

실험계획법을 이용한 세라믹재료의 연삭특성

정을섭*(산업자원부 기술표준원), 김성청(충북대학교 기계공학과), 소의열(충청대학
메카트로닉스학부), 이근상(세인 Eng.)

Grinding Characteristics of Ceramic using the Experimental Plan Method

E. S. Jeong*(Korean Agency for Technology and Standards, MOCIE), S. C. Kim(Mech. Eng. Dept., CBU),
E. Y. So(Mech. Eng. Dept., CCU), K. S. Lee(Sein Eng.)

ABSTRACT

This paper has studied to obtain the grinding characteristics and optimal grinding conditions of ceramic materials in the grinding with diamond wheel by the experimental plan method. The load on wheel by varying the feed rate was related with the surface roughness due to the minute destruction phenomenon of grains for the Si₃N₄ and ZrO₂. The depth of cut is related with the surface roughness because the grinding is carried out by grain shedding process due to the brittle fracture phenomenon for the Al₂O₃. The major factors affecting the surface roughness and the optimum grinding conditions were obtained with minimum experiments using the experimental plan method.

Key Words : Experimental plan method (실험계획법), Si₃N₄ (질화규소), Al₂O₃ (알루미나), ZrO₂ (지르코니아), Brittle fracture (취성파괴), Grain shedding (입자탈락)

1. 서론

세라믹스의 연삭 가공에서는 가공면의 형상이 대단히 중요하며, 이들 재료의 난삭성은 연삭저항이나 지석 마모량 등의 연삭 특성에서 현저히 나타난다. 또한 연삭 가공을 능률적으로 행하기 위하여 대개의 경우 다이아몬드 지석을 사용하는데, 가공능률 뿐만 아니라 표면조도 및 표면형상 등도 고려해서 더욱 폭넓은 연삭 공구를 대상으로 한 적정가공조건의 검토가 필요하다.⁽¹⁾ 금속재의 경우에는 연성모드의 제거기구에 의하여 가공면이 생성되는 것에 비하여 세라믹스의 경우에는 미세한 파괴모드의 제거기구에 의하여 가공면이 생성되므로 부품의 가공이 용이하지 않으며 가공비가 많은 부분을 차지하고 있다.⁽²⁻³⁾ 세라믹스는 경도가 매우 높고 취성이 강하므로 연삭 가공시 최적의 연삭조건 선정은 쉽지 않으며 특히 재질에 따른 연삭 휠의 선정 및 가공 조건은 아직까지 확립되지 못하고 있는 실정에 있으며, 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악하고 체계화할 필요가 있다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 평면 연삭기에서 세라믹 재료를

다이아몬드 휠로 연삭 가공할 때 보다 효율적인 실험을 위하여 실험계획법을 적용하였다. 실험계획법은 주어진 인자와 조건에 대하여 요인별로 특성치를 재배치, 정리하여 어떤 인자가 특성치에 가장 큰 영향을 미치는가를 통계적으로 규명하는 실험방법이다. 본 실험에서는 효율적인 실험을 위해 직교배열을 이용하였으며 실험결과에 대한 분석방법은 분산분석(Analysis of Variance)으로 수행하였다.

연삭면의 표면거칠기에 미치는 인자들의 영향 정도를 분석하고 이중 가장 강력한 영향력을 갖는 인자의 검출과 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적의 연삭조건을 도출하는 것이다. 실험에 사용된 주요 인자들로는 주축의 회전수, 이송속도, 절입량 등을 파라미터로 적용하였고, 이들에 의하여 구성된 연삭 가공조건의 변화에 따라 표면거칠기의 제어인자를 규명하였다.

2. 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 반응결과 - 이를 특성치 (characteristic value)라고 함

- 에 대하여 영향을 미치고 있는 원인이 어떻게 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 무수히 있는 데다가 원료, 실험장치, 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차 등에 의하여서도 영향을 받기 때문이다.

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 부르고, 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다.

실험계획법이란 주어진 실험에 대한 실험방법을 의미하는 것으로, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 실험계획을 세웠다는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고, 실험방법을 택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다.

실험계획법에서 가장 많이 이용되는 분석방법으로, 실험에서 얻은 특성치의 산포를 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이라고 말할 수 있다.

만약 어떤 특성치에 대하여 요인으로서 A, B, C 및 오차(E)가 있다면 총변동(총제곱합을 말하는 것으로 S_T 라고 표시하자)은 S_A, S_B, S_C, S_E 를 각각 A, B, C, E 의 변동(제곱합)이라 한다면 다음이 성립한다.

$$S_T = S_A + S_B + S_C + S_E \quad (1)$$

오차변동 S_E 에 비하여 S_A, S_B, S_C 가 각각 상대적으로 어느 정도 큰가를 비교하여 A, B, C 가 각각 큰 영향을 주는 요인인가 아닌가를 결정하는 것이다.

요인 A 에 의하여 발생하는 제곱합은 뚜렷한 이유에 의한 것이나 오차에 의한 제곱합은 아직 원인이 규명되지 않은 부분이라고 하겠다. 이 제곱합 들을 각각 S_A, S_E 로 표시하고 이와 관련된 자유도를 각각 θ_A, θ_E 로 나타내면 S_A/θ_A 를 V_A 로 놓고 요인 A 의 제곱평균이라고 하며, S_E/θ_E 를 V_E 로 놓고 오차분산이라고 한다. 만약 비율

$$F_0 = \frac{V_A}{V_E} \quad (2)$$

가 크면 요인 A 가 오차요인에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 말한다. ⁽⁵⁾

3. 실험

3.1 시험편과 다이아몬드 휠

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 세라믹 재료인 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 제작하였으며, 다이아몬드 휠은 본드를 레진(Resinoid)과 비트리파이드(Vitrified)를 사용하고 입도(Mesh)를 100, 200, 400으로 하고 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 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(Inverter)를 부착하고, 절입량이 1 μ m까지 가능하도록 디지털 장치를 부착한 평면연삭기(HGS-515XA, Hwacheon)를 사용하였으며, 실험에 사용한 실험 기기는 Fig.1과 같으며, 연삭저항을 측정하기 위하여 공구동력계(AST-MM, Satowo)를 연삭 테이블 위에 설치하고, 그 위에 지그를 설치한 후 공작물을 고정하였다. 공구동력계에서 발생된 신호는 엠프(UCAM-70A, Kyowa)에서 증폭된 후 A/D 변환기를 거쳐 출력장치인 프린터를 통해 출력이 되도록 하였다. 시험편의 표면상태를 측정하기 위하여 측정식 조도계(Surfest-301, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였다. 연삭조건은 가공결과에 영향을 미치는 주축의 회전수, 이송속도, 절입량 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 통하여 각 시험편의 최대높이 거칠기(R_{max})를 측정한 후 분산분석의 순서로 실시하였다.

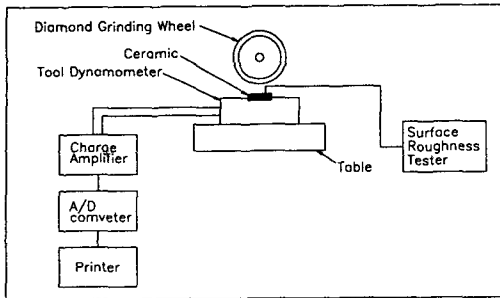


Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

Table 1 Factors and levels used in experiment

Sign	Factor	unit	levels		
			0	1	2
A	Rotation speed of spindle	rpm	2000	2500	3000
B	Feed rate	m/min	1	2	3
C	Depth of cut	mm	0.01	0.02	0.03

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

No.	Factor			
	A	B	E	C
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 연삭조건에 따른 질화규소(Si_3N_4)의 연삭 특성

Fig. 2는 입도가 200인 비트리파이드 본드 휠로 질화규소(Si_3N_4)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(R_{max})값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다.

표면거칠기에 기여하는 인자는 이송속도-주축회전수-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 분산

에 대해 상대적으로 큰 유의성(Significance)을 나타내지 못하는 인자를 실험상 나타날 수 있는 오차로 판단하여, 오차인자로 판단함을 의미하고 옳은 판단인가에 대한 검정은 분산비 즉 F검정으로 확인한다. Table 5는 풀링 후 표면거칠기 값을 유의한 인자에 대하여 재배치 한 것이다. Table 5에서 보는 바와 같이 표면거칠기를 최소화 요인은 B_0A_2 의 조건이다. 즉 이송속도는 1 m/min, 주축회전수는 3000 rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공 조건으로 나타났다. 재료에 압입되어 조금씩 파쇄시키면서 연삭을 진행하게 되는데 이송속도의 변화에 따라서 입자에 걸리는 부하량이 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 보여진다.

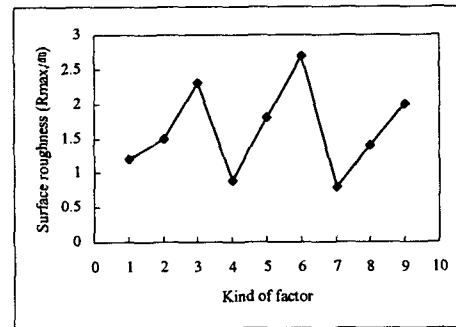


Fig. 2 Variation of surface roughness for kind of factors (material : Si_3N_4 , mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 3 ANOVA table for R_{max} (Si_3N_4)

factor	S	ϕ	V	F_0	S'	ρ
A	0.25	2	0.13	1.86	0.25	7.7
B	2.82	2	1.41	20.14	2.82	86.8
E	0.14	2	0.07		0.14	4.3
C	0.04	2	0.02	0.28	0.04	1.2
T	3.25	8				100

Table 4 ANOVA table for R_{max} after pooling (Si_3N_4)

factor	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.01)
A	0.25	2	0.13	2.6	6.94	18.0
B	2.82	2	1.41	28.2**	6.94	18.0
E	0.18	4	0.05			
C						
T	3.25	8				

Table 5 One factor table of Si₃N₄

A ₀	A ₁	A ₂
5.0	5.4	4.2
B ₀	B ₁	B ₂
2.9	4.7	7.0

4.2 연삭조건에 따른 알루미늄(Al₂O₃)의 연삭특성

Fig. 3은 입도가 200인 비트리파이드 본드 휠로 알루미늄(Al₂O₃)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(Rmax)값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. 표면거칠기에 기여한 인자는 절입량-주축 회전수-이송속도의 순서로 나타났으며 C인자인 절입량이 다른 인자에 비해 표면거칠기값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 7은 이송속도를 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 8에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 C₁A₂의 조건이다. 즉 절입량은 0.02 mm, 주축회전수는 3000 rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 알루미늄(Al₂O₃)의 재료특성상 취성파괴에 의한 입자탈락에 의하여 연삭이 일어나므로 절입량이 표면거칠기에 영향을 미친다고 보여진다.

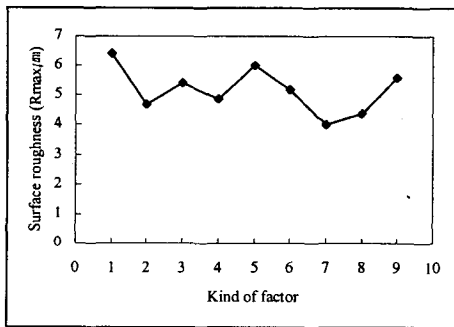


Fig. 3 Variation of surface roughness for kind of factors (material : Al₂O₃, mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 6 ANOVA table for Rmax (Al₂O₃)

factor	S	φ	V	F ₀	S'	ρ
A	1.21	2	0.61	10.17	1.21	25.6
B	0.24	2	0.12	2.0	0.24	5.1
E	0.12	2	0.06		0.12	2.5
C	3.15	2	1.58	26.34	3.15	66.8
T	4.72	8				

Table 7 ANOVA table for Rmax after pooling(Al₂O₃)

factor	S	φ	V	F ₀	F(0.05)	F(0.01)
A	1.21	2	0.61	6.8	6.94	18.0
B						
E	0.36	4	0.09			
C	3.15	2	1.58	17.6*	6.94	18.0
T	4.72	8				

Table 8 One factor table of Al₂O₃

A ₀	A ₁	A ₂
16.5	16.1	14.0
C ₀	C ₁	C ₂
18.0	13.9	14.7

4.3 연삭조건에 따른 지르코니아(ZrO₂)의 연삭특성

Fig.4는 입도가 200인 비트리파이드 본드 휠로 지르코니아(ZrO₂)를 연삭하였을 때의 표면거칠기(Rmax)값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 9에 나타내었다. 표면거칠기에 기여한 인자는 이송속도-주축 회전수-절입량 등의 순서로 나타났으며 B인자는 이송속도가 다른인자에 비해 표면거칠기값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 10은 절입량을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 11에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 B₀A₂의 조건이다. 즉 이송속도를 1 m/min, 주축회전수를 3000 rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적가공조건으로 나타났다. 지르코니아(ZrO₂)는 질화규소(Si₃N₄)와 같은 경향으로 나타나고 있다. 이는 입자마모에 의해서 연삭이 일어나므로 이송속도가 표면거칠기에 영향을 미친다고 보여진다.

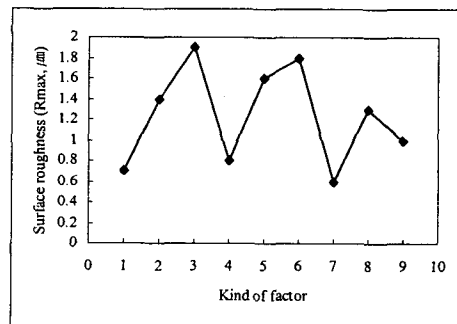


Fig. 4 Variation of surface roughness for kind of factors (material : ZrO₂, mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 9 ANOVA table for Rmax (ZrO₂)

factor	S	ϕ	V	F ₀	S'	ρ
A	0.33	2	0.165	2.36	0.33	17.6
B	1.31	2	0.655	9.36	1.31	70.1
E	0.14	2	0.07		0.14	7.5
C	0.09	2	0.045	0.64	0.09	4.8
T	1.87	8				100

Table 10 ANOVA table for Rmax after pooling(ZrO₂)

factor	S	ϕ	V	F ₀	F(0.05)	F(0.01)
A	0.33	2	0.165	2.84	6.94	18.0
B	1.31	2	0.655	11.3*	6.94	18.0
E	0.23	4	0.058			
C						
T	1.87	8				

Table 11 One factor table of ZrO₂

A ₀	A ₁	A ₂
4.0	4.2	2.9
B ₀	B ₁	B ₂
2.1	4.3	4.7

5. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 세라믹 재료를 다이아몬드 휠로 연삭가공할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자에 대해서 규명하기 위한 실험결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 실험계획법을 이용하여 최소의 실험으로 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자와 최적 연삭조건은 질화규소와 지르코니아 및 알루미늄의 연삭에서 전자의 경우 이송속도 1 m/min, 후자는 절입량 0.02 mm로 하고, 주축회전수는 양자 모두 3000 rpm로 동일하게 하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다.

2. 질화규소 및 지르코니아의 연삭 가공에서는 미소파괴현상이 나타나며, 이송속도의 변화에 따라서 입자에 걸리는 부하량이 변동되므로 표면거칠기에 영향을 미친다.

3. 알루미늄은 취성파괴에 의한 입자탈락에 의하여 연삭이 일어나므로 절입량이 표면거칠기에 영향을 미친다.

참고문헌

1. 유재상 외, "세라믹스 형상가공," 요업기술, Vol.

- 11, No. 2, pp. 73-82, 1996.
2. 杉田忠彰, "セラミックスの機械加工," 養賢堂, pp.33-34, 1985.
3. 하상백 외, "구조용 세라믹스의 연삭특성에 관한 연구," 한국정밀공학회지, Vol. 16, No. 10, pp. 182-186, 1999.
4. 中川平三郎, "グライイン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巻, 第4号, pp. 77-83, 1992.
5. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp. 16-18, 2001.