.
- 6) 절삭시간을 기준으로 약 30분~40분의 구간에서 측정값이 대부분 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

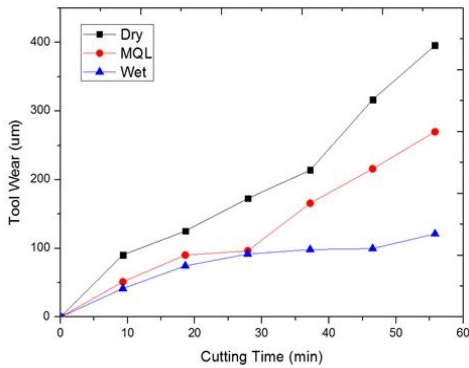


Fig. 8 Results of tool wear according to cutting processes

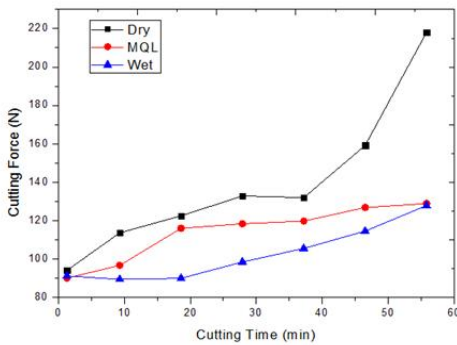


Fig. 9 Results of cutting force according to cutting processes

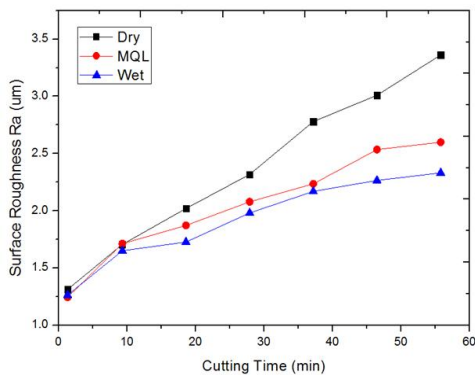


Fig. 10 Results of surface roughness according to cutting processes

후 기

“이 논문은 중소기업청의 중소기업융복합기술개발 사업(S2392980, ICT 기반 티타늄 단조 공정 모니터링 시스템 개발)의 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Lee, I. S. and Kim, H. J., “A Study on the Optimum Shape of MQL Carbide End-mill for Machining of Aluminum Lithium Alloy,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 159-166, 2013.
2. Lee, J. H., Ko, T. J. and Beak, D. G., “A Study on Machinability and Cost Evaluation of MQL Milling Process,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 26-34, 2009.
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 Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 83-91, 2006.
4. Park, S. H., Jung, J. Y., and Lee, C. M. “A Study on the Improvement of Surface Roughness and Analysis of Cutting Force in MQL End-milling”, Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 395-396, 2006.
5. Cselle, T. “New Directions in Drilling,” Manufacturing Engineering, Vol. 115, No. 2, pp. 70-90, 1995.
6. Chang, Y. S. and Kim, Y. S. “Optimization of milling process considering the environmental impact of cutting fluids,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 14-20, 1998.
7. Lee, J. H., Ko, T. J. and Beak, D. G. “A study on Machinability and Cost Evaluation of MQL Milling process,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No.2, pp. 26-34, 2009.
8. 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.
9. Han, D. R. “A Study on the Optimal Cutting Condition in Boring using MQL System,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 82-87, 2011.