

다구찌 방법을 적용한 세라믹 연삭가공의 최적화

임흥섭*(인천기능대 자동차과), 유봉환(숭실대 기계공학과), 소의열(충청대 기계설계과),
이근상(세인엔지니어링), 사승윤((주)텔레스타)

Optimization of ceramic grinding by Applying Taguchi Method

H. S. Lim(Automobile Dept., IPC), B. H. Ryu(Mech. Eng. Dept., SSU),
E. Y. So(Mech. Eng. Dept., CCU), K. S. Lee(Sein Eng.), S. Y. Sa(Telestar)

ABSTRACT

This paper has studied to obtain the grinding characteristics and optimal grinding conditions of ceramics in the grinding with diamond wheel by Taguchi method. Feed rate was most important factor to the surface roughness. In the case of Si_3N_4 and Al_2O_3 , surface roughness value were small at 3m/min of feed rate. In the case of ZrO_2 , surface roughness value was small at 4m/min of feed rate. Surface roughness have much influenced by major load for the Si_3N_4 and ZrO_2 . On the other hand, Al_2O_3 have more influenced by grain shedding of brittle fracture phenomenon. The major factors affecting the surface roughness and the optimum grinding conditions were obtained with minimum experiment using Taguchi method.

Key Words : Taguchi method(다구찌 방법), Brittle fracture(취성파괴), Grain shedding(입자탈락), Si_3N_4 (질화규소), Al_2O_3 (알루미나), ZrO_2 (지르코니아)

1. 서론

세라믹은 성형 및 소결 등의 공정을 거쳐 제조되는 소재로써 높은 강도와 경도 등의 우수한 기계적 특성을 가지고 있으며, 요구되는 특성을 인공적으로 조절할 수 있게 되어 많은 종류의 세라믹을 합성하여 활용할 수도 있으므로 무한한 가능성을 갖는 신기능성 소재로 각광을 받으므로 그 사용 범위가 매우 넓다.⁽¹⁾ 이러한 세라믹재료의 가공방법으로는 다이아몬드 연삭 휠을 사용한 연삭가공이 주로 적용하고 있으나, 이 경우 휠 입자의 절삭날끝 마멸이 급속하게 촉진된다. 또한, 연삭 휠의 눈막힘(loading) 등의 가공에 문제점이 발생함으로써 지속적으로 효율적인 가공을 수행하기가 곤란하여 가공능률이 저하되고 공작물의 가공면 상태 또한 악화되어 가공면의 표면거칠기가 저하되기 쉽다는 문제점들이 다르게 된다.⁽²⁾

세라믹의 연삭가공에 있어서 가공비용을 우려하는 경우가 많은 이유로는 세라믹이 가공능률이 낮기 때문에 작업비용이 많이 소요되고, 또한 공구의 마멸이 빠르게 일어나므로 공구 수명이 단축되어 공구비가 많이 소요되기 때문이라고 추정할 수 있다. 따라서 임의의 치수 및 형상정밀도를 유지하면서 고능률적으로 세라믹제품을 가공함에 있어서 일반적으로 세라믹제품의 단가에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 가공비를 줄일 수 있는 연구가 수행되어야 한다.⁽³⁾

2. 다구찌 방법

실험계획법의 정의를 “해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있

능가를 계획하는 것"이라고 할 수 있다. 즉 실험계획법은 원하는 정보를 얻기 위하여 실험을 어떻게 하면 효율적인가를 통계적 방법으로 설명하여 주는 것을 말한다.

다구찌 실험계획법은 "실험에 의하여 기술정보의 획득효율을 높여주기 위한 일반적인 기술의 전체"라고 정의한다. 즉, 실험에 의한 정보관리 행위를 실험계획법으로 광범위하게 정의하여 주고 있으며, 특히 기술 정보의 획득효율에 초점을 맞추고 있다. 다구찌 방법의 강건설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대한으로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력의 힘과 잡음의 힘 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 조절인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다.⁽⁴⁾

SN비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(lower is better), 망대(higher is better) 특성으로 나뉘어진다. 본 연구에서는 표면거칠기 값이 작을수록 좋은 망소 특성이므로 망소 특성에 준하여 실행하였다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

위 식에서 n은 측정값의 수를 나타내고, y_i 는 측정된 특성값을 나타내고 SN값의 단위는 데시벨(dB)이다.⁽⁵⁾

3. 실험

3.1 시험편과 다이아몬드 휠

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 세라믹재료인 질화규소(Si_3N_4), 알루미늄(Al_2O_3) 그리고 지르코니아(ZrO_2)를 사용하였고, 시험편의 규격은 60(L)×13(W)×18(H)mm이며, 스틱(Stick)형으로 제작하였다. 다이아몬드 휠은 레지노이드(Resinoid) 본드를 사용하였고, 입도(Mesh)는 100, 집중도(Concentration)를 100으로 제작하여 사용하였으며, 휠의 크기는 180(OD)×13.75(ID)×13(W)×3(t)mm이다.

3.2 실험장치 및 방법

본 실험은 주축의 회전수 변화가 가능하도록 인버터(Inverter)를 부착하고, 절입량이 1 μ m까지 가능

하도록 디지털 장치를 부착한 평면 연삭기(HGS-515XA, Hwacheon)를 사용하였으며, 실험에 사용한 실험 기기는 Fig. 1과 같고, 연삭저항을 측정하기 위하여 공구동력계(9257B, piezo type, kistler)를 연삭 테이블 위에 설치하고, 그 위에 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 발생된 신호는 앰프(5019A, kistler)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장한 후 기록하였다. 시험편의 표면상태를 측정하기 위하여 측정식 조도계(SurfTest-301, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였다. 연삭조건은 가공결과에 영향을 미치는 주축속도, 이송속도, 절입량, 드레서 제거량 등을 인자로 설정하였으며 각각의 경우에 대해서 등간격으로 수준을 배치하였으며 선정된 인자와 수준은 Table 1과 같다. 표면거칠기에 영향을 미친다고 생각되는 인자와 수준들을 $L_9(3^4)$ 의 직교배열표를 이용하여 배치하였고 이를 Table 2에 나타내었다. 직교배열표에 의한 가공실험을 2회 실시하여 각 시험편의 최대높이 거칠기(R_{max})를 측정한 후 SN비를 계산하여 분산분석의 순서로 실시하였다.

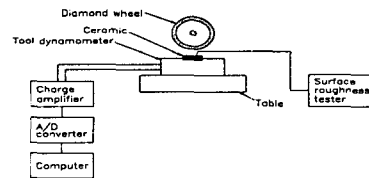


Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

Table 1 Factors and levels used in experiment

Sign	Factor	Unit	Level		
			0	1	2
A	Spindle speed	m/min	1250	1550	1850
B	Feed rate	m/min	3	4	5
C	Depth of cut	mm	0.01	0.02	0.03
D	Volume of dresser removed	mm ³	260	520	780

Table 2 Orthogonal array table for $L_9(3^4)$

No.	Factor			
	A	B	C	D
1	0	0	0	0
2	0	1	1	1
3	0	2	2	2
4	1	0	1	2
5	1	1	2	0
6	1	2	0	1
7	2	0	2	1
8	2	1	0	2
9	2	2	1	0

4. 실험결과 및 고찰

4.1 질화규소 연삭가공의 최적화

Fig. 2는 입도가 100인 레지노이드 본드 휠로 질화규소(Si_3N_4)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max})의 평균값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 SN비를 계산하여 Table 3에 나타내었다.

표면거칠기에 기여하는 인자는 이송속도-드레서 제거량-주축속도-절입량의 순서로 나타났으며 표면거칠기의 영향에 C인자인 절입량이 미치는 영향이 다른 요인에 비해 매우 작으며 B인자인 이송속도가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 4는 절입량을 풀링(Pooling)하여 분산분석한 결과를 나타내었다. 여기서 풀링이란 오차분산이나 다른 인자들의 분산에 대해 상대적으로 큰 유의성(Significance)을 나타내지 못하는 인자를 실험상 나타낼 수 있는 오차로 판단하여, 오차인자로 판단함을 의미하고 옳은 판단인가에 대한 검정은 분산비즉 F검정으로 확인한다. Table 5는 풀링 후 표면거칠기 값을 유의한 인자에 대하여 재배치 한 것이다. Table 5에서 보는 바와 같이 표면거칠기를 최소화 요인은 $A_0B_0C_0D_1$ 의 조건이다. 즉 주축속도는 1250m/min, 이송속도는 3m/min, 절입량은 0.01mm, 드레서 제거량은 $520mm^3$ 의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공 조건으로 나타났다. 다이아몬드 휠이 세라믹재료에 압입되어 조금씩 파쇄시키면서 연삭을 진행하게 되는데 이송속도의 변화에 따라서 입자에 걸리는 부하량이 표면거칠기에 가장 영향을 미치는 것으로 보여진다.

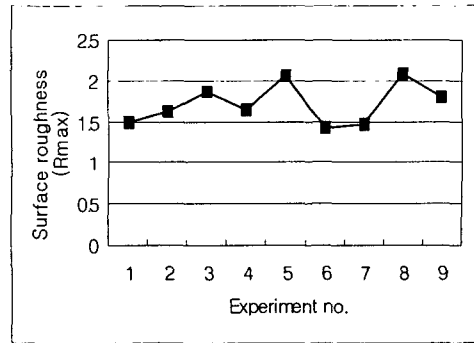


Fig. 2 Variation of surface roughness for experiment no (material : Si_3N_4 , mesh number : 100, bond : resinoid)

Table 3 SN ratio of the results

No.	Surface roughness(R_{max})		
	1	2	SN
1	1.33	1.64	-3.48
2	1.43	1.80	-4.22
3	1.87	1.84	-5.37
4	1.70	1.57	-4.28
5	1.70	2.44	-6.46
6	1.34	1.50	-3.06
7	1.57	1.34	-3.28
8	1.57	2.60	-6.64
9	1.54	2.04	-5.14

Table 4 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	ϕ	V	F_0	$F(0.1)$
A	0.6805	2	0.3403	1.0071	9.0
B	6.6400	2	3.3200	9.8264*	9.0
C			pooled factor		
D	6.0611	2	3.0306	8.9697	9.0
E	0.6757	2	0.3379		
T	14.0574	8			

* : 90% confidence level

Table 5 Effective level sum of factor for R_{max}

Level	A	B	C	D
0	4.97	4.59	5.00	5.35
1	5.13	5.78	5.05	4.50
2	5.34	5.07	5.39	5.59

4.2 알루미늄 연삭가공의 최적화

Fig. 3은 입도가 100인 레지노이드 본드 휠로 알루미늄(Al_2O_3)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max})의 평균값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 SN비를 계산하여 Table 6에 나타내었다. 표면거칠기에 기여한 인자는 이송속도-주축속도-드레서 제거량-절입량의 순서로 나타났으며 질화규소와 같이 B인자인 이송속도가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 7은 절입량을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 8에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 $A_0B_0C_2D_2$ 의 조건이다. 즉 주축속도는 1250m/min, 이송속도는 3mm/min, 절입량은 0.03mm, 드레서 제거량은 $780mm^3$ 의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 알루미늄(Al_2O_3)는 재료특성상 취성파괴로 인한 입자탈락에 의하여 연삭이 진행되므로 실험에 사용된 주요 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향이 작다고 사료된다.

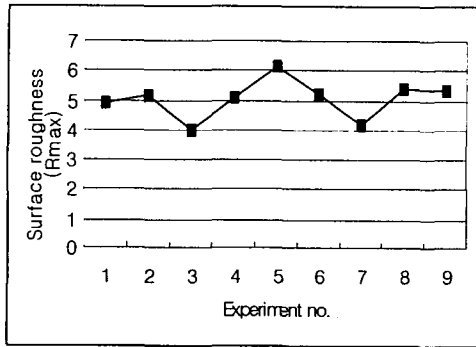


Fig. 3 Variation of surface roughness for experiment no (material : Al_2O_3 , mesh number : 100, bond : resinoid)

Table 6 SN ratio of the result

No.	Surface roughness(R_{max})		
	1	2	SN
1	5.20	4.57	-13.80
2	5.10	5.17	-14.21
3	3.37	4.57	-12.07
4	5.10	5.10	-14.15
5	6.40	5.90	-15.78
6	4.77	5.60	-14.32
7	4.20	4.20	-12.46
8	5.30	5.54	-14.68
9	5.10	5.60	-14.58

Table 7 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	ϕ	V	F_0	F(0.1)
A	2.9542	2	1.4771	2.0463	9.0
B	3.5821	2	1.7911	2.4813	9.0
C	pooled factor				
D	2.2819	2	1.1409	1.5806	9.0
E	1.4437	2	0.7218		
T	10.2620	8			

Table 8 Effective level sum of factor for R_{max}

Level	A	B	C	D
0	14.00	14.19	15.50	16.39
1	16.44	16.71	15.59	14.53
2	14.97	14.51	14.32	14.49

4.3 지르코니아 연삭가공의 최적화

Fig. 4는 입도가 100인 레지노이드 본드 휠로 지르코니아(ZrO_2)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max})의 평균값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 SN비를 계산하여 Table 9에 나타내었다. 표면거칠기에 기여한 인자는 이송속도-절입량-주축속도-드레서 제거량 등의 순서로 나타났으며 상기 두 가지의 재료와 동일하게 B인자인 이송속도가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 10은 드레서 제거량을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 11에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 $A_1B_1C_1D_2$ 의 조건이다. 즉 주축속도는 1550m/min, 이송속도는 4m/min, 절입량은 0.02mm, 드레서 제거량 $780mm^3$ 의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 지르코니아(ZrO_2)는 입자마모에 의해서 연삭이 일어나므로 이송속도가 표면거칠기에 영향을 미친다고 보여진다.

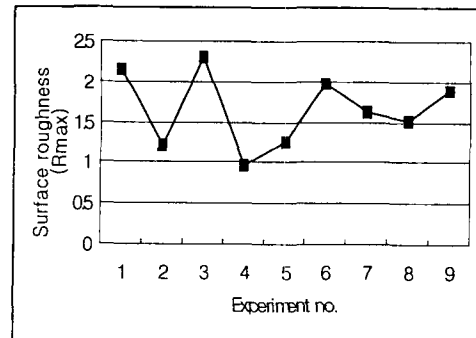


Fig. 4 Variation of surface roughness for experiment no (material : ZrO_2 , mesh number :

100, bond : resinoid)

Table 9 SN ratio of the results

No.	Surface roughness(R_{max})		
	1	2	SN
1	2.14	2.17	-6.67
2	1.17	1.24	-1.62
3	2.30	2.30	-7.23
4	0.90	1.04	0.24
5	1.27	1.24	-1.97
6	1.87	2.07	-5.90
7	1.64	1.60	-4.19
8	1.47	1.57	-3.64
9	1.80	1.97	-5.52

Table 10 ANOVA table for R_{max} after pooling

Factor	S	ϕ	V	F_0	F(0.1)
A	11.0835	2	5.5417	5.1021	9.0
B	22.9067	2	11.4534	10.5447*	9.0
C	15.2175	2	7.6087	7.0051	9.0
D	pooled factor				
E	2.1723	2	1.0862		
T	51.3800	8			

* : 90% confidence level

Table 11 Effective level sum of factor for R_{max}

Level	A	B	C	D
0	5.67	4.75	5.65	5.31
1	4.20	3.99	4.07	4.80
2	5.03	6.16	5.18	4.79

5. 결론

본 연구에서는 세라믹재료를 다이아몬드 휠로 연삭가공할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자들을 찾아내어 가공조건의 최적화를 규명하기 위해 다구찌 방법을 적용한 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 다구찌 방법을 적용하여 분석한 결과, 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자는 이송속도이며, 이송속도가 작을수록 표면상태가 양호하다.

2. 실험조건에서 이송속도에 따른 표면거칠기는 질화규소와 알루미늄은 3m/min, 지르코니아는 4

m/min의 경우가 가장 양호하다.

3. 질화규소 및 지르코니아는 이송속도의 변화에 따라서 입자에 걸리는 부하량이 변동되어 표면거칠기에 영향을 미치고, 알루미늄은 재료특성상 취성과 파괴에 따른 입자탈락에 의하여 연삭이 일어나므로 주요인자들이 표면거칠기에 미치는 영향이 작다.

참고문헌

1. 杉田忠彰, "セラミックスの機械加工," 養賢堂, pp.33-34, 1985.
2. 하상백 외, "구조용 세라믹스의 연삭특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 10, pp. 182-186, 1999.
3. 中川平三郎, "グライディングセンタによるセラミックスの正面研削加工," 機械技術, 第40卷, 第4号, pp. 77-83, 1992.
4. 松永孝義, "品質工學によるアルミナ系セラミックスの研削の最適化-2," 機械と工具, 12月, pp.109-113, 1991.
5. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp. 16-18, 2001.