

## 다구치 방법을 이용한 지르코니아 세라믹스 페룰의 연삭 가공 특성 평가

김기환\*, 최영재, 홍원표, 이석우, 최현중(한국생산기술연구원)

### Evaluation of Grinding Machining Characteristics of ZrO<sub>2</sub> Ferrule Using the Taguchi Method

G. H. Kim, Y. J. Choi, W. P. Hong, S. W. Lee, H. Z. Choi (KITECH)

#### ABSTRACT

As the optical communication industry is developed, the demand of optical communication part is increasing. ZrO<sub>2</sub> ceramic ferrule is very important part which can determine the transmission efficiency and information quality to connect the optical fibers. In general ZrO<sub>2</sub> ceramic ferrule is manufactured by grinding process because the demands precision is very high. And the co-axle grinding process of ZrO<sub>2</sub> ceramic ferrule is to make its concentricity all of uniform before centerless grinding. This paper deals with the analysis of the process parameters such as grinding wheel speed, grinding feedrate and regulating wheel speed as influential factors, on the concentricity and surface finish developed based on Taguchi's experimental design methods. Taguchi's tools such as orthogonal array, signal-to-noise ratio, factor effect analysis, etc. have been used for this purpose optimal condition has been found out. Thus, if possible be finding highly efficient and quality grinding conditions.

**Key Words** : ZrO<sub>2</sub> ceramic ferrule(지르코니아 세라믹 페룰), optimal condition(최적 조건), Taguchi method(다구치 방법), co-axle grinding process(동축 연삭 공정), concentricity(동심도)

#### 1. 서론

최근 음성, 화상 등 대량의 데이터를 통신하는 차세대 정보 인프라의 발전으로 광통신 단말기 및 교환기의 수요가 폭발적인 증가를 보이고 있다. 이러한 광섬유의 접속 또는 분기 시 광섬유를 보호하고 또한 초정밀의 광축 맞춤시 데이터의 손실을 최소화하기 위해서는 페룰의 초정밀 연삭 가공이 필수적으로 요구된다. 지르코니아 세라믹스는 산화물계 세라믹으로서 기계적 강도와 파괴인성이 높고, 내마멸성, 내화학적, 내식성이 우수하여 광통신 부품 등 여러 분야에 응용되고 있다.<sup>1</sup> 고정밀도의 가공이 요구되는 광통신용 지르코니아 세라믹스 페룰은 고정도와 취성을 가진 난삭재이다. 이러한 난삭재의 세라믹 재질은 다이아몬드 연삭숫돌을 이용한 연삭가공이 가장 효율적인 방법인 것으로 알려져 있다.<sup>2,3</sup>

일반적으로 최적 연삭 조건이라고 하는 것은 대상으로 하는 연삭작업 목적에 따라 달라진다. 연삭작업을 최적조건 상태에서 실시하려면, 각종 작업조건을 가공특성을 조사한 뒤에 각 조건의 최적값을 구하여 종합적인 관점에서 최적연삭 조건을 결정하여야 한다. 연삭가공은 숫돌에 불균일하게 분포된 미소입자를 절삭날로 사용하기 때문에, 입자당 재료제거량이 매우 적어 정밀한 가공 표면을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 연삭가공에는 관여하는 인자들이 많고, 그 인자들간의 상호작용으로 인하여 가공품위에 영향을 미친다. 이러한 각각의 인자에 대한 평가뿐만 아니라 인자들 간의 상호작용을 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 이와 같이 공정에 관여하는 인자들 사이의 상호작용을 효과적으로 분석하는 방법이 실험계획법(design of experiments)이다. 다구치(Taguchi)는 실험계획법을 실험에 의하여 정보의 획득효율을 높여주기 위한

일반적인 기술의 전체라 정의하였고, 품질을 제품이 출하되면서 사회에 미치는 손실로써 정의하였다. 다구치 방법은 제품성능 특성치에 영향을 주는 제어 가능한 인자들의 최적화 분석과정을 가능하게 한다.

본 연구에서는 광통신용 지르코니아 세라믹스 페룰의 동축 가공(co-axle machining)을 목적으로 초미세 편을 이용한 동축가공기에서 각 연삭가공조건에 따른 페룰의 동심도, 진원도, 표면거칠기의 영향에 대해 검토하고, 가공정밀도를 향상 시킬 수 있는 지르코니아 세라믹스 페룰의 최적 가공조건을 선정하고자 하였다. 최소의 필요 실험을 통한 효율적인 결과를 얻기 위해 다구치 방법(Taguchi method)을 이용하였다.<sup>4</sup>

## 2. 동축 가공 연삭 실험

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 동축가공 연삭시스템을 사용하였으며, 이의 주요사양은 Table 1 과 같다. 연삭숫돌의 입자는 다이아몬드이고, 결합제로는 레진본드, 결합도 N, 침중도 100, 메쉬입도 140을 사용하였으며, 휠의 치수(내경 x 외경 x 폭)는 95 x 280 x 12(mm) 이며, 재질은 SUS 이다. 동축 가공의 이송부는 마이크로 단위의 페룰 가공을 위해서 0.1  $\mu\text{m}$  이하의 미소 절입 분해능을 가지는 볼스크류와 서보모터를 이용하였으며, 서보 모터는 CNC 컨트롤러를 사용하여 제어한다.

Table 1 Specifications of experimental system

	Item	Specification
Spindle	Bearing Type	Angular Ball Bearing
	Radial Stiffness (N/ $\mu\text{m}$ )	$\geq 100$
	Radial Run-out ( $\mu\text{m}$ )	$\leq 0.5$
	Maximum Speed (rpm)	10,000
	Vibration Amplitude ( $\mu\text{m}$ )	$\leq 0.5$
	Heat Generation ( $^{\circ}\text{C}$ )	5
Feeding System	Maximum Speed (mm/sec)	200
	Maximum Stroke (mm)	70
	Minimum Feed ( $\mu\text{m}$ )	0.1
	Actuator	Servo Motor
Chucking System	Chucking Alignment ( $\mu\text{m}$ )	$\leq 0.3$
	Roundness of Center-pin ( $\mu\text{m}$ )	$\leq 0.3$
Loading & Unloading System	Speed of Loading and Unloading (pcs/min)	$\geq 10$
Cooling System	Rate of Purification (%)	$\geq 95$

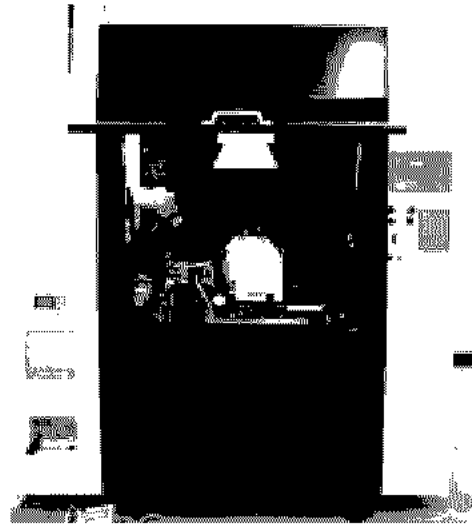


Fig. 1 Co-axle grinding machining system

### 2.2 실험조건

본 실험에서는 Grinding Wheel(GW)의 회전수, Regulating Wheel(RW)의 회전수, Grinding Wheel의 2차 이송속도(황삭), 3차 이송속도(정삭)를 인자로 선정하였으며, 수준간의 간격을 일정하게 나누어 4 수준으로 하였다. Table 3 에 실험에 사용된 인자와 수준의 구체적인 값을 나타내었다.

페룰의 척킹 압력은 0.05 MPa로 일정하게 하였다. 페룰의 척킹압력이 0.05 MPa보다 커지게 되면, 페룰의 회전이 원활하지 못하게 되어 가공 후, 편가공이나 가공형상이 좋지 않게 되는 결과를 가져오게 된다. 따라서 다수의 예비 실험 결과를 통해 원활한 페룰 회전과 가공시 페룰이 이탈하는 현상을 방지할 수 있는 압력으로 설정하였다.

실험을 진행 하기 전에 연삭휠을 드레싱하여 휠의 표면 불량으로 인한 페룰의 가공형상 오류를 최소화 할 수 있도록 하였으며, 예비실험을 통해 페룰과 연삭휠 간의 평행상태를 교정하였다.

각각의 인자와 수준을  $L_{16}(4^5)$ 의 직교배열을 이용하여 실험을 계획하였다. 일반적인 실험방법으로 실험을 할 경우 각 인자와 수준에 대해 4<sup>4</sup>번, 즉 256 번의 실험이 필요하지만 다구치방법을 이용하면 16 번의 실험으로 가장 적합한 최적조합을 찾아 낼 수 있다. Table 4 는 실험에 사용된 직교배열표를 나타낸다.

Table 3 Factors and levels selected for experiment

Factor [Lable]	L-1	L-2	L-3	L-4
GW Speed (rpm) [GS]	1400	1600	1800	2000
GW 2nd Feed (mm/min) [G2]	0.08	0.10	0.12	0.14
GW 3rd Feed (mm/min) [G3]	0.02	0.04	0.06	0.08
RW Speed (rpm) [RS]	10	20	30	40

Table 4 Standard L<sub>16</sub> orthogonal array with factors and levels

Trial no.	Factors and their levels			
	GS	G2	G3	RS
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

### 2.3 실험결과 및 분석

다구치 방법은 종래의 실험계획법에 비해 제어 불가능한 조건들이 실험결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치(measurement characteristic)로 변환하여, 산포를 작게하는 조건들의 값을 찾아내는 강건 설계기법(robust design)이라 할 수 있다.<sup>5</sup>

실험은 Table 4 와 같이 직교배열표에 따라서 실시하였고, 각 실험은 3 회 반복실험을 하였다. 각각의 가공시편에 대해 동심도와 표면거칠기 값을 측정하였으며, 동심도와 표면거칠기 값은 작을수록 좋으므로 S/N ratio 계산은 다음의 망소특성에 관한 평가 식(1)을 이용하였다.<sup>6,7</sup>

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

다음의 Table 5 와 Table 6 은 S/N ratio 를 이용하여 각 인자의 수준별 연삭 가공물의 동심도와 표면거칠기에 미치는 영향력과 영향력의 최대값과 최소값의 차(difference)를 구한 것이다.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각 인자들의 수준이 변함에 따른 동심도와 표면거칠기에 대한 영향력을 나타낸 그림이다. 각 수준의 변화에 따른 영향력의 차가 크게 나타나는 인자일수록, 즉 기울기의 변화 정도가 큰 인자일수록 페물의 동심도와 표면거칠기에 큰 영향을 미친다.

Table 5 Response table of S/N ratio for each factor (concentricity)

	Factors			
	GS	G2	G3	RS
L - 1	-8.6468	-9.5711	-11.3378	-4.4913
L - 2	-9.6210	-10.2627	-7.5102	-6.6425
L - 3	-7.9478	-8.6534	-7.1152	-12.4318
L - 4	-10.4043	-8.1326	-10.6567	-13.0542
Diff.	2.4566	2.1301	4.2225	8.5629
Rank	3	4	2	1

Table 6 Response table of S/N ratio for each factor (surface roughness)

	Factors			
	GS	G2	G3	RS
L - 1	9.3765	9.87752	9.83166	9.48768
L - 2	8.9826	9.61655	9.36744	9.92690
L - 3	9.1984	8.78286	9.41236	8.98415
L - 4	10.2515	9.53207	9.19754	9.41027
Diff.	1.2689	1.09467	0.63412	0.94274
Rank	1	2	4	3

동심도에 대해서는 RW Speed(RS), GW 3 차 이송 속도(G3), GW Speed(GS)의 순서로 영향을 미치고, GW 2 차 이송속도(G2)는 비교적 작은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 동심도에서 RW Speed(RS)가 가장 큰 영향을 미치는 이유는, 페물의 가공공정 상 회전하고 있는 RW 가 접촉됨에 따라서 페물을 회전시킬 때, 페물이 회전함에 따라 상대적인 run-out 이 커지기 때문이라 생각된다.

표면거칠기에서는 GW Speed(GS), GW 2 차 이송 속도(G2), RW Speed(RS)의 순서로 큰 영향을 미치고, GW 3 차 이송속도(G3)는 페물의 표면거칠기에 미치는 영향이 비교적 작은 것을 알 수 있다. 이는 GW Speed, 즉 슷들의 회전수가 빠를수록 같은 이송속도에서 상대적으로 적은 재료제거량을 보이고, 또한 높은 회전수에 따라 페물에 걸리는 연삭 부하가 작아지기 때문으로 생각된다.

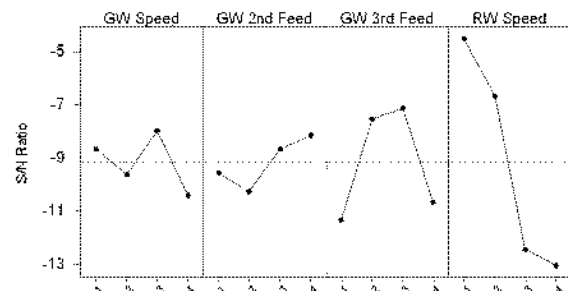


Fig. 5 Main effects plot for S/N ratios of concentricity

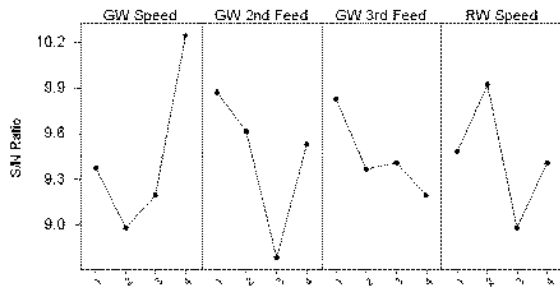


Fig. 6 Main effects plot for S/N ratios of surface roughness

이상의 결과를 통해 각 인자의 수준별 동심도와 표면거칠기에 미치는 영향력이 큰 값을 연삭가공조건으로 선정하게 되면, 이것이 곧 각각의 동심도와 표면거칠기에서의 최적 연삭 조건이 될 것으로 생각된다.

Table 7 Optimal grinding conditions of each factor

Factors	concentricity		surface roughness	
	notation	conditions	notation	conditions
GW Speed (rpm)	GS <sub>3</sub>	1800	GS <sub>4</sub>	2000
GW 2nd Feed (mm/min)	G2 <sub>4</sub>	0.14	G2 <sub>1</sub>	0.08
GW 3rd Feed (mm/min)	G3 <sub>3</sub>	0.06	G3 <sub>1</sub>	0.02
RW Speed (rpm)	RS <sub>1</sub>	10	RS <sub>2</sub>	20

보통 최적 연삭 조건은 동심도와 표면거칠기를 동시에 만족시켜야 한다. Table 7에서 보는 바와 같이 GW 2차 이송속도와 3차 이송속도는 각각의 조건에 대해 변동폭이 커서 경향을 알 수 없으나, GW의 회전수를 증가시키고, RW의 회전수를 감소시키는 조건으로 선정한다면 표면품질을 동시에 만족할 수 있는 결과를 얻을 것으로 예상된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 지르코니아 세라믹스 페들의 동축 연삭가공에서 다구치 방법을 이용하여 최소의 실험을 통해서 동심도와 표면거칠기에 대한 최적 연삭 조건을 예측하였다. 이를 예측함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

동심도와 표면거칠기에 대한 특성치인 S/N ratio를 이용하여 각각의 수준 변화에 따른 영향력을 평가하였다. 페들의 동심도에 가장 큰 영향을 주는 인자는 Regulating Wheel의 회전수였고, 표면거칠기에 큰 영향을 주는 인자는 Grinding Wheel 회전수

였음을 확인하였다. 실험을 통해 선정된 가공조건에 대해 동심도를 향상시킬 것으로 생각되는 최적 조건은 RW의 회전수에 의한 영향이 크며, 표면거칠기에 대해서는 GW의 회전수의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 페를 가공의 표면 품질을 동시에 향상시킬 수 있는 연삭 가공조건은 GW의 회전수를 증가시키며, RW의 회전수를 감소시키는 것이 효과적일 것으로 예상된다.

향후 실험결과에 대한 분석방법에 대한 연구를 통해 결과값에 대한 타당성 검토를 시행하고, 회귀 분석을 통한 결과값 예측, 선정된 최적조건에 대한 실험적 검증 등을 통해 재현성 구현을 시행할 예정이다.

### 후기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 중기거점 사업인 “고기능성 부품가공용 지능형 연삭시스템”의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Kao, H. C. and Ho, F. Y., “Surface machining of fine-grain Y-TZP”, Journal of European Ceramic Society 20, pp. 2447-2455, 2000.
2. Malkin, S., “Grinding Technology”, Ellis Horwood Limited, 1989.
3. Marinescu, I. D., Tonshoff, H. K. and Inasaki, I., “Handbook of ceramic grinding and polishing”, William Andrew publishing, 1998.
4. Shaji, S. and Radhakrishnan, V., “Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, pp. 51-59, 2003.
5. Dhavilkar, M. N., Kulkarni, M. S. and Mariappan, V., “Combined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 132, No. 1-3, pp. 90-94, 2003.
6. 박재섭, 하만경, “Taguchi 실험계획법에 의한 연삭가공조건 최적화 및 표면거칠기 예측”, 한국정밀공학회지, 제21권, 제7호, pp. 37-45, 2004.
7. 이상복, “MINITAB을 이용한 다구치 기법 활용”, 이레테크, pp. 61-71, 2001.