

실험계획법에 의한 Si₃N₄-hBN 머시너블 세라믹스의 절삭성 평가

장성민*(인하대 대학원 기계공학과), 임대일*(인하대 대학원 기계공학과),
조명우**(인하대 기계공학부), 조원승(인하대 재료공학부)

Machinability Evaluation of Si₃N₄-hBN Machinable Ceramics Using Experimental Design Method

S. M. Jang(Grad. School, Inha Univ.), D. I. Lim(Grad. School, Inha Univ.), M.W. Cho(Dept. of Mechanical Eng. Inha Univ.), W.S. Cho(Dept. of Ceramics Eng. Inha Univ.)

ABSTRACT

Ceramics are very difficult-to-cut materials because of its high strength and hardness. Their machining process can be characterized by cracking and brittle fracture. Generally, ceramics are machined using traditional method such as grinding and polishing. However, such processes are generally costly and have low material removal rate. In this paper, to develop machinable ceramics those have good machinability without losing their material properties, machinability evaluations are performed by applying the experimental design method. In this paper, to evaluate the machinability of the developed ceramics, various workpieces are machined on the CNC machining center, and surface roughness are measured under predefined process parameters obtained using Taguchi method. And the experimental results are investigated to derive optimum cutting parameters for the given materials.

Key Words: difficult-to-cut materials(난삭재), machinable ceramics(가공성 세라믹스), surface roughness(표면 거칠기), Taguchi method(다구치 방법)

1. 서론

세라믹스는 강도, 내열성, 내마모, 내부식성 등과 같이 일반적인 금속재료에 비하여 상대적으로 우수한 물리적 특성을 가지고 있어 절삭공구, 자동차의 스파크 플러그 등과 같이 고온에서 사용되는 기계부품 외에 반도체 장비용 부품, 브라운관 제조용 치구 등에 있어 그 적용분야가 확대되어 가고 있다. 그러나 금속재료에는 없는 세라믹의 우수한 특성에도 불구하고 아직까지 세라믹스의 사용용도가 광범위하지 못한 이유는 기계가공이 어렵다는 단점이 있기 때문이다. 세라믹의 기계가공을 어렵게 하는 이유는 금속재료에 비하여 강도와 경도가 높을 뿐만 아니라 고유의 취성으로 인해 야기되는 문제 때문이다. 소결 방법으로 제작된 세라믹은 소결 후 발생하는 재료수축의 정도를 정확하게 예측하기가 어려우므로 제품에 요구되는 치수정밀도를 만족시키기에는 한계가 있다. 따라서 정밀한 공차

를 요구하는 경우나 소결에 의해서 최종 형상을 완성하기 어려운 경우에는 소결 후에 기계가공이 필수적이라 할 수 있다. 치수정밀도가 높은 세라믹 정밀부품을 대량생산하기 위해서는 적은 절삭깊이로 절입량에 한계가 있는 연삭 가공보다는 상대적으로 기계가공에 요구되는 시간을 감소시키기 위해 더 많은 재료 제거율이 가능한 절삭가공을 필요로 하는 경우가 많다. 그러나 일반적인 세라믹재료로는 절삭가공이 불가능하며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 세라믹스에 가공성을 부여한 머시너블 세라믹스가 개발되어 사용되고 있다. 본 연구는 다양한 용도에 적합한 머시너블 세라믹을 개발하기 위한 연구의 일환으로 세라믹스의 기계적 특성과 가공성을 평가하기 위한 목적을 가지고 있다. 이를 위해서 적합한 가공조건을 도출하기 위하여 실험계획법을 적용하여 실험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 개발된 머시너블 세라믹스의 가공성과 각 재료에 적합한 가공조건에 대하여 고찰하였다.

2. 머시너블 세라믹스의 특성

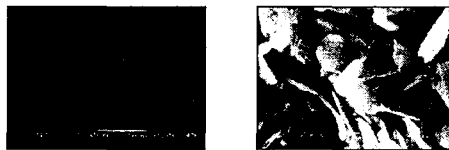
2.1 머시너블 세라믹스의 제조

그림 1 은 본 연구에 사용된 머시너블 세라믹스를 제조하기 위한 재료분말의 SEM 사진($\times 5,000$)을 나타낸 것이다. 세라믹스 제조를 위한 복합체의 매트릭스 분말로는 α - Si_3N_4 (Ube Kosan 사, E-10, α -phase >95%, 평균 입자 크기 : $0.17 \mu\text{m}$)를 사용하였고, 소결 조제로는 Y_2O_3 와 Al_2O_3 를 사용하였다. 그리고 가공성을 향상시키기 위하여 hBN(고순도 화학연구소, 순도: >99%, 평균 입자 크기 : $10 \mu\text{m}$)를 사용하였다. 아래 그림과 같이 BN 분말은 판상 형상을 가지고 있는 것이 관찰될 수 있으며, 이로 부터 세라믹스에 층상 벽개성을 부여하여 기계가공이 가능하게 된다.

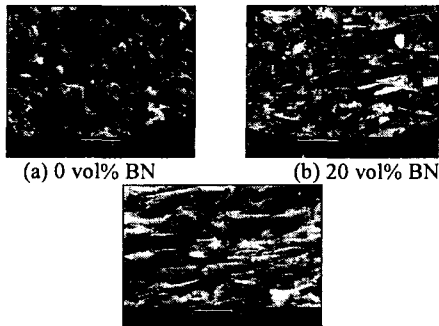
본 연구를 위하여 BN 의 체적함량이 10%, 20%, 30%인 복합체를 소결을 통하여 제조하였다, 그림 2 는 제조된 머시너블 세라믹스 파단면을 0%, 20%, 30%를 SEM 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 BN 의 양이 증가할수록 판상 구조가 증가하며, 이로 인하여 절삭성이 향상된다고 볼 수 있다.

2.2 머시너블 세라믹스의 물성치

위에서 언급한 바와 같이 BN 의 양이 증가하면 절삭성을 향상시키는 판상 구조가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 구조용 세라믹스는 기계 등의 부품으로 사용하기 위한 것이며, 따라서, 아무리 가공성이 우수하다고 하여도 세라믹스 본연의 성질이 크게 저하되지 않아야 한다.



(a) Si_3N_4 powder (b) BN powder
Fig.1 SEM micrographs of Si_3N_4 and BN powders.



(a) 0 vol% BN (b) 20 vol% BN (c) 30 vol% BN
Fig. 2 SEM micrographs of Si_3N_4 -BN composites.

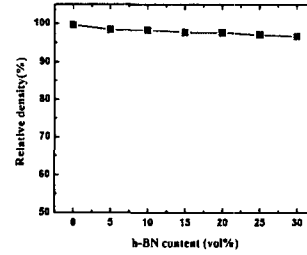


Fig. 3 Density plots of Si_3N_4 -BN ceramics

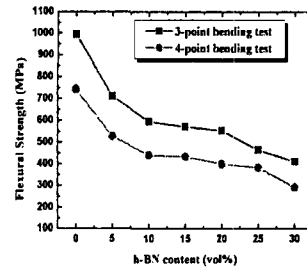


Fig. 4 Effects of BN contents on the flexural strength of Si_3N_4 -BN ceramics

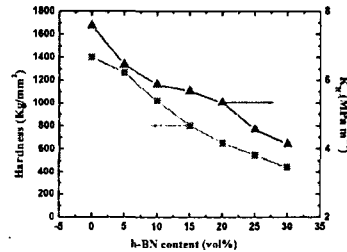


Fig. 5 Effects of BN contents on the Vickers hardness of Si_3N_4 -BN ceramics

Si_3N_4 -BN₄ 계 머시너블 세라믹스의 상온 굽힘강도 측정결과를 그림 3 에 나타내었다. BN 입자 무첨가의 경우 높은 강도를 나타내고 있으며, BN 입자의 첨가량이 많을수록 강도는 감소하였다. BN 입자의 첨가량이 많을수록 강도가 감소하였다. 이유는 (1) 탄성계수(Si_3N_4 : 300 GPa, BN : 41~103 GPa)가 상대적으로 낮은 BN 입자의 함량이 증가함에 따른 탄성율의 감소, (2) 소결 밀도의 감소에 따른 기공율 증가, (3) BN 입자의 첨가량이 증가함에 따른 응집된 BN 입자들이 존재할 가능성, (4) 침상의 BN 입자의 벽계면을 따라 일어날 파괴면적의 증가에 따른 표면에너지의 감소 등 여러 가지 복합적인 원인에 기인한다고 생각된다.

경도는 그림 5 에 나타낸 바와 같이, BN 입자를 첨가하지 않은 조성의 경우는 $1,619 \text{ kg/mm}^2$ 의 높은 경도값을 나타내었으나, BN 입자의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 그림에서 보는

바와 같이 BN의 양이 증가할수록 기계적 특성은 저하되고 있다. 따라서, 세라믹스 본연의 특성을 크게 저하시키지 않고 가공이 가능한 BN의 함량 및 이에 따른 최적의 가공조건의 결정이 함께 이루어야 요구하는 목적을 달성할 수 있다.

3. 변수 설계를 위한 다구찌 방법

소비자를 만족시키는 높은 품질의 제품을 생산하기 위하여 필수 요소인 공정설계는 중요하다. 다구찌는 이를 위해 효율적이고 조직적인 방법으로 강건 설계 기법인 품질관리 기법을 창안하였다. 품질 개선을 위한 효율적이고 체계적인 새로운 접근방법이라고 일컬어지는 다구찌 방법에서 적은 수의 실험으로 효율적이고 최적조건의 요인을 선정하기 위해서 수학자들에 의해 작성된 직교배열표를 이용했다. 그때 실험을 통해 얻어진 값과 원하는 값 사이에서의 일탈을 계산하기 위해 손실함수는 정의된다. 여기서 손실을 발생시키지 않는 경우는 오직 제품 성능의 특성치와 목표값의 차이가 나타나지 않는 경우이다. 다구찌 방법에서는 제품의 특성치가 이상적인 목표값에서 벗어나면 정도에 따라 손실발생을 일으키는 것으로 보기 때문이다. 다구찌에 의해 추천된 손실함수 $L(y)$ 는 다음과 같이 2차 함수로 근사시켜 사용된다.

$$L(y) = k(y-T)^2 \quad (1)$$

여기서 k 는 품질손실계수, y 는 성능 특성값, T 는 목표값이며 품질손실계수 k 의 계산은 아래와 같다.

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (2)$$

여기서 A 는 물품이 기능을 잃었을 때의 손실, Δ 는 기능을 잃게 되는 한계의 제공값이다.

손실함수의 값은 신호대 잡음(S/N)비로 변환된다. S/N 비는 공정특성에 대한 잡음인자의 영향을 효과적으로 추정할 수 있는 기법으로, 품질 특성값으로부터 S/N 비를 계산하고 이를 분석하여 제일 큰 값을 갖는 S/N 비를 최적수준의 조합으로 선정한다. 일반적으로 3가지 경우의 손실함수에 대한 계산식으로 망목 특성, 망소 특성, 망대 특성으로 분류되어 적용되고 있다. 머시너블 세라믹의 밀링 가공에 관한 본 연구에서 표면 거칠기에 대한 최적의 가공을 수행하기 위하여 손실함수에 대한 계산식으로 망소 특성을 선택한다. 망소 특성은 성능 특성치의 목표값 T 가 0인 경우로 성능 특성치가 작을수록 좋다. 손실함수 $L(y)$ 는 성능 특성치 y 가 0에서 증가함에 따라 증가한다. 망소 특성에 대한 S/N 비는 아래 식을 이용함으로써 계산된다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

여기서 n 은 실험의 수, y_i 는 i 차 [번째] 실험에서 실험값이다.

3.1 직교 배열표

제품의 불량을 적게 한다거나 품질의 산포를 작게 하려는 실험조사에는 일반적으로 고려하여야 할 인자의 수가 많다. 인자의 수가 많을 경우에 주효과와 기술적으로 없으리라고 생각되는 2인자 교호작용 및 교차의 교호작용에 관한 정보를 희생시켜서, 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 간단히 짤 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교 배열표이다. 직교 배열표에는 보통 2,3 수준계가 많이 쓰인다. 직교 배열표에는 $L_A(B^C)$ 의 형태의 기호로 많이 쓰인다. A 는 실험의 크기이며, B 는 수준 수, C 는 인자의 수를 나타낸다. 직교 배열표를 나타내는 방법에는 각 열에 수준계에 따른 기호나 숫자로 표시되며, 이 기호들은 각 열에 들어간 인자의 수준들을 구분 짓는 기호가 된다. 본 연구에서는 열의 수가 4 그리고 행의 수가 9인 $L_9(3^4)$ 수직 배열이 적용되었고, 각각에 대한 교호작용은 없는 것으로 하였다.

3.2 자유도

자유도(dgree of freedom)란 어떤 수준이 특성치를 보다 좋게 얼마나 좋게 하는가를 결정하기 위해 필요로 하는 인자 또는 교호작용의 수준사이에서의 최소 비교 횟수이다.

(1) 인자의 수준 수에서 선형제약조건을 빼면 각 인자의 자유도가 된다.

(2) 교호작용(interaction $A*B$)의 경우 각 인자의 자유도의 곱을 하면 교호작용의 자유도가 된다.

위 식에서 선형제약조건이란 수준평균에 대한 각 수준의 편차의 합은 0임을 나타낸다. 실험 계획법에 이용되는 직교배열표의 선정은 자유도에 의해서 결정된다. 즉 인자와 수준이 결정되면 직교배열을 선택해야 하는데 이때 임의의 직교배열을 사용할 수 있고 없고의 기준이 되어 주는 것이 자유도 결정이다. 직교배열마다 실험에 사용되는 인자와 수준의 총 자유도가 정해져 있어 인자의 수와 수준의 수가 결정되면 실험의 총 자유도를 계산하여 이용하려는 직교배열표를 선택한다.

3.3 분산 분석

분산분석(Analysis of Variance: ANOVA)란 먼저 특성값 전체의 산포를 총 제곱합으로 나타내어 이 총 제곱합을 실험에 사용된 각 요인들의 제곱합으로 분해하고, 각 요인의 제곱합을 그 요인들의 자유도로 나누어 불편분산을 계산한 다음, 각각의 불편분산을 오차분산으로 나누어 분산비 F_0 를 계산하

여 오차에 비하여 큰 영향을 주는 요인이 무엇인지를 찾아내는 분석방법으로 주로 분산 분석표를 만들어 해석한다.

3.4 절삭변수 최적화

S/N 비 분석에서 더 큰 S/N 비가 제어인자로 원한다는 것을 나타낸다. 이론적으로 더 높은 평균 S/N 비값을 갖는 제어 인자들의 수준으로 선택되어지도록 하는 것이 필요하다. S/N 비 응답그래프에서 가장 높은 값의 S/N 비의 수준에서 가장 영향력이 강한 인자의 수준을 나타내는 것이다.

3.5 신호대 잡음비(S/N ratio)

다구치는 신호대 잡음비를 사용하여 응답의 변화를 연구하는 중요성을 강조하였다. 수행특성은 망목특성, 망대특성, 망소특성의 세가지 형태를 갖는데 이러한 형태에 관계없이 더 큰 S/N 비는 더 나은 수행특성과 일치한다. 따라서, 공정변수의 최적수준은 더 높은 S/N 비를 갖는 수준이 된다

4. 실험

4.1 실험 방법 및 장치

본 연구에서 실험은 표면거칠기 데이터를 얻도록 설계되었다. 절삭가공 실험은 머시닝 센터에서 수행되었으며 인서트형 밀링공구인 엔드밀과 인서트 팁은 초경재질인 TECN32R 을 사용하였다. 시편의 고정은 알루미늄 지그를 제작하여 그림 6 과 같이 공구동력계에 볼트로 고정하였으며 지그와 세라믹 시편사이는 금속용 강력 접착제로 부착하였다. 절삭가공후의 인서트 팁은 제거 후 새로운 인서트 팁을 부착하여 다시 가공하도록 하여 공구마모로 인한 오차를 없도록 하였다.

가공면 거칠기는 표면측정기인 Taylor Hobson Surtronic 3+를 사용하여 측정하였고 산술적 평균값은 각각의 시편에서 중간부분에서 측정하였다. 공작물 재료는 Si₃N₄ 를 주성분에 각각 BN 함유량이 10%, 20%, 30%을 사용하였다. 절삭가공은 상향절삭방법을 적용하였으며 절삭유를 사용하지 않은 건식방법을 적용하였다. 절삭변수와 절삭변수에 대한 각각의 수준은 Table.1 과 같다.

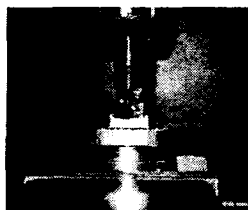


Fig.6 Photograph of real time machining

Table.1 Cutting parameters and their levels.

Symbol	Cutting parameter	Level 1	Level 2	Level 3
A	Feed rate (mm/min)	30	60	90
B	Cutting speed (m/min)	40	80	120
C	Depth of cut(mm)	0.05	0.1	0.2

Table.2 Experimental design for an L₉(3⁴) orthogonal array.

실험 번호	Cutting parameter level			e
	A	B	C	
	Feed rate	Cutting speed	Depth of cut	Error
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	1	3	3	
4	2	1	2	
5	2	2	3	
6	2	3	1	
7	3	1	3	
8	3	2	1	
9	3	3	2	

Table.3 Experiment result for surface roughness and S/N ratio.

	BN	F	S	D	Surface roughness (R _a)			SN
					1st	2nd	aver	
1	10	30	40	0.05	1.28	1.31	1.30	2.25
	20				0.79	0.81	0.80	1.94
	30				0.71	0.72	0.71	2.91
2	10	30	80	0.1	1.19	1.20	1.20	-1.55
	20				0.57	0.67	0.62	4.12
	30				0.67	0.69	0.68	3.35
3	10	30	120	0.2	1.02	0.97	1.0	0.04
	20				0.49	0.53	0.51	5.84
	30				0.61	0.65	0.63	4.01
4	10	60	40	0.1	1.53	1.47	1.50	-3.52
	20				0.99	0.95	0.97	0.26
	30				0.82	0.87	0.85	1.46
5	10	60	80	0.2	1.34	1.30	1.32	-2.41
	20				0.88	0.82	0.85	1.41
	30				0.73	0.75	0.74	2.61
6	10	60	120	0.05	1.02	0.99	1.0	-0.04
	20				0.82	0.74	0.78	2.15
	30				0.67	0.68	0.68	3.41
7	10	90	40	0.2	2.16	2.03	2.1	-6.43
	20				1.30	1.40	1.35	-2.61
	30				1.25	1.19	1.22	-1.73
8	10	90	80	0.05	1.95	1.83	1.89	-5.53
	20				1.09	1.10	1.10	-0.79
	30				1.09	1.12	1.10	-0.87
9	10	90	120	0.1	1.65	1.74	1.70	-4.59
	20				0.88	0.91	0.90	0.96
	30				1.28	1.3	1.29	-2.21

(Feed: mm/min, Speed: m/min, Depth: mm)

5. 결론 및 고찰

본 실험에서는 Si_3N_4 세라믹 성분 BN(Vol)을 각각 10%, 20%, 30%를 혼합하여 절삭성을 갖는 세라믹을 제조하고, 이에 대한 기계적 특성과 절삭특성을 평가하기 위한 실험을 수행하여 그 결과를 고찰하였다. 최적 절삭조건의 효율적인 도출을 위하여 실험계획법에 의해 실험이 수행되었으며, 인서트 팁을 사용한 두날 엔드밀의 실험에 의하여 다구치 방법의 직교배열표를 이용하여 표면거칠기를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

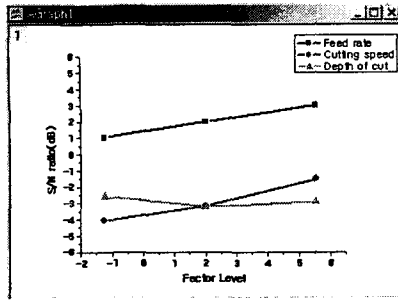


Fig.7 S/N ratio response graph BN(10%)

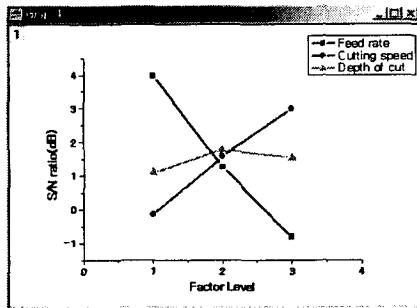


Fig.8 S/N ratio response graph BN(20%)

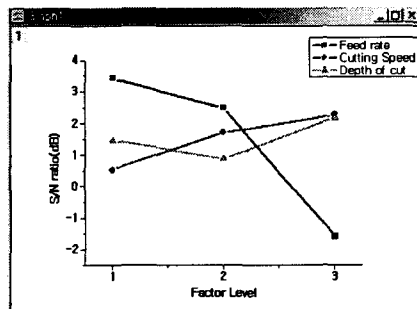


Fig.9 S/N ratio response graph BN(30%)

(1) 각각에 대하여 영향력이 강한 인자의 수준은 BN 함량이 10%Vol 에 대해서는 A3 B3 C1 이며, 20%Vol 에서는 A1 B3 C2, 30%Vol 에 대해서는 A1 B3 C3 이다.

(2) 표면거칠기면에 대하여 기여도는 10%Vol 에 관하여는 A 인자가 가장 큰 영향을 미치며, 그 다음 영향을 미치는 정도는 B 이며, A 가 가장 영향을 적게 미치는 것으로 나타났다. 20%Vol 에서는 B, A, C 의 순서로 크게 영향력을 미쳤으며, 30%Vol 에서는 A, B, C 의 순서의 크기로 영향력을 미쳤다.

(3) 머시너블 세라믹의 절삭가공에서는 BN 함량이 많은 30%Vol 의 경우가 일반적인 금속 절삭 가공에서와 유사한 절삭변수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 이것으로 인하여 30%Vol 에서 상대적으로 전단 소성변형을 갖는 연속칩의 발생 확률이 가장 큰 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Yuqing Cao, "Failure analysis of exit edges in ceramic machining using finite element analysis", Engineering Failure Analysis 8, pp 325-338, 2001.
2. Guangming Zhang, Yuqing Cao and Lixun Qi, "Single point cutting of machinable glass ceramics", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXVII, pp.159-164, 1999.
3. 김동우의 4 인, "머시너블 세라믹스의 마이크로홀 가공특성에 관한 연구", 한국공작기계학회, '02년도 춘계학술대회 논문집, p597-602, 2002.
4. 엄봉진의 3 인, "실험계획 및 분석: 다구치 방법과 직교표의 활용", 산학협동 공개강좌, 2000.
5. 박성현, 현대 실험계획법, 민영사, 1990.

Table 4. Analysis of Variance (ANOVA)

	BN (%)	$\Sigma(y)^2$	DF	Mean square	F_0	$F_{0.05}$
A	10	0.9325	2	0.4663	777.17	19
	20	0.3358		0.1679	47.97	19
	30	0.4878		0.2439	78.67	19
B	10	0.2424	2	0.1212	202	19
	20	0.5943		0.2972	84.91	19
	30	0.0123		0.0062	2.00	
C	10	0.0105	2	0.0052	8.75	
	20	0.0089		0.0045	1.29	
	30	-0.3530		-0.1770	-57.1	
e	10	0.0012	2	0.0006		
	20	0.007		0.0035		
	30	0.0061		0.0031		
Σ	10	1.1866	8			
	20	0.9460				
	30	0.1410				