

## 오일미스트 조건에서의 금형강의 최적절삭조건

김상민\*, 김준현\*, 김주현+  
(논문접수일 2005. 11. 7, 심사완료일 2006. 2. 6)

### Optimum Machining Condition of Die Steel In The Oil-mist Condition

Kim, Sang-Min\*, Kim, Joon-Hyun\*, Kim, Joo-Hyun+

#### Abstract

The purposes of using cutting fluid during cutting have been cooling, lubricating, chip washing and anti-corroding. However, the present manufacturing industry restricts the use of cutting fluid because cutting fluid contains poisonous substances which are harmful to the human body. Therefore environmentally conscious machining and technology have more important position in machining process because cutting fluids have significant influence on the environment in milling process. In this study, environmentally conscious machining can be obtained by the way of selecting the optimum machining condition using the design of experiment. Cutting using oil-mist showed better cutting characteristics than dry, air and fluid cutting with respect to by cutting force, tool wear and surface roughness. Also, the optimum machining condition for cutting using oil-mist could be selected through Taguchi method.

**Key Words** : environmentally conscious machining(환경친화가공), oil-mist(오일 미스트), design of experiment(실험계획법)

## 1. 서론

최근 생산성 향상을 위한 기계가공은 고정밀화, 고속화, 자동화의 방향으로 나아가고 있으며, 또 하나의 큰 방향은 환경친화적 가공법이다. 오늘날 환경문제는 모든 사업분야의 전반에 걸쳐 큰 문제로 대두되고 있으며 이러한 추세에 맞추어 제조분야 역시 전 공정에서 환경문제를 고려하지 않을 수 없게 되었다. 절삭가공시 발생하는 환경오염문제에

는 사용수명이 다 된 폐유, 폐공구, 칩 처리문제 그리고 절삭유가 작업자에게 미치는 건강과 관련된 문제등이 있다<sup>(1)</sup>. 이중 절삭유는 절삭과정동안에 냉각작용, 윤활작용, 칩처리작용 그리고 부식방지작용의 이점으로 절삭가공시 발생하는 공작물과 칩 사이에 발생하는 절삭열을 효과적으로 제어할 수 있지만 작업자의 건강 뿐만 아니라 수질오염 및 환경오염이 대단히 염려스러운 현실이다. 또한 화재가능성, 악취, 박테리아발생, 노동환경악화, 폐액의 지하침투로 인한 토양

\* 국민대학교 자동차공학전문대학원  
+ 교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부 (kim@kookmin.ac.kr)  
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1

오염 또한 정밀기계의 부식성등 여러 가지 환경문제를 안고 있다. 따라서 국내에서는 이러한 문제들을 중심으로 생산기술의 개선이 요구되는 시점이고 대외적으로는 ISO14000, Green Round, 도교협약 등 일련의 환경관련 국제규제, 신무역장벽의 형성 등이 향후 대외경쟁력 확보에 커다란 걸림돌로 작용할 수 있으리라 판단된다. 또한, 국가간 무역에도 큰 영향을 미칠수 있으므로 오염배출물질의 경감은 국제 경쟁력의 관건이 될 뿐만 아니라, 궁극적으로 쾌적한 삶을 위한 지구환경의 보정차원에서도 매우 중요하다. 이러한 시대안적 요구는 생산성 뿐만 아니라, 환경적 측면을 모두 고려할 수 있는 환경친화적 기계가공 공정의 개선 또는 개발의 필요성이 시급함을 의미하는 것이다<sup>(2-4)</sup>. 이러한 절삭유 사용에 따른 환경문제는 환경에 유해하지 않은 절삭유의 개발<sup>(5)</sup>, 절삭유를 사용하지 않는 건식절삭법<sup>(6,7)</sup>, 절삭유의 사용을 최소화하는 최소절삭유량절삭법<sup>(8)</sup> 등 환경친화적인 가공방법에 관련된 많은 연구가 필요로 하게 만들었다.

이와 같은 배경에서 절삭유제를 전혀 사용하지 않는 dry 절삭공법 또는 절삭유제의 사용량을 최소화하는 semi-dry 절삭공법에 대한 연구개발이 큰 관심속에서 진행되고 있다.

그러므로 본 논문에서는 semi-dry 절삭방법중 하나인 오일미스트(oil-mist)를 사용하여 실제가공에서 필요로 하는 절삭유의 기능을 얼마나 만족시키는지를 연구하였다. 시편은 일반적으로 금형재료에 많이 사용되는 NAK80을 사용하였으며 공구는 TiN 코팅된 고속도강(HSS) 엔드밀을 사용하였다. 그리고 실험횟수를 최소화 할 수 있는 장점을 가지는 직교배열법을 이용해 실험을 수행한 후 다구찌 실험 계획법을 통해 각각의 인자에 대한 SN비(Signal to Noise ratio)를 분석하여 절삭력, 공구마모, 표면거칠기에 영향을 미치는 요인을 분석하였고, 최적조건을 선정하여 기계의 특성을 잘 모르는 사용자도 적절한 가공조건을 선택할 수 있는 방법을 연구하고자 한다. 그 결과를 고찰함으로써, 기계가공성과 환경친화성을 동시에 고려할 수 있는 ‘환경친화적 기계가공 기술’ 확립의 기초자료를 마련하는데 그 목표를 두었다. 또한 사업장내 환경, 위생, 안전측면에서의 피해를 근원적으로 이해하고 줄여나갈 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 실험은 일반적인 건식방법과 절삭유를 이용한 습식방

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Milling Machine	HWA CHEON	SIRIUS-2
Dynamometer	KISTLER	9257 Type
Software	National Instruments	LabVIEW 6.1
Charge Amplifier	KISTLER	5019 Type
Optical Microscopy	Nikon	ME600 Type
Surface Roughness Tester	Mahr	Perthometer PGK 120
Rockwell Hardness Tester	Time	THR-700E
Oil-mist	NAOMI TECH	CF01

법 그리고 압축공기를 이용한 방법과 오일미스트를 이용한 semi-dry 절삭방법들을 비교하고, 절삭조건이 가공특성에 어떤 영향을 얼마나 미치는지 확인하기 위해 Table 1과 같은 장비들을 사용하였다.

실험에 사용된 공구는  $\varnothing 10$ 인 두날 엔드밀로 이루어진 고속도강(HSS)을 TiN코팅한 공구를 사용하였다. 실험용 피삭재는 크기가  $200 \times 100 \times 50$ 인 금형재료에 일반적으로 사용되고 있는 합금공구강(NAK80)을 사용하였다. 압축공기는 0.5MPa로 항상 일정하게 사용하였고 오일미스트는 100% 식물성 에스테르계 오일을 5cc/h로 압축공기와 혼합하여 사용되며 습식은 수용성 절삭유로 1:10배로 사용하였다.

### 2.2 실험방법

본 실험의 목적으로 건식, 습식, 압축공기 그리고 오일미스트를 이용한 semi-dry 절삭방법들을 비교하여, 오일미스트가 다른 절삭가공 방법들 보다 공구마모, 절삭력, 표면 거칠기 면에서 얼마나 더 효율적인지 알아보고, 최적 절삭 가공조건을 결정하기 위해 MINITAB을 이용한 다구찌 실험 계획법을 사용하였다. 우선 MINITAB을 이용해 절삭조건을 나열하여 실험에 필요한  $L_{16}(4^4)$ 의 직교배열표를 완성하였다. Table 2는 본 실험의 절삭조건을 나타내 모든 실험은 이 절삭조건에 따라 실험하였다.

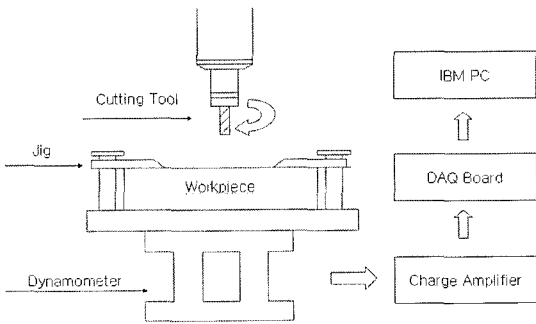
공구마모를 측정하기 위하여 NIKON사의 Optical Microscopy(ME600 Type)를 이용하였으며 플랭크 마모를 측정

**Table 2 Cutting conditions**

Cutter diameter(mm)	10
Spindle speed(rpm)	2000, 3000, 4000, 5000
Feed speed(mm/min)	150, 200, 250, 300
Width of cut(mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Type of lubricant	oil-mist, fluid, air, dry
Cutting length(mm)	3000
Depth of cut(mm)	5

**Table 3 The process of cutting test**

No.	Spindle speed (rpm)	Feed speed (mm/min)	Width of cut (mm)	lubricant
1	2000	150	0.1	oil-mist
2	2000	200	0.2	fluid
3	2000	250	0.3	air
4	2000	300	0.4	dry
5	3000	150	0.2	air
6	3000	200	0.1	dry
7	3000	250	0.4	oil-mist
8	3000	300	0.3	fluid
9	4000	150	0.3	dry
10	4000	200	0.4	air
11	4000	250	0.1	fluid
12	4000	300	0.2	oil-mist
13	5000	150	0.4	fluid
14	5000	200	0.3	oil-mist
15	5000	250	0.2	dry
16	5000	300	0.1	air



**Fig. 1 Schematic diagram of cutting force measurement**

하였다. 또한 표면 거칠기를 측정하기 위하여 Mahr사의 Perthometer PGK 120 모델을 사용 하였으며 중심선 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다.

또한 절삭력을 측정하기 위하여 KISTLER사의 공구동력계(9257 Type)를 이용하였다. 측정된 데이터는 Charge Amplifier(5019 Type)를 통하여 신호가 증폭이 되어 A/D 변환기를 통해 데이터가 수치화 된다. 수치화된 데이터를 통해 주분력(Principal force)을 IBM PC를 통해 확인하였다. Fig. 1은 이 과정을 표시한 Virtual instrument system을 나타내었다. 최적가공조건을 선정하기 위하여 다구저 실험계획법을 이용하였다. 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기에 영향을 미치는 요인을 비교하였고, 각각의 인자에 대한 SN비를 분석하여 최적 가공조건을 선정하였다. 이때 절삭력, 공구마모, 표면 거칠기는 낮을수록 좋으므로 망소특성에 대한 공식을 적용하여 각 실험번호별 SN비로 전환시켰다.

그리고 선정된 최적가공조건을 기준으로 오일미스트와 습식, 압축공기들을 이용하여 절삭길이를 각각 6000, 9000, 12000(mm)까지 증가시키면서 측정된 공구마모와 표면거칠기 값들을 각각 비교·분석해 보았다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Table 3은 실험 순서에 따른 실험 조건을 나타낸 직교 배열표이다. 모든 실험은 이 직교 배열표에 따라 실험하였다.

#### 3.1 공구마모

Fig. 2는 공구마모를 측정된 결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 3은 SN비 분석결과를 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 실험 7, 12, 14과 같이 오일미스트를 이용한 절삭가공이 대체적으로 다른 절삭가공들에 비해서 공구마모가 작게나온 것을 볼 수 있고, 실험 13, 15와 같이 회전속도와 절삭폭의 값이 클 경우에는 공구마모가 커지는 것을 볼 수 있다. 또 SN비 분석결과에서 볼 수 있듯이 다른 요소들에 비해서 이송속도는 공구마모에 큰 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 공구마모는 회전속도, 절삭폭 그리고 절삭유기법들에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

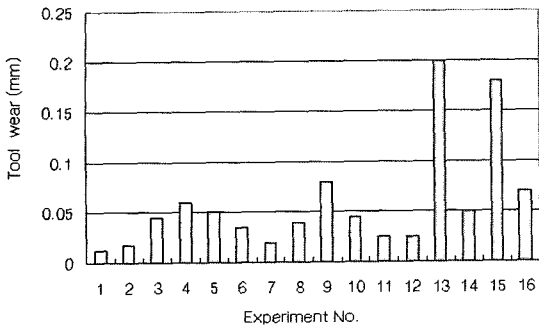


Fig. 2 Tool wear for each experiment condition

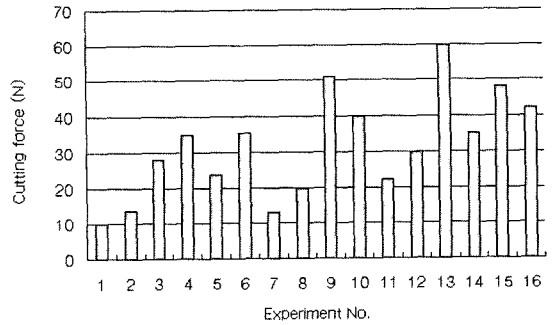


Fig. 4 Cutting force for each experiment condition

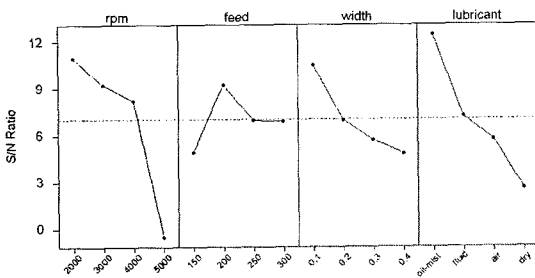


Fig. 3 Comparison of SN ratios for tool wear

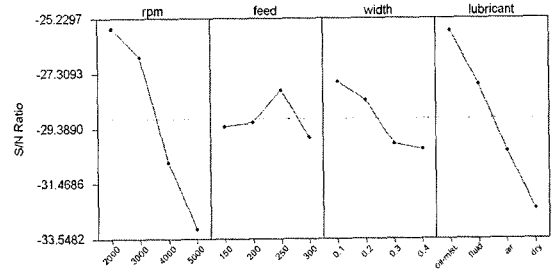


Fig. 5 Comparison of SN ratios for cutting force

### 3.2 절삭력

Fig. 4는 절삭력을 측정된 결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 5는 SN비 분석결과를 나타낸 그래프이다. 측정된 절삭력값은 주분력(principal force)이다.

그래프를 보면 오일미스트를 이용한 절삭가공이 대체적으로 다른 절삭가공들에 비해서 절삭력 값이 더 낮게 나온 것을 볼 수 있고 실험 9, 13과 같이 회전속도와 절삭폭의 값이 클 경우에는 절삭력의 값이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. SN비 분석결과를 보면 이송속도는 공구마모와 비슷하게 절삭력에 큰 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 절삭력은 회전속도, 절삭폭 그리고 절삭유 기법들 요소들에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

### 3.3 표면거칠기

Fig. 6은 표면거칠기를 측정된 결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 7은 SN비 분석결과를 나타낸 그래프이다. 전체적으로 오일미스트를 이용한 절삭가공이 다른 절삭가공들에 비해서 표면거칠기 값이 더 좋게 나온 것을 볼 수 있다. 실험 4, 15와 같이 절삭유를 사용하지 않는 건삭가공법과 절삭폭의 값이 큰 절삭조건일 경우 표면거칠기 값이 큰 것을 볼 수 있고.

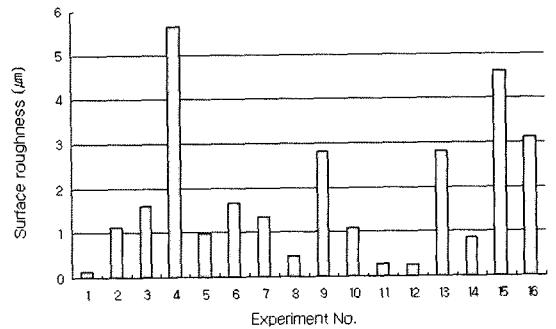


Fig. 6 Surface roughness for each experiment condition

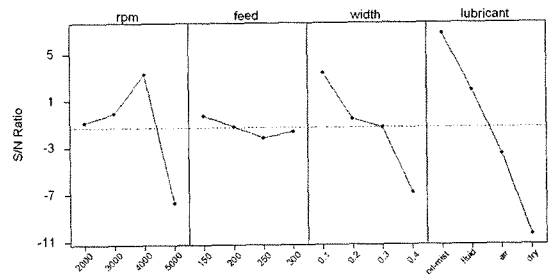


Fig. 7 Comparison of SN ratios for surface roughness

SN비 분석결과를 보면 이송속도는 별 큰 영향을 못미치는 것을 볼 수 있다. 따라서 표면거칠기는 회전속도, 절삭폭 그리고 절삭유 기법들의 요소들에 의해 많은 영향을 받는것을 볼 수 있다.

### 3.4 최적 가공조건 선정

위 실험을 통해서 오일미스트를 이용한 절삭가공이 다른 절삭가공들 보다 공구마모, 절삭력, 표면거칠기 면에서 더 좋은 결과를 볼 수 있었다. 따라서 다구찌 실험계획법을 통해서 최적 가공조건을 선정하였다.

Table 4는 실험결과와 각각의 SN비를 나타내었고 그리고 모든 실험결과를 기준으로 망소특성합수를 이용한 전체적인 SN비를 나타내었다. Table 5는 모든 인자에 대한 각각의 결과 값의 최적 가공조건과 모든 결과 값의 최종 최적가공조건을 나타낸 표이다. Fig. 8은 최종 최적가공조건인 SN비를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 9는 위에서 선정된 최종 최적가공조건의 검증실험이다. 검증실험은 각각 5회 반복실험 하였다. 반복된 검증실험을 통하여 실험계획법으로 구해진 최종 최적가공조건으로

가공을 하면 공구마모, 절삭력 그리고 표면거칠기 면에서 더 좋은 절삭특성을 얻는 것을 알 수 있다.

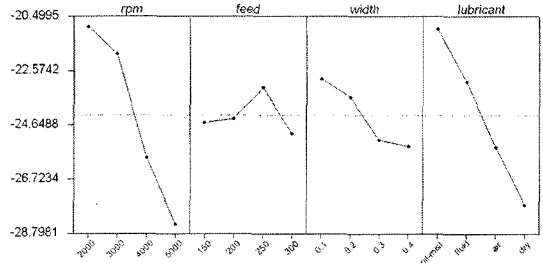


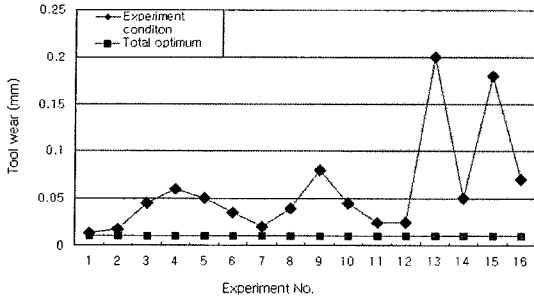
Fig. 8 Comparison of SN ratios for overall conditions

Table 5 Optimum machining conditions

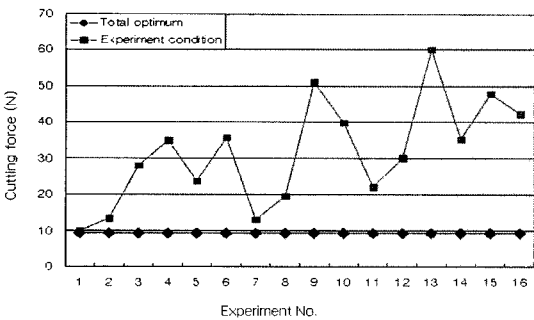
	rpm	feed	width	lubricant
Cutting force	2000	250	0.1	oil-mist
Tool wear	2000	200	0.1	oil-mist
Surface roughness	4000	150	0.1	oil-mist
overall	2000	250	0.1	oil-mist

Table 4 Experimented results

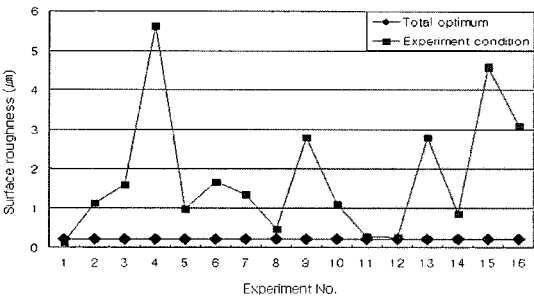
No.	Tool wear	SN <sub>TW</sub>	Cutting force	SN <sub>CF</sub>	Surface roughness	SN <sub>SR</sub>	SN
1	0.013	37.721	10	-20	0.15	16.4782	-15.2298
2	0.018	34.895	13.5	-22.6067	1.13	-1.0616	-17.8658
3	0.045	26.936	28	-28.9432	1.6	-4.0824	-24.1861
4	0.06	24.437	35	-30.8814	5.64	-15.0256	-26.2215
5	0.05	26.021	23.65	-27.4766	0.98	0.1755	-22.7129
6	0.035	29.119	35.62	-31.0339	1.68	-4.5062	-26.2723
7	0.02	33.980	13	-22.2789	1.34	-2.5421	-17.5536
8	0.04	27.959	19.6	-25.8451	0.48	6.3752	-21.0765
9	0.08	21.938	51.03	-34.1565	2.8	-8.9432	-29.3984
10	0.045	26.936	39.8	-31.9977	1.1	-0.8279	-27.2298
11	0.025	32.041	22.13	-26.8996	0.28	11.0568	-22.1291
12	0.025	32.041	30.08	-29.5656	0.26	11.7005	-24.7947
13	0.2	13.980	60	-35.563	2.8	-8.9432	-30.8013
14	0.05	26.021	35.3	-30.9555	0.86	1.31	-26.1869
15	0.18	14.895	48	-33.6248	4.6	-13.2552	-28.8934
16	0.07	3.098	42.35	-32.5371	3.1	-9.8272	-27.7891



(a) Tool wear



(b) Cutting force

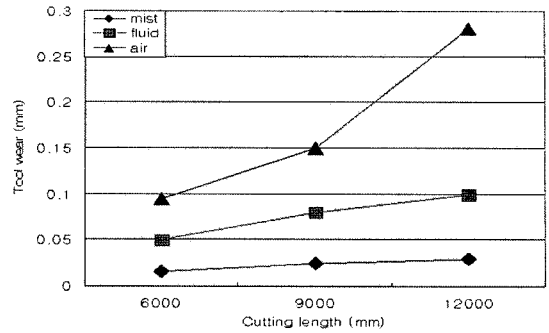


(c) Surface roughness

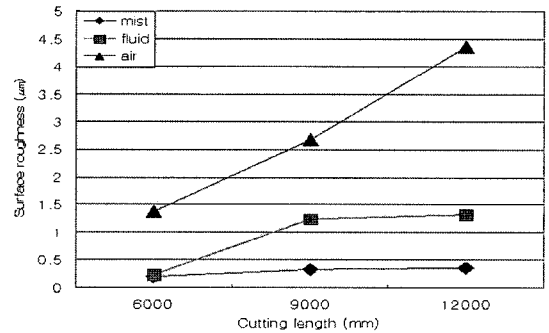
Fig. 9 Verification of final optimum condition for each experiment

### 3.5 절삭길이에 따른 실험결과

앞에서 실험계획법을 통해 얻은 최종 최적절삭조건을 기준으로 하여 절삭길이 증가에 따른 공구마모와 표면거칠기를 비교·분석해 보았다. 실험은 건삭가공을 제외한 압축공기, 습식, 오일미스트를 이용하여 실험하였고 각각 3회반복 실험하였다. Fig. 10은 절삭길이 증가에 따른 공구마모와 표면거칠기를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 절삭길이가 9,000mm까지는 모두 유사한 경향을 보이지만 12,000mm에서 건삭



(a) Tool wear



(b) Surface roughness

Fig. 10 The effect of cutting length for final optimum conditions

가공은 다른 절삭유 기법을 사용한 절삭가공들 보다 공구마모가 급격히 커지는 것을 볼 수 있고 그 결과 표면거칠기값도 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 4. 결론

오일미스트를 이용한 절삭가공이 일반적인 건삭방법과 절삭유를 이용한 습식방법 그리고 압축공기를 이용한 절삭가공들과 비교하여 절삭특성의 차이를 알아보고 오일미스트를 이용한 절삭가공의 최적 가공조건을 선정하기 위하여 실험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 오일미스트를 이용한 절삭가공이 습식, 건삭, 압축공기들 보다 공구마모, 절삭력, 표면거칠기면에서 더 좋은 절삭특성을 보였다. 이는 다른 가공법들에 비해서 절삭저항감소, 칩배출, 열 대류, 열 전도 등이 열 감소에 큰

역할을 했다고 판단된다.

- (2) 회전속도와 절삭폭의 값이 낮을수록 공구마모가 적게 일어나는 결과를 보였으며 공구수명 측면에서는 오일미스트를 이용한 경우 습식가공에 비해 약 2.6배의 향상을 보였다. 이는 오일미스트가 칩과 시편사이의 절삭열을 잘 제어할 수 있어 공구마모를 크게 감소시킨 것으로 판단된다.
- (3) 절삭력은 낮은 값의 회전속도, 절삭폭 그리고 오일미스트의 조건일때 낮은 값을 나타내었고 이는 공구수명 향상에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (4) 표면거칠기는 회전속도, 절삭폭 그리고 절삭유 기법에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었고 오일미스트는 습식보다 약 44% 더 향상되는 것을 볼 수 있었다. 이는 오일미스트 사용시 열을 빠르게 방출시켜 열과 공구마모를 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다.
- (5) 다구찌 실험계획법을 이용하여 각각의 결과에 대한 최적 조건가공을 구하고 모든 결과에 대한 최종 최적가공 조건을 구할 수 있었다.
- (6) 절삭길이가 증가할수록 오일미스트, 습식과 압축공기들을 이용한 실험들간의 공구마모와 표면거칠기 값이 점점 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 다른 절삭유 기법들보다 오일미스트를 이용한 절삭기법의 칩배출과 공구와 시편사이의 절삭열 제어로 인한 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) Aronson, R. B., 1994, "Why Dry Machining," *Manufacturing Engineering*, Vol. 114, pp. 33~36.
- (2) Greaves, I. A., Eisen, E. A., Smith, T. J. and Pother, L. J., 1997, "Respiratory Health of Automobile Workers Exposures to Metal-working Fluid Aerosols : Respiratory Symptoms," *American J. of Ind. Med.*, Vol. 32(5), pp. 450~459.
- (3) Bell, D. D., Chou, J. and Liang, S. Y., 1999, "Modeling of Cutting Fluid Effect on Shop Floor Environment," *Tribology Transactions of STLE*, Vol. 42, No. 1, pp. 168~173.
- (4) Hwang, J. and Chung, E. S., 2000, "Optimization of Cutting Fluids for Environmentally Conscious Machining," *Proceeding of Annual Conference on the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 2, pp. 948~951.
- (5) Koelsch, J. R., 1997, "Lubricity VS the Environment Cascades of Cleanness," *Manufacturing Engineering*, pp. 50~58.
- (6) Klocke, F. and Eisenblatter, G., 1997, "Dry cutting," *Keynote papers, Annals of CIRP*, Vol. 46, No. 2, pp. 519~526.
- (7) Jin, M., Noguchi, H. and Murakawa, M., 2001, "Environmentally friendly dry cutting using heat absorption tool," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 29, pp. 235~242.
- (8) Diniz, A. E., 1999, "Minimal lubrication in the drilling process of aluminum silicon ally," *Proceeding of International Machining & Grinding Conference*, Oct. 4-7, pp. 683~697.