

# MQL 선삭가공시 가공조건의 표면거칠기 영향 분석

이춘만\*, 황영국+, 정종윤\*\*

The Effect of Cutting Conditions on Surface Roughness in MQL Turning.

Choon-Man Lee\*, Young-Kug Hwang+, Jong-Yun Jung\*\*

## Abstract

At present, industry and researchers are looking for ways to reduce the use of lubricants because of ecological and economical reasons. Therefore, metal cutting is to move toward dry cutting or semi-dry cutting. This paper presents an investigation into MQL(Minimum Quantity Lubrication) machining with the objective of deriving the optimum cutting conditions for the turning process of SM45C. To reach these goals several finish turning experiments were carried out, varying cutting speed, feed rate and oil quantity, with MQL. The surface roughness results of tests were measured and the effects of cutting conditions were analyzed by the method of Analysis of Variance(ANOVA). From the experimental results and ANOVA, it is found that a better surface roughness can be obtained by decreasing oil quantity and feed rate.

Key Words : MQL machining, Turning process, Optimum cutting conditions

## 1. 서론

최근의 기계가공 분야에서는 고속, 고능률, 고품위 가공뿐만 아니라 전 세계적으로 중요시되고 있는 환경문제에 대응하기 위한 환경 대응 가공 기술이 중요시 되고 있다. 환경 대응 가공 기술은 크게 에너지 절감, 폐기물 저감, 작업환경의 안전 및 쾌적성 확보로 분류할 수 있다.

기계공장에서 사용하는 에너지 중 기계가공기가 약 80%를 사용하고 그 중에서도 기계가공기가 사용하는 에너지의 약 50%는 유제가 사용하고 있다. 또한 고 부하용 절삭유 중에는 극압 첨가제로서 염소계 화합물이 포함되어 있어 고온 절삭시 및 폐유를 연소 처리할 때 맹독성인 다이옥신을 발생시킬 우려가 있다. 이같이 기계가공에서 에너지 절감, 폐기물 저감, 작업환경의 개선 등을 위해서는 절삭유의 사용을 줄이는 드라이, 세미드라이 가공은 기계가공의 중요한 테마이다. 그러나 어떠한 기술이든 최

종적으로는 제품의 가공을 지향한 이상 실용적인 가공법이어야한다. 즉 특별한 가공에만 유효한 기술이어서는 안 되고, 환경대응 뿐 아니라 종래의 가공법과 비교해서 가공능률, 공구마모, 가공면 손상 등의 가공 성능에서도 동등 이상의 효과를 내야한다. 이를 위해서는 새로운 가공 기술 및 장치의 개발 뿐 아니라 이의 적절한 활용 역시 중요하다. 즉 최상의 가공 성능을 얻기 위해서는 작업자가 적절한 가공조건 및 제어파라미터를 선정하여야한다. 따라서 최신 가공기술을 적용한 장치를 유효하게 활용하기 위해서는 적절한 가공 조건 및 제어파라미터를 결정하기 위한 데이터의 확보가 중요하다. 아무리 좋은 공작기계와 가공 기술이 있더라도 작업자가 제대로 활용하지 못한다면 그 기술은 무익하기 때문이다.

이에 본 연구에서는 최근 환경 대응 기술로서 큰 위치를 차지하고 있는 MQL 가공기술을 선삭에 적용할 때 가공조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하여 최적절삭조건

\* 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)

주소 : 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

+ 창원대학교 기계설계공학과 대학원

++ 창원대학교 산업시스템공학과

을 규명하고자 한다. 실험은 분할법(Split-plot design)을 적용하여 기계구조용 탄소강 SM45C의 가공재를 코팅조경합금공구로 원통외경 선삭을 할 때 MQL 량, 이송량, 절삭속도 등의 절삭조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. MQL 가공 기술

MQL(Minimum Quantity Lubrication)가공 기술은 1994년경 독일에서 개발된 기술로서 최소량윤활가공, 반건식(Semi-dry) 가공, 니어드라이(Near dry) 가공이라고도 한다. 이 기술은 기체를 반송 매체로 하여 안개상의 윤활액을 공구 날끝에 바르는 방법의 총칭이다. 즉 안개상의 반송 가능한 사이즈를 가진 필요 최소량의 윤활액을 기액 혼합의 상태에서 가공부 등 필요 부위에 공급하는 방법이다. 윤활액으로는 무해로 생분해하는 식물성유나 신세탁 오일을 선택하는 경우가 많다. 또한 일반적으로 반송 매체에는 에어를 사용하는 일이 많은데 통상 공기 공급량은 100~400Nl/min이고 공급 윤활유량은 수~50ml/h이다.

MQL 가공기술을 분류하면 공급 경로에 의한 구분에서는 Fig. 1과 같이 외부급유 방식과 내부급유 방식이 있고, 기액 혼합장소에 따른 구분에서는 Fig. 2와 같이 주축 외부 믹싱 방식과 주축 내부 믹싱 방식으로 분류할 수 있다.

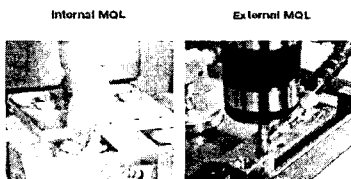


Fig. 1 Internal and external MQL method

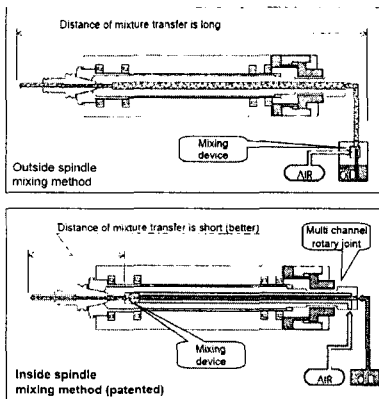


Fig. 2 Outside spindle mixing and inside spindle mixing method

## 3. 실험장치 및 실험방법

### 3.1 시편 및 절삭공구

실험에 사용된 실험재는 기계구조용 탄소강 SM45C이며 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같고, 시편은 길이 100mm, 직경 55mm의 환봉을 Fig. 3과 같은 형상과 치수로 가공하였다.

Table 1. Chemical composition of workpiece material

Composition Metal	C	Mn	Si	P	S
	SM45C	0.45	0.64	0.18	0.021

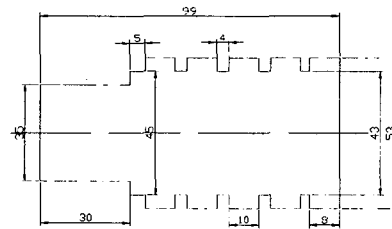


Fig. 3 Shape and dimensions of test specimen

절삭공구는 초경모재위에 TiN-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN을 CVD 코팅한 CNMG 120404 FG TT3500 Insert(TaeguTec)를 사용하였고 Toolholder는 PCLNR 2020 K12를 사용하였다.

### 3.2 실험장치 및 방법

실험에 사용된 장치는 대우종합기계(주)의 HT-1200 CNC선반으로 전체 구성은 Fig. 4와 같다. 이 장치는 MQL 공급 장치 및 Mist Collector가 부착된 MQL 전용기이다. MQL 공급 장치는 독일 VOGEL사의 Vario UFV10-001로 외부급유방식 및 내부급유방식에 모두 적용할 수 있고 세부사양은 Table 2와 같다.

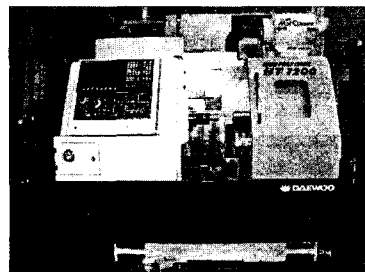


Fig. 4 Experimental equipments

Table 2. Specification of MQL Supply

Oil droplet size ( $\mu\text{m}$ )	Aerosol quantity ( $\text{ml/h}$ )	Air consumption ( $\text{NI/min}$ )
0.5	5~150	140~300

또한 특성치인 표면조도를 보기위해 Mitutoyo사의 Surftest SV-624를 이용하여 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다. 측정 부위는 Fig. 5에 보이는 것과 같은 순서와 방향으로 120도씩 회전시켜 3회 측정하여 평균을 이용하였다. 측정시 Cut-off value, Sampling Length, Evaluation Length 등의 선정은 JIS규격을 참조하여 Table 3과 같이 하였다.

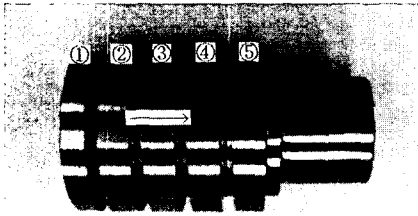


Fig. 5 Measuring point and direction

Table 3 Standard values of evaluation, sampling lengths if determining Ra

Cut-off value ( $\text{mm}$ )	Sampling Length ( $\text{mm}$ )	No. of sampling length	Evaluation Length ( $\text{mm}$ )
0.8	0.8	5	4.0

실험방법은 Fig. 6에 보이는 바와 같이 시편과 공구를 장착하고 정삭조건으로 원통 외경 선삭을 실시하였다. 실험배치는 분할법 (Split-plot design)으로 랜덤하게 배치하여 2회 반복하였다. 인자는 절삭속도, 피드, MQL량, 절삭깊이로 선정하였고 절삭깊이는 0.3mm로 고정시키고 나머지는 Table 4와 같이 3수준으로 하였다.

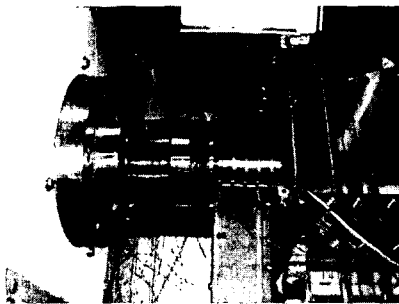


Fig. 6 Workpiece set-up

Table 4 Split-plot design

Repeat 1				
Cutting order	Design order	MQL quantity	Cutting speed	Feed rate
IX	1	150	180	0.15
	2	150	250	0.10
	3	150	180	0.20
	4	150	180	0.10
	5	150	220	0.15
X	6	150	220	0.20
	7	150	250	0.20
	8	150	250	0.15
I	9	150	220	0.10
	10	10	220	0.20
	11	10	180	0.15
	12	10	250	0.20
II	13	10	220	0.15
	14	10	250	0.15
	15	10	180	0.20
	16	10	250	0.10
V	17	10	180	0.10
	18	10	220	0.10
	19	80	180	0.20
VI	20	80	220	0.20
	21	80	180	0.15
	22	80	250	0.15
VII	23	80	220	0.10
	24	80	250	0.10
	25	80	180	0.10
	26	80	220	0.15
	27	80	250	0.20
Repeat 2				
VIII	1	80	180	0.15
	2	80	250	0.20
	3	80	220	0.20
	4	80	220	0.15
	5	80	250	0.10
IX	6	80	180	0.10
	7	80	180	0.20
	8	80	220	0.10
	9	80	250	0.15
X	10	10	180	0.20
	11	10	220	0.20
	12	10	180	0.10
	13	10	180	0.15
	14	10	250	0.15
XI	15	10	220	0.10
	16	10	220	0.15
	17	10	250	0.20
	18	10	250	0.10
XII	19	150	220	0.10
	20	150	250	0.20
	21	150	220	0.15
	22	150	180	0.20
	23	150	180	0.15
XIII	24	150	220	0.20
	25	150	180	0.10
	26	150	250	0.10
	27	150	250	0.15

MQL 공급방향과 Nozzle의 직경 및 형상에 따라 가공 특성이 달라질 수 있으므로 본 실험에서는 Fig. 7과 같이 Nozzle-Tip 간의 거리는 19mm로 하여 MQL을 45도 방향의 경사면상에 공급하였다. Nozzle은 내경이 2 $\phi$ 인 일 반 동관을 사용하였다. MQL Supply에 공급되는 Air

pressure는 45Psi로 하였고 사용된 절삭유는 LubriFluid F100으로 사양은 Table 5와 같다.

Table 5 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

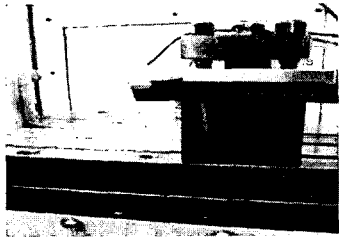


Fig. 7 Nozzle set-up

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 분산분석 결과

각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 얻어진 데이터를 통계적 방법으로 분석해보고 그래프화해 보았다. 통계적 방법으로는 MINITAB을 사용하여 분산분석을 실시했다. Table 6은 분산분석의 결과를 보여주고 있다. 여기에 보이는 바와 같이 A(MQL 량)인자, C(이송량)인자 그리고 A\*C의 교호작용이 표면거칠기에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 기존의 Wet cutting에서 유효한 것으로 알려져 있는 절삭속도의 영향은 거의 없는 것으로 나왔다.

Table 6 The result of ANOVA

Factor	DF	SS	MS	F	P
A	2	4.5399	2.26997	101.30	0.000
B	2	0.0199	0.00996	0.44	0.646
C	2	2.3749	1.18744	52.99	0.000
A*B	4	0.0011	0.00028	0.01	1.000
A*C	4	0.4388	0.1097	4.90	0.004
B*C	4	0.0273	0.00682	0.30	0.872
A*B*C	8	0.0345	0.00431	0.19	0.990

### 4.2 MQL량에 따른 표면거칠기

MQL 가공에서의 미스트는 일반적인 절삭유제의 효과와

는 다르다. 미세한 미스트 입자는 가공점에 대한 침투성과 습윤성이 뛰어나고 접촉 표면적을 늘이므로 윤활효과가 크다는 보고가 있다. 여기서 미스트 입자의 크기와 유속은 MQL을 반송할 수 있는 거리나 미스트의 액상화에 큰 영향을 미치는 데 일반적으로 분사압력과 미스트 입자지름은 반비례하고, 속도의 변화는 분사압의 제곱근의 함수라고 알려져 있다. 따라서 절삭유의 고압분사를 통하여 작은 미스트 입자지름과 높은 유속을 얻을 수 있다.

Fig. 8-10은 MQL량에 따른 표면거칠기를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 MQL량이 증가함에 따라 표면거칠기가 점차 나빠지고 있다. 이것은 여러 가지 원인이 있겠지만 공기량의 부족이 제일 큰 원인으로 생각된다. 본 실험에서는 약 3기압의 공기압으로 공기를 공급하였는데 이것은 MQL Supply 공급업체의 추천압력인 6기압에 많이 못 미친다. 즉 앞서 언급한 바와 같이 공기량의 부족으로 인해 미스트의 유속이 떨어지고, 낮은 유속으로 인해 미스트의 침투성이나 액상화가 잘 이루어지지 않아 MQL 도출량이 증가함에도 불구하고 표면거칠기가 나빠진 것으로 판단된다.

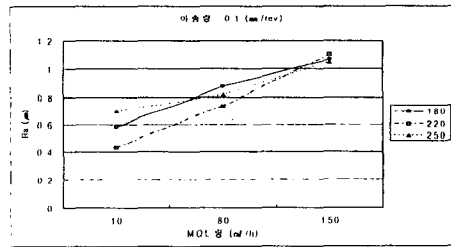


Fig. 8 Effect of MQL quantity on surface roughness

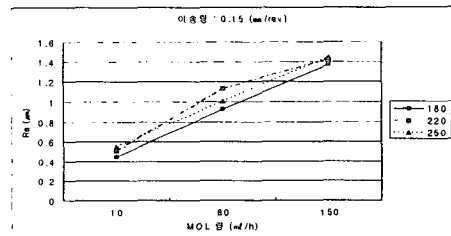


Fig. 9 Effect of MQL quantity on surface roughness

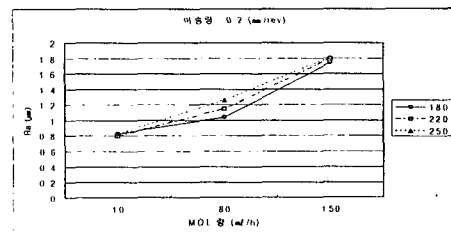


Fig. 10 Effect of MQL quantity on surface roughness

### 4.3 이송량에 따른 표면거칠기

Fig. 11~13은 이송량의 변화에 따른 표면거칠기를 보여주고 있다. MQL량이 150ml/h, 80ml/h일 때는 이송량이 증가함에 따라 거의 선형적으로 표면거칠기가 증가하는 반면 10ml/h일때는 이송량이 0.15mm/rev일 때 가장 양호한 표면거칠기를 얻는 것으로 나타났다. 이는 일반적인 Wet cutting에서의 경향과 동일하다. 여기서 MQL량이 적을 때 이송량의 증가에 따른 표면거칠기의 증가가 조금 완만한 것을 알 수 있다. 이것은 MQL 가공에서는 윤활작용은 미스트가 냉각작용과 칩 배출작용은 압축공기가 담당하는데 MQL의 토출량이 적을 때 압축공기가 더 유효하게 작용하여 칩의 간섭 등 표면거칠기에 악영향을 끼치는 원인을 억제한 것으로 판단된다.

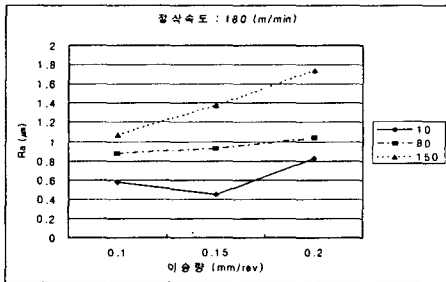


Fig. 11 Effect of feed rate on surface roughness

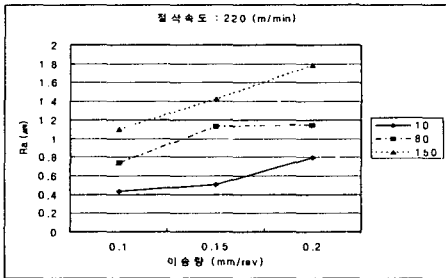


Fig. 12 Effect of feed rate on surface roughness

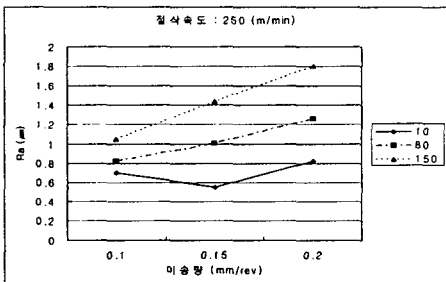


Fig. 13 Effect of feed rate on surface roughness

### 4.4 절삭속도에 따른 표면거칠기

Fig. 14~16은 절삭속도의 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 보여주고 있다. 분산분석 결과에서 확인하였듯이 절삭속도의 변화에 의한 표면거칠기의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 일반적으로 저속에서 고속으로 갈수록 표면거칠기가 양호해지고 약130~150m/min이상의 절삭속도에서는 표면거칠기의 변화 양상이 완만해 진다는 결과가 많이 발표되어있다. 즉 MQL 가공에서도 일반적인 Wet cutting에서의 경우와 같이 고속절삭시 구성인선의 소멸로 표면거칠기가 완만하게 유지되는 것으로 판단된다. 본 실험에서 MQL 토출량이 적을 경우 절삭속도 220m/min, 이송량 0.1mm/rev에서 가장 양호한 표면거칠기가 나타났다. 여기에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

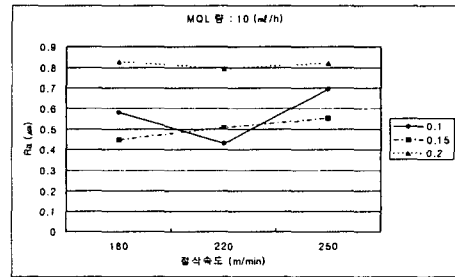


Fig. 14 Effect of cutting speed on surface roughness

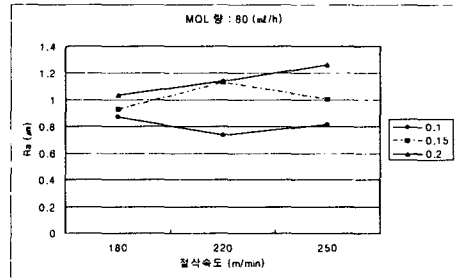


Fig. 15 Effect of cutting speed on surface roughness

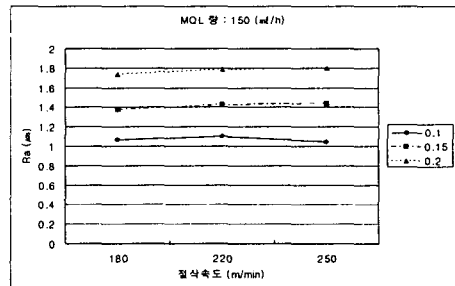


Fig. 16 Effect of cutting speed on surface roughness

## 5. 결론

MQL 선삭 가공시 가공조건에 따른 표면거칠기의 영향을 조사하기 위해, MQL 전용기에서 절삭조건을 변화시키면서 기계구조용 탄소강 SM45C를 원통 외경 선삭하여 그 결과를 분석해보았다. 본 실험에서 수행한 가공조건에서의 각 조건에 의한 영향 및 경향은 다음과 같다.

1. 본 실험의 조건과 동일한 조건에서의 Wet cutting을 실시하지 않았기에 직접적인 비교는 불가능하지만 일반적으로 소개된 유사한 경우의 Wet cutting 경우보다 표면거칠기가 양호한 것으로 나왔다. 이 결과는 표면조도 관점에서는 MQL 가공이 우수하다는 기존의 연구발표 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

2. MQL 선삭 가공에서는 절삭속도보다는 MQL 량과 이송량이 표면거칠기에 주요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이 중 MQL 토출량이 가장 큰 영향을 미치고 토출량 10ml/h, 이송량 0.1mm/rev, 절삭속도 220m/min 일 때 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이는 공급 공기압의 영향 때문인 것으로 판단된다. 즉 공급 공기압이 낮을 경우 공급되는 미스트의 유속이 떨어지고 이로 인해 미스트의 침투성이나 액상화가 떨어지는 것으로 판단된다. 따라서 MQL 선삭가공에서는 공급 공기압 또한 중요한 가공변수가 된다.

향후 연구과제로는 본 실험에서는 MQL 토출량을 10, 80, 150ml/h의 3수준으로 나누어 실험하였으나, 지금 현재 소개된 대부분의 MQL 가공 기술에 대한 정의에서 MQL 가공은 수-50ml/h이하의 량으로 정의하고 있다. 따라서 추후 좀더 세분화된 수준에서의 MQL 토출량의 영향에 대한 조사가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 이번 실험에서는 Nozzle의 형상 및 직경에 대한 영향을 고려하지 않았으나 이것에 의한 표면거칠기에의 영향이 클 것으로 판단되고, 또한 공급 공기압에 따라 미스트의 유속이 달라지고 이로 인해 미스트의 가공점에서의 거동이 달라지는 것으로 판단되므로 이에 대한 추가적인 고찰이 필요한 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 (주)대우종합기계의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) M. Rahman, A. Senthil Kumar, M.U. Salam, 2002, " Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling",

*International Journal of Machine Tools & Manufacture*, pp. 539~547.

- (2) Anselmo Eduardo Diniz, 2002, "Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting", *International Journal of Machine Tools&Manufacture*, pp. 899~904.
- (3) P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, 2000, "Dry machining : Machining of the future", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 287~291.
- (4) Y. Beauchamp, M. Tomas, J. Masounave and A. Youssef, 1996, "Investigation of cutting parameter effects on surface roughness in lathe boring operation by use of a full factorial design", *Computer ind. Eng.*, pp. 645~651.
- (5) Park T. J., Yang S. H., Lee Y. M., and Kim S. K., 2001, "Temperature Analysis of Each Coolant Level by a Multiple Comparison in Turning Process", *Journal of KSPE*, Vol. 18, No. 12, pp. 110~115.
- (6) Ronan Autret, Steven Y. Liang, George W., 2003, "Minimum Quantity Lubrication in Finish Hard Turning", *HNICEM*.
- (7) J. Paulo Davim, 2003, "Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays", *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 340~344
- (8) A. Senthil Kumar, M. Rahman, S. L. Ng, 2002, "Effect of High-Pressure Coolant on Machining Performance", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 83~91