

# 절삭유 레벨에 따른 선삭가공 절삭특성

양승한<sup>#</sup>, 이영문<sup>\*</sup>

## Cutting Characteristics Depending on Coolant Level in Turning Process

Seung-Han Yang<sup>#</sup> and Young-Moon Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

With the increasing demand of environmentally clean machining in recent years, the use of coolants has been restricted extensively. In this paper, a multiple comparison method(Tukey's HSD method) is proposed to choose the optimum level of coolant necessary for an efficient and environmentally clean machining. The cutting temperature, specific cutting energy, and surface roughness in turning process are analysed by ANOVA(Analysis Of Variance) and Tukey's HSD method. From the experimental results and statistical analysis, it is found that the optimum condition of coolant level is 10 ml/min with 6% mix ratio, which is almost half of the commonly used level.

**Key Words** : Coolant(절삭유), Cutting Temperature(절삭온도), Specific Cutting Energy(비절삭에너지), Surface Roughness(표면거칠기), Analysis of Variance(분산분석, ANOVA), Tukey's Honestly Significant Difference Method(Tukey의 HSD법)

### 기호설명

- $d$  ; depth of cut
- $f$  ; feed rate
- $F_y$  ; main cutting force
- $n$  ; repeating number
- $q (\alpha : t, v)$  ; studentized range
- $R_a$  ; arithmetic mean surface roughness
- $S^2$  ; mean square of error
- $\Delta T$  ; temperature rise
- $u$  ; specific cutting energy
- $V$  ; cutting velocity
- $\alpha$  ; confidence level

### 1. 서론

최근 국제적으로 그린라운드(Green round)로 대표되는 환경규제는 제조업에까지 적용이 되고 있으며, 제조업 중 특히 기계가공공장의 경우 절삭유에 의한 환경오염 및 작업자 건강에 미치는 유해성이 사회적인 문제로 대두되고 있다.

절삭유는 일정기간 사용하여 부패되거나, 절삭가공 시 발생하는 피삭재 및 공구 부스러기와 의 화학작용, 윤활유 혼재 등에 의해 정상적인 사용이 어렵게 되면 폐기하여야 한다. 폐절삭유는

접수일: 2003년 6월24일; 게재승인일: 2003년 11월 14일  
<sup>#</sup> 교신저자, 경북대학교 기계공학부  
 Email syang@knu.ac.kr Tel. (053) 950-6569  
 경북대학교 기계공학부

처리하기 어려운 물질이고 폐기 시 심각한 환경오염의 원인이 되고 있다. 이와 같은 절삭유 사용에의 원인이 되고 있다. 이와 같은 절삭유 사용에 따른 환경오염 및 인체에 대한 유해성 때문에 유럽에서는 이미 이에 관한 법률을 제정하여 강제적으로 그 사용을 줄이고 있다.<sup>1</sup>

절삭유의 사용은 경제적인 측면에서도 결코 바람직하지 못하다. 독일에서 수행된 연구보고서에 의하면 전체 생산원가 중 절삭유의 구매비용은 7.5%, 유지보수비용은 17%에 이르는데 반하여 공구의 비용은 4%에 불과하다.<sup>2</sup>

본 연구에서는 절삭유 사용량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 절삭유의 사용량과 혼합비율이 절삭온도, 절삭과정의 효율성을 나타내는 비절삭에너지 및 공작물의 표면 품질을 판단하는 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해 해석하였다.

해석방법으로는 선행연구<sup>3</sup>에서 절삭온도 분석에 사용된 다중비교법을 사용하였으며, 선삭가공시 여러 단계의 절삭유량 및 혼합율에 따른 공구온도, 비절삭에너지 및 표면거칠기 특성을 비교분석하였다.

## 2. 기초이론

### 2.1 절삭특성인자

본 연구에서는 절삭특성을 나타내는 인자로서 공구온도, 비절삭에너지 및 표면거칠기를 설정하였다. 공구온도는 식(1)과 같이 절삭 후 5초가 경과한 시점의 온도와 절삭전의 온도의 차 즉, 절삭 후 5초 동안 상승된 공구의 온도변화를 사용하였다.

$$\Delta T = T_5 - T_0 \quad (1)$$

여기서  $\Delta T$ 는 상승된 온도변화를,  $T_5$ 는 절삭 5초 후 온도 그리고  $T_0$ 는 절삭 전 온도를 나타낸다.

비절삭에너지는 피삭재 단위 체적 절삭 시 소요되는 에너지로 식(2)와 같이 정의된다. 비절삭에너지는 절삭입력조건에 따른 절삭특성평가를 위하여 가장 일반적으로 채택되는 파라미터이다.<sup>4</sup>

$$u = \frac{F_y V}{fdV} = \frac{F_y}{fd} \quad (2)$$

여기서  $u$ 는 비절삭에너지,  $F_y$ 는 주절삭분력(N),  $V$ 는 절삭속도(m/min),  $f$ 는 이송(mm/rev),  $d$ 는 절삭깊이(mm)이다.

공작물의 표면 품질을 결정하는 표면거칠기를 나타내기 위하여 일반적으로 산술평균 표면거칠기  $R_a$ (arithmetic mean surface roughness,  $\mu m$ )가 널리 사용되고 있으며, 식(3)과 같이 정의된다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (3)$$

여기서  $l$ 은 표면거칠기 측정길이를 나타내며,  $f(x)$ 는 측정길이에 따른 거칠기 곡선을 나타낸다.

### 2.2 다중비교

분산분석을 통해서 얻어지는 결론은 1) 모든 평균들이 같거나 또는 2) 적어도 하나의 모 평균은 다른 모 평균들과 다르다는 것 중의 하나이다. 그러나 분산분석만으로는 평균들간의 차이의 대소 관계에 대하여 알 수 없다. 이럴 때 사용되는 통계적 방법이 다중비교법 (multiple comparison methods) 이다.<sup>5</sup> 다중비교방법에는 Fisher's LSD, Newman-Keuls test, Tukey's HSD, Scheff's method, Duncan's Method 등이 있다.

이 중에서 실험별 오류율을 적용하는 Tukey의 HSD법(honestly significant difference method)은 원래 반복수가 동일하다는 가정 하에서 고안되었다.  $S^2$ 는 자유도  $\nu$ 를 갖는 오차평균제곱(mean square of error)이고 동일한 반복수를  $n$ 이라고 하면 HSD는 식(4)와 같이 주어진다.

$$HSD(W_t) = q(\alpha; t, \nu) \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad (4)$$

여기서  $q(\alpha; t, \nu)$ 는 자유도  $\nu$ 를 갖는  $t$ 개의 평균의 스튜던트화된 범위(studentized range)의 분포에서의 100(1- $\alpha$ ) 백 분위수(100%지점)이다. 만약 두 평균 차의 절대치가 HSD보다 크면 두 처리는 차이가 있다고 결론 내린다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험조건 및 실험장치

절삭실험은 선반에서 외경선삭실험을 수행하였다. 절삭공구로는 CNMG120404 MC TT 1500을 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLNR2020 K12를 사용하였다. 피삭재로는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였다.

Fig. 1 는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 절삭실험에 사용된 절삭유는 수용성 솔루블(soluble)형으로 W2종 1호이고, 상온에서 압력  $78.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ 로 공구와 공작물 접촉면 윗쪽에서 절삭유를 공급하였다.

절삭유 적용조건으로 먼저 절삭유의 혼합율은 Table 1에 나타낸 바와 같이 2%, 6%, 10%의 3단계로, 절삭유량은 none, 0.5, 10, 20 ml/min의 4단계로 나누었다. 상기조건 중 통상적으로 사용되는 절삭유 적용 조건은 10%~ 20 ml/min이다.

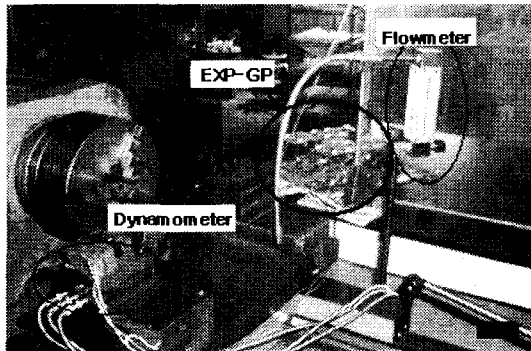


Fig. 1 Experiment set up

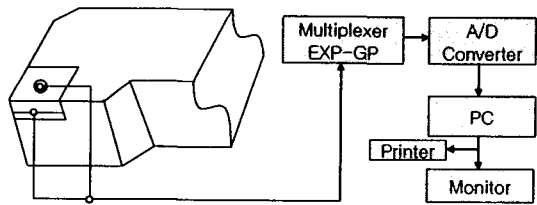


Fig. 2 Schematic diagram of cutting temperature measurement

Fig. 2 는 절삭온도 측정 장치의 개략도로서, K-type 열전대와 다채널 신호수신기(EXP-GP) 및 A/D 변환기를 통하여 마이크로 컴퓨터에서 공구

상면중심부와 측면중심부의 절삭개시 시와 절삭개시 5초 후의 온도차를 구하였다.

절삭성능을 평가하기 위하여 공구동력계(Kistler 9257A)로 절삭력을 측정하여 비절삭에너지를 구하였다. 또한 절삭가공이 끝난 공작물 표면의 축방향 표면거칠기를 표면조도계(Mitutoyo Surftest 500)로 측정하였으며, 중심선 평균거칠기( $R_a$ )값으로 나타내었다.

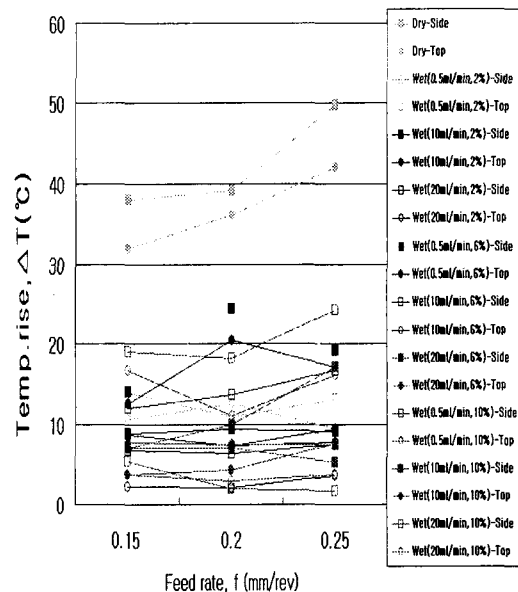
절삭실험에서 절삭조건 3인자(절삭속도, 이송, 절삭깊이)는 Table 1에 나타낸 바와 같이 3가지 수준으로 하였다. 따라서 총 절삭실험 횟수는 270 회이었다.

Table 1 Cutting conditions

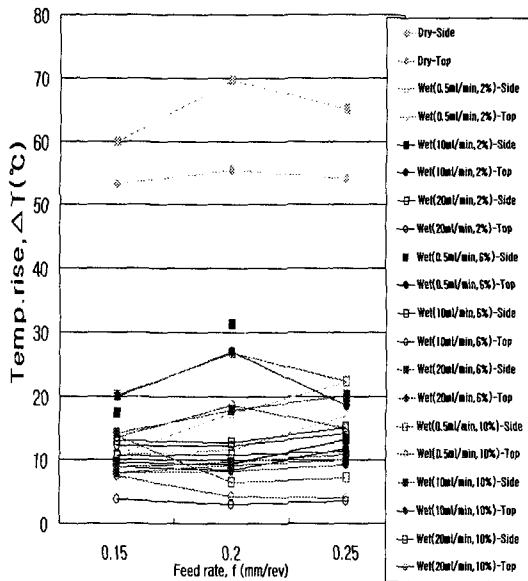
Cutting parameter	1	2	3	4
Mix ratio (%)	2	6	10	
Coolant (ml/min)	none	0.5	10	20
Cutting speed, $V$ (m/min)	80	140	200	
Feed rate, $f$ (mm/rev)	0.15	0.20	0.25	
Depth of cut, $d$ (mm)	0.5	1.0	1.5	

#### 3.2 실험결과 및 고찰

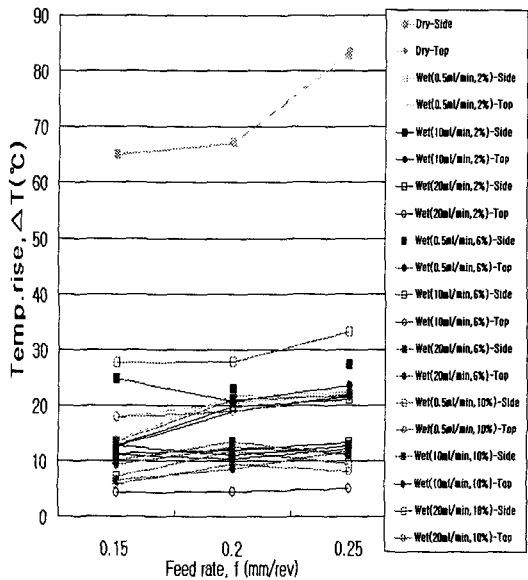
##### 3.2.1 공구온도



(a)Depth of cut (0.5mm)



(b)Depth of cut (1.0mm)



(c)Depth of cut (1.5mm)

Fig. 3 Temperature rise( $\Delta T$ ) at cutting speed 140 m/min

Fig. 3 은 절삭속도 140 m/min 경우 온도 상승량  $\Delta T$ 를 구한 값을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭유가 none인 단계가 절삭유를 사용한 단계에 비해 현저히 큰 온도 상승량을 나타내고 있다. 그러나 절삭유 혼합율이 유량에 비해 온도상승에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다. Table 2는 절삭속도가 140 m/min인 경우의 실험결과를 이용하여 분산분석을 행한 결과를 나타낸 것이다.

Table 2 ANOVA - Test

(a) Temperature at side of the insert ( $V=140$  m/min)

	S	D.O.F	$v$	$F_0$	F(0.05)
Coolant	18999.42	9	2111.046	58.80965	2.04
Error	2871.7	80	35.89626		
Total	21871.12	89			

(b) Temperature at top of the insert ( $V=140$  m/min)

	S	D.O.F	$v$	$F_0$	F(0.05)
Coolant	17202.83	9	1911.426	53.28247	2.04
Error	2869.875	89	35.87344		
Total	20072.71	89			

표에서 보는 바와 같이 검정통계량  $F_0$ 값이 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서의 기각치 2.04보다 크므로 귀무가설  $H_0: a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_{10} = 0$  또는

( $H_0: \sigma_A^2 = 0$ )은 기각된다. 이상의 결과로서 절삭유는 유의수준 5%로 수준간에 차이가 있으며 공구의 온도에 영향을 미치는 것이 확실하다. 그러나 이러한 분산분석만으로는 절삭유 단계간의 차이가 있음을 알 수 있을 뿐 정확히 어느 단계에서 차이가 나는지는 알 수 없다. 즉, Fig. 3의 그래프에 나타난 바와 같이 각 단계간의 온도평균의 차이가 있음을 알 수 있으나 절삭유를 사용하는 경우의 온도변화가 유사한지의 여부를 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 어느 단계가 차이가 있으며, 어느 단계가 차이가 없는지를 알기 위해서 다중비교법 중의 하나인 Tukey의 HSD법을 행하였다. Table 3은 Tukey의 HSD법을 시행한 결과를 나타낸 것이다.

Table 3 Tukey's HSD method( $\alpha = 0.01$ )

(a) Temperature at side of the insert ( $V=140$  m/min)

	Dry	2%,0.5	2%,10	2%,20	6%,0.5	6%,10	6%,20	10%,0.5	10%,10	10%,20
Dry	0	-43.1	-48.9	-49.7	-37.3	-44.4	-43.8	-35.2	-50.6	-52.4
2%,0.5		0	-5.798	-6.524	5.8739	-1.263	-0.637	7.8961	-7.48	-9.299
2%,10			0	-0.726	11.67	4.5348	5.1013	13.69	-1.682	-3.501
2%,20				0	12.4	5.2606	5.8271	14.42	-0.956	-2.775
6%,0.5					0	-7.137	-6.57	2.0221	-13.4	-15.2
6%,10						0	0.5665	9.1531	-6.217	-8.036
6%,20							0	8.5926	-6.783	-8.602
10%,0.5		HSD	10.784					0	-15.4	-17.2
10%,10									0	-1.819
10%,20										0

(b) Temperature at top of the insert ( $V=140$  m/min)

	Dry	2%,0.5	2%,10	2%,20	6%,0.5	6%,10	6%,20	10%,0.5	10%,10	10%,20
Dry	0	-39.8	-44.7	-50.7	-33.7	-41.2	-46.3	-37.6	-45.2	-48.8
2%,0.5		0	-4.834	-10.8	6.1076	-1.394	-6.422	2.241	-5.381	-8.935
2%,10			0	-6	10.94	3.4403	-1.588	7.075	-0.547	-4.101
2%,20				0	16.94	9.4401	4.412	13.07	5.4525	1.8989
6%,0.5					0	-7.501	-12.5	-3.867	-11.5	-15
6%,10						0	-5.028	3.6347	-3.988	-7.541
6%,20							0	8.6628	1.0405	-2.513
10%,0.5		HSD	10.781					0	-7.622	-11.2
10%,10									0	-3.554
10%,20										0

Tukey의 HSD법의 결과해석은 각 항들의 평균차이 값들이 HSD보다 크게 되면 유의성이 존재하는 것으로 결론을 내린다. 표에서 보는 바와 같이 건식(Dry)의 경우는 확실히 유의성이 존재함을 볼 수가 있다. 혼합물의 경우는 건식과(Dry) 습식(Wet)의 차이만이 존재함을 볼 수 있고, 유량의 경우는 건식과 습식 중 절삭유량 0.5 ml/min의 경우가 유의성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그 밖의 절삭속도 경우에도 위의 결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 이상의 결과로부터 공구온도 측면에서의 최저 절삭유 사용레벨은 유의성을 가지지 않는 레벨인 절삭유 혼합을 2%이고 절삭유량 10 ml/min인 경우라 할 수 있다.

### 3.2.2 비절삭에너지

Fig. 4는 각각의 절삭조건하에서의 절삭깊이 1.5mm인 경우의 비절삭에너지를 나타낸 그래프이다.

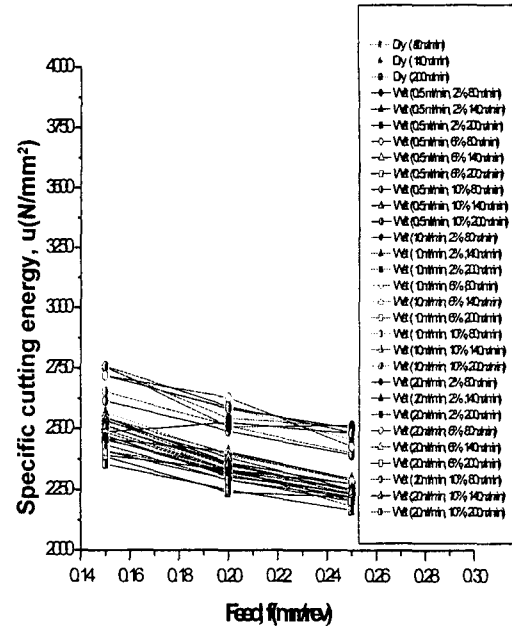


Fig. 4 Specific cutting energy at depth of cut 1.5mm

그림에서 건식이나 습식 단계간의 비절삭에너지의 차이가 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통계적인 방법을 이용하여 분석한 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 ANOVA result of coolant at each velocity (Specific cutting energy at DOC 1.5mm)

	S	D.O.F	$v$	$F_0$	F(0.05)
Coolant	168842	9	18760.2	0.39393	2.04
Error	3809863	80	47623.3		
Total	3978705	89			

표에서 보는 바와 같이 검정통계량  $F_0$ 값은 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서의 기각치 2.04보다 작음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 절삭유는 유의수준 5%로 수준간에 차이가 없고, 또한 절삭유는 비절삭에너지에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

결과적으로 비절삭에너지 측면에서는 절삭유  
의 사용유무에 따라 그 차이가 없는 것으로 나타  
났다.

### 3.2.3 표면거칠기

Fig. 5는 각각의 절삭조건 하에서의 절삭깊이  
1.5mm인 경우의 표면거칠기를 나타낸 그래프이  
다

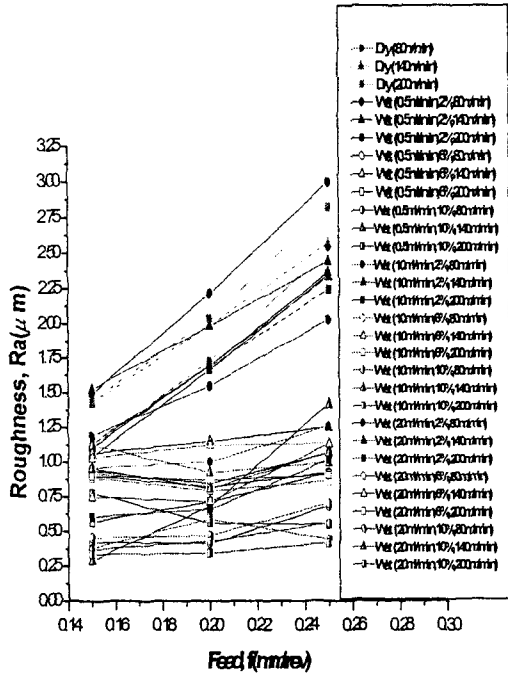


Fig. 5 Surface roughness (Ra) at depth of cut  
1.5mm

그림에서 보는 바와 같이 동일한 절삭조건하  
에서 표면거칠기 값은 혼합율에 따라 그리 크지는  
않지만 차이를 나타내고 있다.

	S	D.O.F	<i>v</i>	<i>F</i> <sub>0</sub>	F(0.05)
Coolant	15.90306	9	1.767007	13.16972	2.04
Error	10.73376	80	0.134172		
Total	26.63682	89			

Table 5 ANOVA result of a coolant at each  
velocity (Surface roughness at DOC  
1.5mm)

이를 통계적인 방법을 이용하여 분석하면 Table  
5와 같다. 표에 나타난 바와 같이 검정통계량 *F*<sub>0</sub>  
값이 유의수준 α = 0.05에서의 기각치 2.04보다 크  
므로 귀무가설  $H_0: a_1 = a_2 = a_3 = \dots = a_{10} = 0$   
또는 ( $H_0: \sigma_A^2 = 0$ )은 기각된다. 이상의 결과로  
서 절삭유는 유의수준 5%로 수준간에 차이가 있  
고, 따라서 절삭유는 표면거칠기에 영향을 미치는  
것이 확실하다. 그러나 이러한 분산분석만으로는  
절삭유 단계간의 차이가 있음을 알 수 있을 뿐 정  
확히 어느 단계가 차이가 있는지는 알 수 없다.

Table 6은 Tukey의 HSD법을 시행한 결과를 나  
타낸 것이다.

Table 6 Tukey's HSD method(α = 0.01) of coolant  
at each velocity (Surface roughness at 140  
m/min)

	Dry	2%, 0.5	2%, 10	2%, 20	6%, 0.5	6%, 10	6%, 20	10%, 0.5	10%, 10	10%, 20
Dry	0	-0.217	-0.234	0.047	-0.86	-0.85	-0.94	-1.09	-0.86	-0.99
2%, 0.5		0	-0.017	0.2636	-0.641	-0.637	-0.73	-0.87	-0.647	-0.77
2%, 10			0	0.2808	-0.624	-0.62	-0.71	-0.85	-0.63	-0.76
2%, 20				0	-0.9	-0.9	-0.99	-1.13	-0.91	-1.04
6%, 0.5					0	0.0034	-0.087	-0.229	-0.006	-0.132
6%, 10						0	-0.09	-0.233	-0.01	-0.136
6%, 20							0	-0.143	0.0807	-0.045
10%, 0.5								0	0.2232	0.0973
10%, 10									0	-0.126
10%, 20										0
		HSD	0.6593							

표에서 보는 바와 같이 혼합율에 따라서 유의  
성이 존재함을 나타낸다. 그러나 유량에 따른 유  
의성은 존재하지 않음을 알 수 있다. 즉, 표면거칠  
기는 유량에 따라서는 유의성이 없고, 혼합율에  
따라서 건식과 절삭유의 혼합율 2%에서 그 유의  
성이 존재한다. 그 밖의 절삭속도의 경우에도 위  
의 결과와 같은 경향을 나타내었다. 이상의 결과  
로 보면 표면거칠기 측면에서의 최저 절삭유 사용  
레벨은 유의성을 가지지 않는 레벨인 절삭유혼합  
율 6%이고 절삭유량 0.5 ml/min이라 할 수 있다.

해석 결과로부터 공구온도 측면에서는 2%~ 10  
ml/min을 최소 절삭유로 사용할 수 있고, 비절삭  
에너지 측면에서는 혼합율이나 절삭유와는 유의성  
이 존재하지 않는다. 반면 표면거칠기 측면에서  
살펴보면 6%~ 0.5 ml/min를 최소 절삭유로 사용하  
수 있다.

이를 최종적으로 정리하면, 절삭온도의 급격한  
상승과 피삭재의 표면거칠기에 미치는 악영향을  
방지하기 위하여 혼합율 6%, 유량 10 ml/min을 최

소 절삭유 레벨로 선정할 수 있다.

#### 4. 결 론

- (1) 효과적이고 환경친화적인 절삭을 수행하기 위한 최적 절삭유 조건을 선정하기 위한 방안으로 다중비교법을 제시하였다.
- (2) 다중비교법의 하나인 Tukey의 HSD법을 시행한 결과 공구온도측면에서 최저 절삭유 사용레벨은 유의성을 가지지 않는 레벨인 2% - 10 ml/min로 선정되었고, 표면거칠기 측면에서 최저 절삭유 사용레벨은 6% - 0.5 ml/min로 선정되었다.
- (3) 최적 절삭유조건은 6% - 10ml/min 으로 현재 통상적으로 사용되는 절삭유 사용량인 10% - 20ml/min의 대략 1/2정도이다.

#### 참고문헌

1. Byrne, G., and Scholta, E., "Environmentally Clean Machining Process - a Strategic Approach," Annals of the CIRP, Vol. 42, No. 1, pp.471-474, 1993
2. Aronson, R. B., "Why Dry Machining," Manufacturing Engineering, Vol. 114, pp.33-36, 1994.
3. Park, T. J., Yang, S. H., Lee, Y. M., and Kim, S. K., "Temperature Analysis of Each Coolant Level by a Multiple Comparison in Turning Process," J. of KSPE, Vol. 18, No. 12, pp.110-115, 2001.
4. Jawahir, I. S., Qureshi, N., and Arsecularatne, J. A., "On the Interrelationships of some Machinability Parameters in Finnish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts," Int. J. Mach Tools Manufact. Vol. 32/5, pp. 709-723, 1992.
5. Hochberg, Y., and Tamhane, A. C., "Multiple Comparison Procedures," John Wiley and Sons Inc, New York, U.S.A, 1987.