

## 유리 재료의 헬리컬 스캔 연삭 조건 실험

이대욱\* · 오창진\* · 이응석\*\* · 김옥현\*\* · 김성청\*\*

### Experiments on the Grinding Conditions for Helical Scan Grinding of a Glass Material

D.W. Lee\*, C.J. Oh\*, E.S. Lee\*\*, O.H. Kim\*\*, S.C. Kim\*\*

#### ABSTRACT

In normal grinding abrasive particles of a grinding wheel rotate on planes parallel to the direction of workpiece feed, which may induce continued scratch lines on ground surface as the workpiece feeds. Instead in helical scan grinding the planes make an angle, called a helical angle, with the feeding direction. Thus scratch lines produced by abrasive particles per one revolution are discontinued which implies that the generation of scratch lines are suppressed by the helical scan grinding.

In this study some experimental works have been done on the helical scan grinding of glass to find the effects of grinding conditions on the surface roughness and estimate the optimal grinding conditions. The helical angle, feed rate, material removal rate and the wheel speed are taken as factors for three kinds of grinding wheels i.e., coarse(#140 mesh), medium(#400) and fine(#800) diamond wheels. The experiments are scheduled by Taguchi technique and ANOVA has been carried out for the interpretation of the results.

As a result of this study effects of the factors are verified quantitatively showing that the major factors are changed according to the wheel's mesh size and the helical angle is one of the influencing factors on the surface quality.

**Key Words :** Taguchi technique(다구찌 방법), Helical scan grinding(헬리컬 스캔 연삭), Diamond grinding wheel(다이아몬드 연삭휠), Optimal grinding conditions(최적연삭조건), Grinding of glass(유리연삭), ANOVA(분산분석)

#### 1. 서론

철강 등의 연성재료의 가공은 대부분 선삭, 밀링 등의 절삭가공에 의해 형상 치수를 얻은 후, 연

✉ 2001년 3월 2일 접수  
\* 충북대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 충북대학교 공과대학 기계공학부

삭가공은 업격한 첫수 공차와 표면조도를 얻기 위한 마무리 공정으로 사용된다. 그러나 유리, 세라믹 등 츄성재료의 경우는 절삭가공이 불가능하므로 연삭가공이 형상첫수를 얻기 위한 초기 공정으로 수행되며 폴리싱에 의해 경면(mirror surface)가공 등 마무리 공정이 수행된다.<sup>(1-3)</sup> 광학 렌즈 등 유리재질의 경면가공에 있어 연삭가공은 생산성에 크게 영향을 미치는 주 공정의 하나이다.

본 연구는 유리 재료의 연삭가공에 있어 연삭조건이 연삭면의 표면조도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험 연구이다. 다구찌의 실험계획법과 ANOVA(ANalysis Of Variation) 해석을 이용하여 유리 재질의 헬리컬 스캔 연삭(helical scan grinding) 실험을 수행하였으며 그 결과를 고찰하였다. 이와 같은 연구를 통하여 주요 연삭조건의 영향을 정량적으로 비교 검토 하였으며 최적 연삭조건을 도출해 보았다. 일반적인 연삭가공에서는 연삭휠(grinding wheel)의 회전축에 직각 방향으로 소재가 이송되므로 연삭시 연삭휠의 연삭입자 회전면에 평행하게 소재가 이송되어 연삭면에 소재이송 방향으로 길게 스크래칭선(scratching line)이 남게 된다. 이와 같은 현상을 억제하기 위하여 연삭휠의 회전면과 소재 이송방향이 일정각도(헬리컬각, helical angle)를 이루게 하여 가공하는 것이 헬리컬 스캔 연삭(helical scan grinding)이다.<sup>(4,5)</sup> 본 연구에서는 황연삭(coarse grinding), 중간연삭(medium grinding), 정연삭(fine grinding)을 위한 입도 #140, #400, #800의 다이아몬드 연삭휠에 대하여 각각 실험을 수행하였으며 연삭조건으로서는 이송속도, 재료 제거율(material removal rate), 연삭휠 속도, 헬리컬각을 선정하여 다구찌의 L9 직교배열을 구성하여 실험하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

헬리컬 스캔 연삭은 Fig. 1에 보인 바와 같이 연삭휠의 회전면에 일정각도(헬리컬각,  $\theta$ )를 이루며 소재가 이송된다. 일반적인 연삭에서는 연삭휠의 회전면에 평행하게 이송되어 헬리컬각,  $\theta=0$ 이 된다. 본 연구에서는 Fig. 2에서 보인 바와 같이 고속스핀들을 수직형 머시닝센타에 장착시킨 후 소재가

장착된 테이블의 이송 방향을 프로그램으로 바꿈으로써 헬리컬각을 변경시켰다. 형상은 동일하고 입도가 다른 3가지 다이아몬드 연삭휠을 사용하였다. 연삭휠의 형상은 외경 35mm, 연삭면 반경 7.5mm인 디스크형이며 입도가 #140, #400, #800인 연삭휠을 사용하여 황연삭, 중연삭, 정연삭의 경우를 실험하였다. 소재는 일반유리(청유리)로 하였으며 냉각수를 사용하였다. 표면거칠기는 비접촉식 레이저 표면조도계를 사용하였다. 측정은 연삭입자 궤적의 직각방향, 즉 회전축 방향으로 하였으며 커스(crest)의 영향은 필터링(high pass filter)하여 제거하였다.

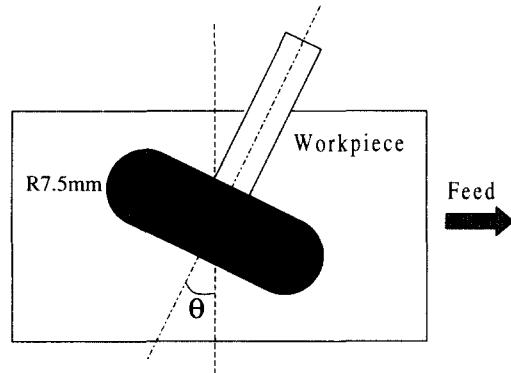


Fig. 1 Schematic of a helical scan grinding

### 2.2 실험방법

연삭조건으로서 이송속도, 재료 제거율, 연삭휠 속도, 헬리컬각을 선정하였다. 입도 #140, #400, #800의 다이아몬드 연삭휠 각각에 대하여 다구찌 방법을 이용하여 Table 1에 보인 L9(3<sup>4</sup>) 직교배열표와 같은 실험계획을 수립하였다.<sup>(6,7)</sup> 각 인자의 레벨 값은 Table 2와 같이 결정하였다. 크로스 피이드(cross feed)는 입도 #140, #400, #800의 연삭휠에 대하여 모두 1mm로 고정하였으며 연삭깊이는 연삭휠의 형상과 크로스피이드, 이송속도, 재료 제거율로부터 계산하여 설정하였다. 이상과 같은 연삭조건의 설정값은 예비실험을 통하여 원활한 연삭이 수행되는 범위를 파악한 후 이를 고려하여 결정되었다.

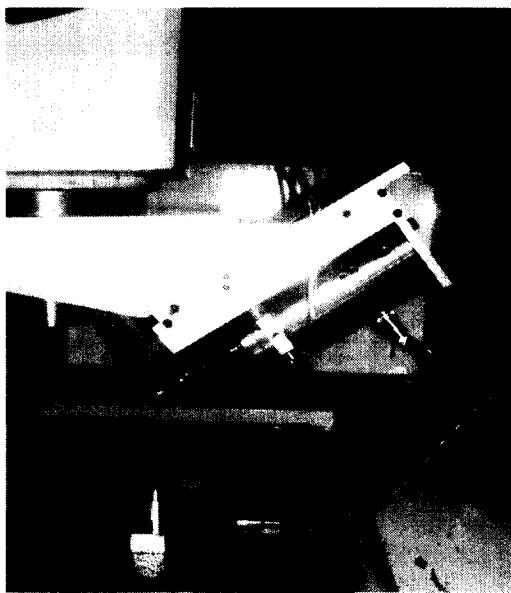


Fig. 2 Photograph of an experimental setup

Table 1 L9(3<sup>4</sup>) orthogonal array

Run No.	FACTOR			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1
Sign	A	B	C	D

Table 2 Factors and levels

Sign	Factor	Unit	Level								
			# 140			# 400			# 800		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
A	Helical angle	degree	30	60	90	30	60	90	30	60	90
B	Feed rate	mm/min	500	1000	1500	500	700	900	400	500	600
C	Removal rate	mm'/min	500	900	1200	50	100	150	5	10	15
D	Wheel speed	m/sec	15	20	25	15	20	25	15	20	25

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 황연식, 입도 #140 연삭휠

Fig. 3에 입도 #140의 연삭휠을 사용한 연삭면의 표면조도를 보였으며 Table 3에 각 인자 레벨에 대한 표면조도 결과를 Table 4에 ANOVA<sup>(7,8)</sup> 해석 결과를 보였다.

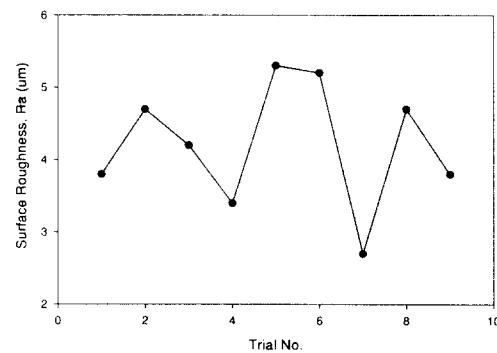


Fig. 3 Surface roughness of each run, #140 wheel

Table 4에 사용된 기호는 다음과 같다. S:Sum of squares,  $\phi$ :Degree of freedom, V:Variance, F:F-ratio, S':Pure sum,  $\rho$ :Percent contribution. Table 4에서 보는 바와 같이 연삭면의 표면조도에 영향을 미치는 인자는 이송속도-헬리컬각-제거율-연삭휠속도의 순서이며 이송속도의 영향이 지배적이고 연삭휠 회전속도의 영향은 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다. 또한 헬리컬각은 표면조도에 두 번째로 영향을 주는 인자로 중요한 연삭조건으로

로서 취급되어야 함을 보인다. 이와같은 해석결과는 최소 영향 인자인 연삭휠 속도를 폴링(pooling)한 후 10% 유의도(level of significance)의 F-검증을 통하여 신뢰성을 확인하였다.

Table 3 Data table for #140 wheel

Factor	helical angle			feed rate			removal rate			wheel speed		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
level	3.8	3.4	2.7	3.8	4.7	4.2	3.8	4.7	4.2	3.8	4.7	4.2
data	4.7	5.3	4.7	3.4	5.3	5.2	5.2	3.4	5.3	5.3	5.2	3.4
	4.2	5.2	3.8	2.7	4.7	3.8	4.7	3.8	2.7	3.8	2.7	4.7
	12.7	13.9	11.2	9.9	14.7	13.2	13.7	11.9	12.2	12.9	12.6	12.3
level sum	4.23	4.63	3.73	3.3	4.9	4.4	4.57	3.97	4.07	4.3	4.2	4.1
total sum	37.8											

Table 4 ANOVA table for #140 wheel

factor	S	$\phi$	V	F	$S'$	$\rho$
helical angle	1.22	2	0.61		1.22	20.6
feed rate	4.02	2	2.01		4.02	67.9
removal rate	0.62	2	0.31		0.62	10.5
wheel speed	0.06	2	0.03		0.06	1.0
error	0					
total	5.92	8				100

### 3.2 중연식, 입도 #400 연삭휠

입도 #400의 연삭휠을 사용한 중연삭 실험결과를 Fig.4 와 Table 5, Table 6에 보였다. 이를 결과로부터 각 인자의 영향은 앞 절의 황연삭에 비해 매우 다름을 알 수 있다. 표면조도에 영향을 미치는 인자는 제거율-이송속도-연삭휠 속도-헬리컬각의 순으로 나타나고 있으며, 각 인자의 영향은 황연삭에 비해 비교적 고르게 나타나고 있다. 또한 헬리컬각의 영향은 무시될 수 있는 정도임을 보인다. 이와같은 해석 결과는 최소영향인자인 헬리컬각을 폴링한 후 10% 유의도의 F-검증을 통하여 신뢰성을 확인하였다.

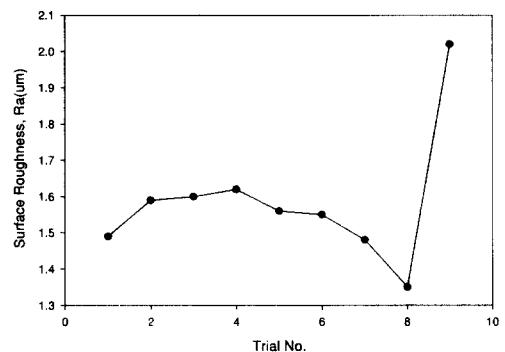


Fig. 4 Surface Roughness of each run #400 wheel

Table 5 Data table for #400 wheel

Factor	helical angle			feed rate			removal rate			wheel speed		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
data	1.49	1.62	1.48	1.49	1.59	1.6	1.49	1.59	1.6	1.49	1.59	1.6
	1.59	1.56	1.35	1.62	1.56	1.55	1.55	1.62	1.56	1.56	1.55	1.62
	1.6	1.55	2.02	1.48	1.35	2.02	1.35	2.02	1.48	2.02	1.48	1.35
level sum	4.68	4.73	4.85	4.59	4.5	5.17	4.39	5.23	4.64	5.07	4.62	4.57
level mean	1.56	1.57	1.62	1.53	1.5	1.72	1.46	1.74	1.54	1.69	1.54	1.52
total sum	14.26											

Table 6 ANOVA table for #400 wheel

factor	S	$\phi$	V	F	$S'$	$\rho$
helical angle	0.00509	2	0.00255		0.00509	1.9
feed rate	0.08816	2	0.04408		0.08816	32.9
removal rate	0.12402	2	0.06201		0.12402	46.3
wheel speed	0.05056	2	0.02528		0.05056	18.9
error	0	0				
total	0.26783	8				100

### 3.3 정연삭, 입도 #800 연삭휠

입도 #800의 연삭휠을 사용한 정연삭 실험결과를 Fig.5 와 Table 7, Table 8에 보였다. 표면조도에 영향을 미치는 인자는 연삭휠 속도-헬리컬각-제거율-이송속도의 순으로 나타나고 있다. 연삭휠 속도가 지배적 인자이며 이송속도는 무시될 수 있음을 보인다. 이것은 황연삭의 경우와는 정반대로 매우 흥미로운 결과이다. 본 정연삭의 경우에도 헬리컬각은 두 번째로 중요한 인자임을 보이고 있다. 이와같은 해석 결과는 최소영향인자인 이송속도를 풀링한 후 10% 유의도의 F-검증을 통하여 신뢰성을 확인하였다.

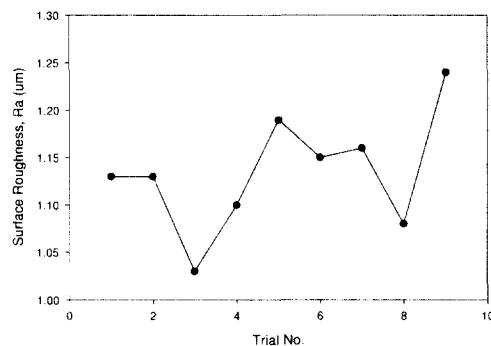


Fig. 5 Surface Roughness of each run, #800 wheel

Table 7 Data table for #800 wheel

Factor	helical angle			feed rate			removal rate			wheel speed		
level	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
data	1.13	1.1	1.16	1.13	1.13	1.03	1.13	1.13	1.03	1.13	1.13	1.03
	1.13	1.19	1.08	1.1	1.19	1.15	1.15	1.1	1.19	1.19	1.15	1.1
	1.03	1.15	1.24	1.16	1.08	1.24	1.08	1.24	1.16	1.24	1.16	1.08
level sum	3.29	3.44	3.48	3.39	3.4	3.42	3.36	3.47	3.38	3.56	3.44	3.21
level mean	1.1	1.15	1.16	1.13	1.13	1.14	1.12	1.16	1.13	1.19	1.15	1.07
total sum	10.21											

Table 8 ANOVA table for #800 wheel

factor	S	$\phi$	V	F	S'	$\rho$
helical angle	0.00669	2	0.00335		0.00669	22.1
feed rate	0.00016	2	0.00008		0.00016	0.5
removal rate	0.00229	2	0.00115		0.00229	7.6
wheel speed	0.02109	2	0.01055		0.02109	69.8
error	0	0				
total	0.03023	8				100

본 실험에서 채택한 연삭 인자 및 레벨 범위에서의 최적 연삭조건은 앞의 Table 3, Table 5, Table 7의 결과로부터 아래의 Table 9와 같은 최적 연삭조건을 얻는다.

Table 9 Optimal grinding conditions

wheel mesh	helical angle	feed rate	removal rate	wheel speed	surface roughness, Ra
	degree	mm/min	mm <sup>3</sup> /min	m/sec	μm
#140	90	500	900	25	2.6
#400	30	700	50	25	1.31
#800	30	400	5	25	1.02

### 3.4 결과 고찰

앞에서의 실험결과에서 주목되는 점은 황연삭과 정연삭에서 각 인자의 영향이 정 반대로 나타나며 중연삭의 경우는 각 인자의 영향 역시 중간적인 특징을 갖는다는 사실이다. 즉, 황연삭의 경우는 이송속도가 지배적 인자로, 연삭휠 속도가 무시되는 인자로 작용하나 황연삭의 경우는 이와 반대로 연삭휠 속도가 지배적 인자로, 이송속도가 무시될 수 있는 인자로 나타나고 있다. 중연삭의 경우는 상대적으로 지배적 인자가 뚜렷하지 않음을 보이고 있다. 이와 같이 황연삭과 정연삭에서 각 인자의 영향이 반대로 나타나고 있음은 본 연구에서 적용한 연삭조건의 범위를 고려할 때 연질 연삭(ductile grinding)<sup>(9)</sup>과 같은 연삭메카니즘의 변화에 의한 것이라기 보다는 실용적 연삭조건 범위의 차이에 의한 것으로 생각된다. 즉, 황연삭의 경우는 원활한

연삭이 가능한 이송속도의 범위가 큼으로 해서 이 송속도 레벨간 간격이 크게 설정된 것이 해석 결과에 지배적 인자로 도출됨에 영향을 준 것으로 생각된다. 이와는 반대로 정연삭의 경우는 연삭이 가능한 이송속도의 범위가 작으므로 이송속도의 레벨 간 간격이 작게 설정되었고 결과적으로 이송속도의 영향이 작게 나타난 것으로 추정된다. 본 연구의 연삭조건이 표면조도에 미치는 영향 분석 결과는 실용적으로 적용될 수 있는 연삭조건의 범위가 고려된 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 다이아몬드 연삭휠을 사용한 유리의 헬리컬 스캔 연삭에서 연삭조건이 연삭면 표면조도에 미치는 영향을 규명하기 위한 실험연구를 수행하였다. 재료제거율, 이송속도, 연삭휠 회전속도, 헬리컬각을 인자(factor)로 하여 다구찌의 실험계획법을 적용하여 실험하였으며 그 결과를 ANOVA 해석을 통하여 분석하였다. 본 실험에서 수행한 연삭조건의 범위에서 각 조건에 의한 영향은 아래와 같다.

1) 황연삭시(입도 #140 연삭휠 사용) 표면조도에 영향을 미치는 지배적 인자는 이송속도이며 연삭휠 회전속도는 상대적으로 무시될 수 있는 인자이다.

2) 정연삭(입도 #800 연삭휠 사용)의 경우는 황연삭의 경우와는 정반대로 지배적 인자는 연삭휠 회전속도이며 이송속도는 상대적으로 무시될 수 있는 인자이다.

3) 중연삭시(입도 #400 연삭휠 사용) 연삭 조건이 표면조도에 미치는 영향은 황삭, 정삭에 비해 고르게 나타나며 재료제거율이 가장 큰 영향을 미치는 인자로, 헬리컬각이 가장 작은 영향을 미치는 인자로 나타났다.

4) 헬리컬각은 연삭면의 표면조도에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나로 작용하며 중요한 연삭 조건으로 고려되어야 한다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-1-304- 008-4)지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Stuart C. Salmon., Modern Grinding Process Technology, Mc Graw Hill, 1997.
2. K. Subramanian., S.Ramanath., M.Tricard., "Mechanism of Material Removal in the Precision Production Grinding of Ceramics," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp. 509 ~ 518
3. T.W.Hwang, S.Malkin, "Grinding Mechanism and Energy Balance for Ceramics," TRANS. of ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 121, pp. 623-631, 1999.
4. Bo Zhang., Tetsutaro Uematsu., "Surface Generation Mechanism in Helical Scan Grinding : an Analytical Study," Journal of Materials Processing Technology 91, pp. 206 ~ 214, 1999.
5. Bo Zhangd.m, "Helical Scan Grinding of Brittle and Ductile Materials," Journal of Materials Processing Technology 91, pp. 196 ~ 205, 1999.
6. Glen Stuart Peace, Taguchi Method, Addison Wesley Publishing company.
7. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 1990.
8. K.H.P.Reddy,B.Ramamoorthy and P.K.Nair,"Estimation of Optimum Grinding Conditions to Improve the Quality of Ground Surface by Applying Taguchi Technique," Proceedings of the 14th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future, pp. 473-479, 1998.
9. W.K.Kahl,"Ductile grinding of silicon carbide as a production method for reflective optics," SPIE Vol. 1994, pp.31-38