

다구찌법을 이용한 석영의 최적 가공조건 선정에 관한 연구

정호인*, 최성준**, 이춘만***,#

*창원대학교 메카트로닉스공학부, **창원대학교 스마트제조융합협동과정, ***창원대학교 기계공학부

Selection of Optimal Processing Conditions for Quartz Using the Taguchi Method

Ho-In Jeong*, Seong-Jun Choi**, Choon-Man Lee***,#

*Mechanical Design and Manufacturing, School of Mechatronics Engineering, Changwon National University

**School of Smart manufacturing Engineering, Changwon National University

***Dept. of Mechanical Engineering, College of Mechatronics, Changwon National University

(Received 15 December 2021; received in revised form 27 December 2021; accepted 28 December 2021)

ABSTRACT

Quartz (SiO₂) has high abrasion and heat resistances and excellent chemical and mechanical properties; therefore, it is used in various industries, such as machinery, chemistry, optics, and medicine. Quartz is a high-hardness and brittle material and is classified as the topmost difficult-to-cut material, which is because of the cracking or chipping at the edge during processing. Corner wear, such as cracks and chippings that occur during cutting, is a major cause for the deterioration in the machining quality. Therefore, many researchers are investigating various techniques to process quartz effectively. However, owing to the mechanical properties of quartz, most studies have been conducted on grinding, micromachining, and microdrilling. Few studies have been conducted on quartz processing. The purpose of this study was to analyze the machining characteristics according to the machining factors during the slot machining of quartz using a cubic boron nitride (CBN) tool and to select the optimal machining conditions using the Taguchi method. The machining experiment was performed considering three process variables: the spindle speed, feed rate, and depth of cut. The cutting force and surface roughness were analyzed according to the processing conditions.

Keywords : Quartz(석영), Machining Conditions(가공조건) Optimal Conditions(최적조건), Design of Experiment (실험계획법), Taguchi Method(다구찌법)

1. 서 론

석영(SiO₂)은 높은 내마모성, 내열성과 우수한 화학적, 기계적 특성을 가지고 있어 기계, 화학, 광학

및 의료 등의 다양한 산업분야에서 사용되고 있는 소재이다. 이러한 석영 소재는 대표적인 고경도 취성 소재로 가공 시 모서리부의 크랙(Crack) 또는 칩핑(Chipping)이 발생하여 절삭가공이 어려운 난삭재(difficult to cut material)의 최상위 소재로 분류된다^[1~2]. 절삭가공 시 발생하는 크랙, 칩핑 등의 경계 마모(Corner wear)는 가공 품질을 떨어트리는 주요

Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

원인이다. 따라서 많은 연구자들은 석영을 효과적으로 가공하기 위해 다양한 가공기술을 연구하고 있다^[3-6]. 하지만 석영의 기계적 성질로 인해 대부분 연삭 또는 미세가공 및 미세 드릴링에 관한 연구가 수행되었으며 벌크 가공이나 일반 밀링(Milling)가공 등에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구의 목적은 CBN(Cubic Boron Nitride) 공구를 이용한 석영의 슬롯 가공에서 가공요인에 따른 가공 특성을 분석하고 다구찌법(Taguchi method)을 활용해 최적 가공조건을 선정하는 것이다. 가공실험은 스핀들 회전속도(Spindle speed), 이송 속도(Feed rate) 및 절삭 깊이(Depth of cut) 3가지 공정 변수를 사용하여 수행하였으며, 실험 결과값의 정확성을 위하여 조건당 3회 반복 실험을 진행하였다. 실험결과로 가공조건에 따른 절삭력과 표면거칠기를 분석하였다.

2. 가공 실험

2.1 실험 방법

Fig. 1은 석영의 가공실험에 사용된 장비를 나타낸다. 가공실험은 5축 공작기계(Hyundai WIA Inc., Type Hi-V560M)에서 수행되었으며, 공구동력계(Kistler Inc., 9257B)를 공작기계의 테이블에 설치하여 가공 시 절삭력을 측정하였다. 실험에 석영의 크기는 20x60x10mm(WxLxT)이며, 직경 8 mm의 CBN 엔드밀 (ACEDIA, type ST8-8-100L)을 사용하여 가공하였다. 석영의 표면거칠기는 조도측정기(Mitutoyo, SJ-210)로 측정하였다. 가공 전 시편의 표면거칠기(Ra)는 0.639 μ m로 나타났다.

2.2 실험계획법

석영의 가공실험에서는 다양한 가공요인이 가공 특성에 영향을 미치며, 이러한 가공요인이 가공 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 다구찌법(Taguchi Method)을 사용하여 실험을 수행하였다. 다구찌법은 품질특성치에 따른 손실함수(Loss function)와 S/N비(Signal-to-noise ratio)의 도입으로 산포를 줄임으로써 품질의 균일화가 가능하며, 직교배열표를 사용하고 있어 공정 최적화를 위한 실험 횟수를 크게 줄일 수 있다^[10-11,14].

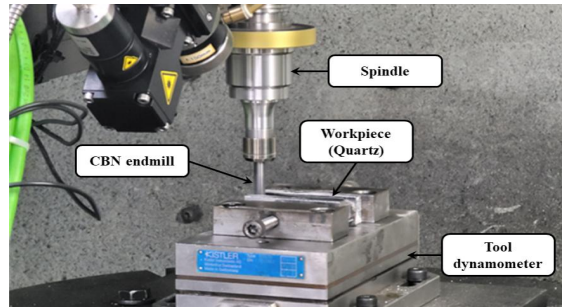


Fig. 1 The experimental set-up

2.3. 가공 조건

석영 가공에 주요 가공요인인 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이는 경계 마모에 상당한 영향을 미친다. 따라서, 본 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 대해 실험을 설계하였다. 스핀들 회전속도는 8,000~12,000RPM 범위, 이송 속도는 10~20mm/min 범위, 절삭 깊이는 0.15~0.25mm 범위에서 각각 3수준으로 설정하였다. Table 1은 실험을 위한 석영의 가공조건을 나타내며, 표 Table 2는 다구찌법에서 사용된 L_9 직교배열표를 나타낸다.

Table 1 Machining condition

	Code	Level		
		1	2	3
Spindle speed (RPM)	S	8,000	10,000	12,000
Feed rate (mm/min)	F	10	15	20
Depth of cut (mm)	D	0.15	0.20	0.25

Table 2 Orthogonal array table (coded)

No.	Experimental Matrix Condition		
	S	F	D
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

3. 실험 결과

3.1 가공 결과

설계된 직교배열표를 사용하여 실험을 수행하였으며, 실험결과 분석을 위해 각 실험에 따른 절삭력과 표면거칠기를 분석하였으며, 각 실험은 3회 반복하여 수행하였다.

Table 3은 실험에 따른 절삭력 및 표면거칠기를 나타내며, Fig. 2는 각 실험 결과에 따른 가공 표면을 나타낸다. 절삭력은 X, Y 및 Z축 분력을 합하여 측정하였으며, 반복실험 결과 중 가장 높은 절삭력을 사용하였다. 표면거칠기는 산술평균거칠기(Ra)를 3회 측정하여 가장 높은 표면거칠기 값을 사용하였다.

절삭력과 표면거칠기는 최소값을 나타내는 가공조건이 최적 가공조건으로 선정할 수 있으며, S/N 비율을 계산하기 위해 절삭력, 표면거칠기에 망소 특성을 적용하였다. 따라서 절삭력과 표면거칠기의 결과 중 가장 큰 결과값을 사용하여 이를 최소화 시키는 조건을 최적 가공조건으로 선정하였다. 망소특성에 대한 손실함수는 (1)과 같다.

$$L_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \quad (1)$$

여기서, i 는 직교배열표상의 실험번호, n 은 총 반복실험횟수, j 는 i 조건에서의 반복실험횟수, y_{ij} 는 i 조건의 j 번째 실험의 응답변수이다.

또한, 각 가공요인이 가공 특성에 미치는 영향도를 분석하기 위해 스피들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이에 대한 주효과도를 분석하였다. 주효과도는 각 요인의 평균 반응을 나타내며, 기울기의 크기에 따라 결과값에 대한 영향도를 나타낸다. Fig. 3는 절삭력의 S/N 비에 대한 주효과도를 나타내며, Fig. 4는 표면거칠기의 S/N 비에 대한 주효과도를 나타낸다.

3.3 분산분석

분산분석(ANOVA)은 절삭력 및 표면거칠기에 대한 요인의 영향을 백분율로 추정하였다. Table 4와 5는 각각 절삭력 및 표면거칠기에 대한 ANOVA

Table 3 Orthogonal array table (uncoded)

No.	Spindle Speed [rpm]	Feed rate [mm/min]	Depth of cut [mm]	Cutting force [N]	Surface roughness (Ra) [μ m]
1	8,000	10	0.15	9.396	0.599
2	8,000	15	0.20	11.16	0.712
3	8,000	20	0.25	13.202	0.434
4	10,000	10	0.20	8.005	0.499
5	10,000	15	0.25	11.521	0.621
6	10,000	20	0.15	8.369	0.513
7	12,000	10	0.25	5.109	0.721
8	12,000	15	0.15	4.339	0.398
9	12,000	20	0.20	7.662	0.523

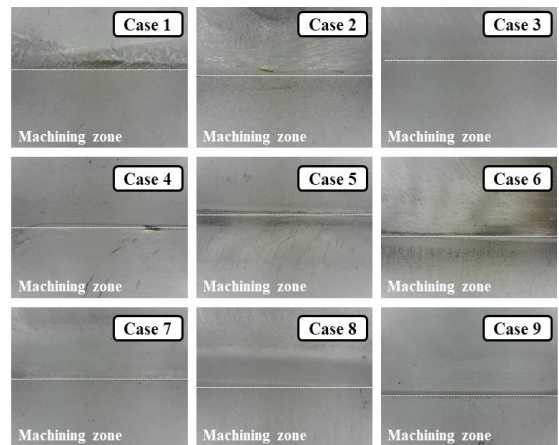


Fig. 2 The machining surface of Quartz

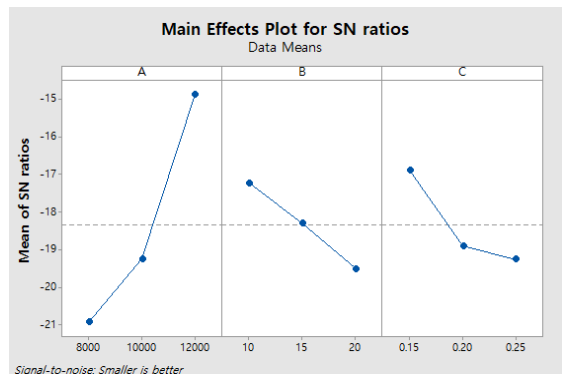


Fig. 3 Main effects plot for the S/N ratio of cutting force

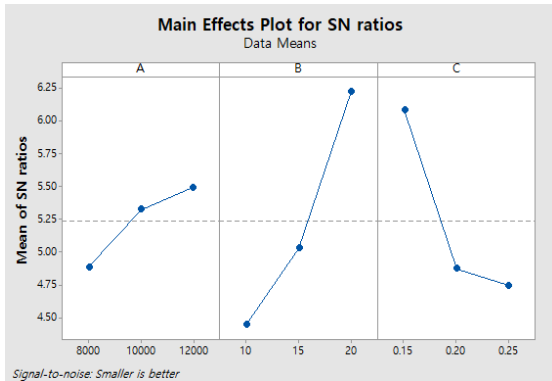


Fig. 4 Main effects plot for the S/N ratio of Surface roughness

결과를 나타낸다. 절삭력에 가장 큰 영향을 미치는 영향 요인은 스핀들 회전속도였으며, 절삭력에 대한 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이의 기여도는 각각 69.58%, 0.24%, 29.55%로 나타났다. 절삭력에 대한 오차의 기여도는 0.62%로 나타났다. 표면거칠기에 가장 큰 영향을 미치는 영향 요인은 이송속도로 나타났다. 표면거칠기에 대한 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이의 기여도는 각각 5.39%, 57.17%, 35.77%로 나타났다. 표면거칠기에 대한 오차의 기여도는 1.66%로 나타났다.

3.4 반응 최적화

가공실험 결과를 기반으로 반응 최적화를 통해 최적 가공조건을 선정하였다. 반응 최적화는 실험군을 공통으로 최적화하는 요인의 조합을 계산하여 최적의 결과를 나타내는 실험군을 최적 조건으로 선정한다. Table 6는 응답 최적화 과정을 나타낸다.

반응 최적화결과, 석영 가공 시 최적 가공조건은 스핀들 속도는 12,000RPM, 이송속도는 15mm/min, 절삭 깊이 0.15mm으로 나타났으며, 이때 절삭력은 4.339 N, 표면거칠기는 0.398 μ m로 나타났다. 표면거칠기는 가공 전 거칠기 대비 약 61.9% 감소하였다.

3.5 예측 방정식 및 검증 실험

분산분석 결과의 적합성을 평가하기 위해 검증 실험을 수행하였으며, 절삭력 및 표면거칠기의 예측 방정식은 다음과 같다.

Table 4 ANOVA table for the cutting force

Factors	Degree of freedom	Sum of squares	F-value	P-value	Contribution (%)
Spindle speed	2	47.539	111.90	0.004	69.58
Feed rate	2	0.166	0.39	0.005	0.24
Depth of cut	2	20.192	47.53	0.002	29.55
Error	2	0.425	-	-	0.62
Total	8	68.322	-	-	100.00

Table 5 ANOVA table for the Surface roughness

Factors	Degree of freedom	Sum of squares	F-value	P-value	Contribution (%)
Spindle speed	2	0.00559	3.24	0.005	5.39
Feed rate	2	0.059256	34.39	0.002	57.17
Depth of cut	2	0.037072	21.52	0.004	35.77
Error	2	0.001723	-	-	1.66
Total	8	0.103642	-	-	100.00

Table 6 Response optimization

Response	Goal	Target	Upper	Weight	Importance
Cutting force	Minimum	4.339	13.202	1	1
Surface roughness	Minimum	0.398	0.721	1	1

$$F_C = 14.11 - 0.001387S + 0.2241F + 25.76D \quad (2)$$

$$R_a = 0.641 - 0.000009S - 0.01163F + 0.887D$$

여기서, F_C 는 절삭력을 나타내고 R_a 는 표면거칠기를 나타낸다. 가공요인을 통해 각 가공 특성을 예측하기 위해 다중 선형 회귀분석 모델을 구축하

여 예측방정식을 도출하였다. 각 예측방정식의 요인에 대한 기울기는 각 요인들의 상관계수에 의해 산출되었다. 예측방정식의 강건성(Robustness)을 검증하기 위해 각 인자에 대한 P-value를 분석하였으며, 각 인자들의 P-value는 모두 0.05이하로 유의수준을 만족하였다^[12-13, 14].

예측식의 정확성 분석을 위해 최적 가공조건을 포함하여 요인의 수준을 무작위로 추가해 5회의 검증 실험을 수행하였으며, Table 7은 검증 실험의 가공조건을 나타낸다. 절삭력에 대한 예측 방정식과 검증 실험결과 간의 최대 오차는 9.94%로 나타났다. 표면거칠기에 대한 예측 방정식과 검증 실험결과 간의 최대 오차는 7.11%로 나타났다. Table 8은 검증 실험 조건에서 실험결과의 예측값과 측정값을 나타낸다. Fig. 5는 절삭력에 대한 예측값과 측정값을 나타내며, Fig. 6은 표면거칠기에 대한 예측값과 측정값을 나타낸다.

Table 7 Machining conditions for verification experiments

No.	Spindle Speed [rpm]	Feed rate [mm/min]	Depth of cut [mm]
1	12,000	20	0.15
2	8,000	15	0.20
3	10,000	10	0.20
4	12,000	10	0.25
5	12,000	15	0.15

Table 8 Predicted and measured values of the verification experiments

No.	Predicted		Experimental	
	Cutting force [N]	Surface roughness [μm]	Cutting force [N]	Surface roughness [μm]
1	5.812	0.433	5.884	0.412
2	11.527	0.572	12.14	0.611
3	7.633	0.612	7.891	0.575
4	6.147	0.638	5.536	0.645
5	4.692	0.492	4.588	0.457

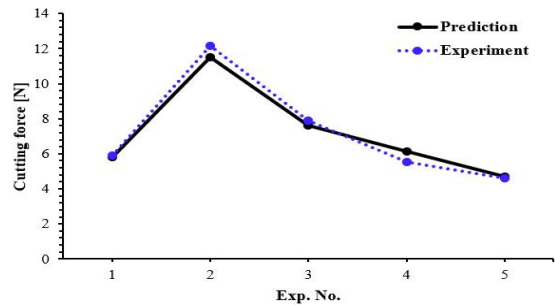


Fig. 5 Comparison of the result of the prediction equation and verification experiments for the cutting force

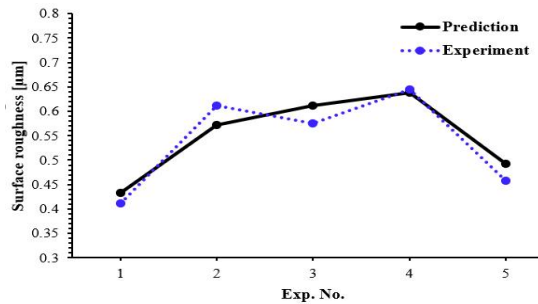


Fig. 6 Comparison of the result of the prediction equation and verification experiments for the surface roughness

4. 결론

본 연구에서는 석영 가공 시 절삭력을 최소화하고 가공 품질을 최대화하는 최적 가공조건을 선정하였다. 또한 최적의 가공조건을 결정하기 위해 다구찌법을 적용하였으며, 절삭력 및 표면거칠기와 같은 가공 특성을 S/N 비를 사용하여 분석하였다.

1. 석영의 최적 가공조건을 선정하기 위해 절삭력 및 표면거칠기를 잡음요인으로 선정하고 다구찌법을 통해 실험설계를 수행하였다. 주요 가공요인으로 스펀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이를 선정하였으며, 3가지 요인을 3수준으로 나누어 실험을 설계하였다.
2. 실험결과를 통해 분산분석을 수행한 결과, 절삭

력에 대한 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이의 기여도는 각각 69.58%, 0.24%, 29.55%로 나타났다. 또한, 표면거칠기에 대한 스핀들 회전속도, 이송속도 및 절삭 깊이의 기여도는 각각 5.39%, 57.17%, 35.77%로 나타났다. 표면거칠기에 대한 오차의 기여도는 1.66%로 나타났다.

3. 반응 최적화를 통해 석영 가공 시 최적 가공조건을 선정하였으며, 최적 가공조건은 스핀들 속도는 12,000RPM, 이송속도는 15mm/min, 절삭 깊이 0.15mm으로 나타났다.
4. 절삭력 및 표면거칠기에 대한 예측 방정식의 정확성을 평가하기 위해 검증 실험을 수행하였으며, 각 예측 방정식과 검증 실험 간의 최대 오차는 9.94%로 나타났다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부의 W300프로젝트 기술개발사업 지원에 의한 연구임[No. S2641371, “공정 모듈 교환방식의 윈스탑 다공정 제조혁신 솔루션 개발”]

REFERENCES

1. Chi, S. H., “Effect of Annealing Temperature on the Properties of $\text{NaNbO}_3:\text{Eu}^{3+}$ Phosphor Thin Films Deposited on Quartz Substrates,” *Journal of The Korean Institute of Surface Engineering*, Vol. 54, No. 2, pp. 96-101, 2021.
2. Chung, N. Y. and Jin, Y. H., “Cutting Characteristics of Quartz by Abrasive Waterjet,” *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp. 118-126, 2005.
3. Lin, S. Y. and Chen, J. Z., “Effect of Various Assisted Machining Technique Applications on Cutting Performance of Quartz Glass Milling,” *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation*, pp. 1583-1586, 2017.
4. Kumar, S., Doloi, B. and Bhattacharyya, B., “Experimental investigation into Micro Ultrasonic Machining of Quartz.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 653, No. 1, pp. 012027, 2019.
5. Bindu, M. J. and Hiremath, S. S., “Machining and Characterization of Channels and Textures on Quartz Glass Using μ -ECDM Process,” *Silicon*, Vol. 11, pp. 2919-2931, 2019.
6. Guo, X., Zhai, R., Kang, R., Jin, Z. and Guo, D., “Study of the influence of tool rake angle in ductile machining of optical quartz glass,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, No. 1, pp. 803-813, 2019.
7. Oza, A. D., Kumar, A. and Badheka, V., “Improving quartz micro-machining performance by magnetohydrodynamic and zinc-coated assisted traveling wire-electrochemical discharge machining process,” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 28, pp. 970-976, 2020.
8. Liu, Y., Wei, Z., Wang, M. and Zhang, J., “Experimental investigation of micro wire electrochemical discharge machining by using a rotating helical tool,” *Journal of Manufacturing processes*, Vol. 29, pp. 265-271, 2017.
9. Zheng, L. K. and Sheu, D. Y., “Polycrystalline diamond tools fabrication by micro EDM and their application of brittle material machining,” *Procedia CIRP*, Vol. 95, pp. 399-402, 2020.
10. Kim, J. D. and Kim, Y. S., “Process Optimization for Plasma-sprayed Cr_2O_3 Coating Using Taguchi Method,” *Journal of Power System Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 58-63, 2020.
11. Cao, X. F., Woo, W. S. and Lee, C. M., “A study on the laser-assisted milling of 13-8 stainless steel for optimal machining,” *Journal of Optics and Laser Technology*, Vol. 132, 2020.
12. Choi, M. G., Shin, H. S., Lee, J. H. and Kwon, E. S., “Performance Prediction of Torque Converter Using Multiple Regression Analysis Focused on Stator Shape,” *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 24,

No. 1, pp. 39~48, 2019.

13. Lee, M. G., Lee, J. W., Yoon, D. H. and Kim, J. H., "Development of Compressive Failure Strength for Composite Laminate Using Regression Analysis Method," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 40, No. 10, pp. 907~911, 2016.
14. Jeong, H. I., Lee, C. M. and Kim, D. H., "Optimization of CFRP Drilling Conditions Using the Taguchi Method," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A, Vol. 45, No. 12, pp. 1077~1083, 2021.