

## 실험 계획법을 이용한 세라믹 재료의 최적 연삭 조건에 관한 연구

정을섭\*, 김성청\*\*, 소의열\*\*\*, 이근상\*\*\*\*

### A Study on the Optimal Grinding Condition of Ceramics using the Design of Experiments

Eul Seob Jeong\*, Sung Chung Kim\*\*, Eui Yeol So\*\*\* and Keun Sang Lee\*\*\*\*

#### ABSTRACT

This paper has studied to obtain the grinding characteristics and optimal grinding conditions of ceramic materials in the grinding with diamond wheel by design of experiments. 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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{ZrO}_2$ . 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The major factors affecting the surface roughness and the optimum grinding conditions were obtained with minimum experiments using design of experiments.

**Key Words** : Design of experiments (실험계획법),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (질화규소),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (알루미나),  $\text{ZrO}_2$  (지르코니아), Brittle fracture (취성파괴), Grain shedding (입자탈락)

#### 1. 서론

세라믹의 연삭가공에서는 가공면의 형상이 대단히 중요하며, 이들 재료의 난삭성은 연삭저항이나 휠 마모량 등의 연삭특성에서 현저히 나타난다. 또한 연삭가공을 능률적으로 행하기 위하여 대개의 경우 다이아몬드 휠을 사용하는데, 가공능률 뿐만 아니라 표면거칠기 및 표면형상 등도 고려해서 더욱 폭넓은 연삭공구를 대상으로 적정한 가공조건의 검토가 필요하다.<sup>(1)</sup> 금속재의 경우에는 연성모드의 제거기구에 의하여 가공면이 생성되는 것에 비하여

세라믹의 경우에는 미세한 파괴모드의 제거기구에 의하여 가공면이 생성되므로 부품의 가공이 용이하지 않으며 가공비가 많은 부분을 차지하고 있다.<sup>(2-3)</sup> 세라믹은 경도가 매우 높고 취성이 강하므로 연삭가공시 최적의 연삭조건 선정은 쉽지 않으며 특히 재질에 따른 다이아몬드 휠의 선정 및 가공 조건은 아직까지 확립되지 못하고 있는 실정이므로 표면거칠기에 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악하고 체계화할 필요가 있다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 평면연삭기에서 세라믹재료를 다이아몬드 휠로 연삭가공 할 때 보다 효율적인 실

2002년 3월 4일 접수

\* 산업자원부 기술 표준원 \*\* 충북대학교 기계공학부

\*\*\* 충청대학 기계설계과 \*\*\*\* 세인 Eng.

험을 위하여 실험계획법을 적용하였다. 실험계획법은 주어진 인자와 조건에 대하여 요인별로 특성치를 재배치, 정리하여 어떤 인자가 특성치에 가장 큰 영향을 미치는가를 통계적으로 규명하는 실험 방법이다. 본 실험에서는 효율적인 실험을 위해 직교배열을 이용하였으며 실험결과에 대한 분석은 분산분석(analysis of variance)방법으로 수행하였다.

연삭면의 표면거칠기에 미치는 인자들에 대하여 영향정도를 분석하고 이중 가장 강력한 영향력을 갖는 인자의 검출과 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적의 연삭조건을 도출하는 것이다. 실험에 사용된 주요 인자들로는 주축회전수, 이송속도, 절입량 등을 파라미터로 적용하였고, 이들에 의하여 구성된 연삭 가공조건에 따라 표면거칠기의 제어인자를 규명하였다.

## 2. 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 반응 결과 값 즉 특성치(characteristic value)에 대하여 영향을 미치고 있는 원인이 어떤 관계가 되는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 일반적으로 특성치에 영향을 미치는 원인이 무수히 많을 뿐 아니라 원료, 실험장치, 숙련도 등의 차이에서 오는 산포가 있으며, 환경조건의 변동, 표본 오차 등에 의하여서도 영향을 받기 때문이다.

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 존재하는 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라 하며, 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 최적의 분석방법을 선택하였다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 이용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석, 상관분석, 회귀분석 등이 있으나 본 연구에서는 분산분석을 사용하였다.

분산분석은 실험계획법에서 가장 많이 이용되는 분석방법으로, 실험에서 얻은 특성치의 산포를 제

합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 요인별□의 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 방법이라 할 수 있다.

만약 어떤 특성치에 대하여 요인으로서  $A, B, C$  및 오차( $E$ )가 있을 경우, 각각의 변동 즉 제곱합을 각각  $S_A, S_B, S_C, S_E$  라 하면, 이들의 총변동  $S_T$ 는 다음 식이 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 얼마나 큰 영향을 주는 요인인가 아닌가를 결정하는 것이다.

요인  $A$ 에 의하여 발생하는 변동 즉 제곱합은 뚜렷한 이유에 의한 것이나 오차에 의한 변동은 아직 원인이 규명되지 않은 부분이라고 할 경우 이들의 상관관계에서 통계적으로 유의한 영향의 정도는 다음과 같이 구할 수 있다. 이들의 변동 즉 제곱합을 각각  $S_A, S_E$ 로 표시하고 이와 관련된 자유도를 각각  $\phi_A, \phi_E$ 로 나타내면  $S_A/\phi_A$ 는  $A$ 의 제곱평균으로  $V_A$ 로 놓고,  $S_E/\phi_E$ 는  $E$ 의 오차분산으로  $V_E$ 로 놓으면 이들 값의 비율

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

가 크면 요인  $A$ 가 오차요인에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 한다.<sup>(5)</sup>

## 3. 실험

### 3.1 시험편과 다이아몬드 휠

본 실험에 사용된 시험편은 3종의 세라믹 재료인 질화규소( $Si_3N_4$ ), 알루미나( $Al_2O_3$ ) 및 지르코니아( $ZrO_2$ )를 사용하였으며, 시험편의 크기는 60(H)×13(W)×18(H)mm로 정밀 연삭을 행하였다. 공구로는 다이아몬드 휠을 사용하였으며, 입도(mesh)가

200인 비트리파이드(vitrified)의 본드를 사용하여 제작하였고, 집중도(concentration)는 100으로 하였다.

### 3.2 실험장치 및 방법

본 실험은 주축의 회전수가 변속이 가능하도록 인버터(inverter)를 부착하고, 절입량이 1 $\mu$ m까지 확인이 가능하도록 디지털 장치를 부착한 평면연삭기(HGS-515XA, Hwacheon)를 사용하였다. 실험에 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 연삭저항을 측정하기 위하여 공구동력계(AST-MM, Satowo)를 마그네틱 척 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 촉침식 조도계(Surfest-301, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였다. 드레싱(dressing)은 다이아몬드 휠을 매 실험마다 WA240 스틱(150L $\times$ 20W $\times$ 20H)을 사용하였으며, 드레싱조건은 주축회전수를 3000rpm, 이송속도를 2m/min, 절입깊이를 20 $\mu$ m, 크로스 피이드(cross feed)는 5mm/pass로 트래버스(traverse)방법으로 수행하였다.

연삭조건은 가공결과에 영향을 미치는 주축회전수, 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 측정 후 분산분석의 순서로 실시하였다.

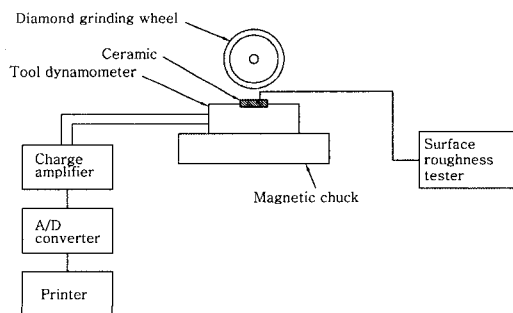


Fig. 1 Block diagram of experimental apparatus

Table 1 Factors and levels used in experiment

| Sign | Factors       | Unit  | Levels |      |      |
|------|---------------|-------|--------|------|------|
|      |               |       | 0      | 1    | 2    |
| A    | spindle speed | 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 값을 나타낸 것이다. 이것을 토대로 분산분석 한 결과는 Table 3에 나타내었는데, 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 분산분석 한 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 검증은 분산비즉 F검정으로 확인한다.

Table 5는 풀링 후 표면거칠기 값을 유의한 인자에 대하여 재배치 한 것이다. Table 5에서 보는 바와

같이 표면거칠기의 최소화요인은 B<sub>0</sub>A<sub>2</sub>의 조건이다. 즉 이송속도 1m/min, 주축회전수 3000rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화 할 수 있는 최적의 가공조건으로 나타났음을 알 수 있다. 질화규소를 다이아몬드 휠로 연삭가공 할 경우는 공구가 시험편에 압입되어 조금씩 파쇄 시키면서 연삭을 진행하게 되는데, 이송속도의 변화에 따라서 입자에 걸리는 부하량이 변하므로 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 보여진다.

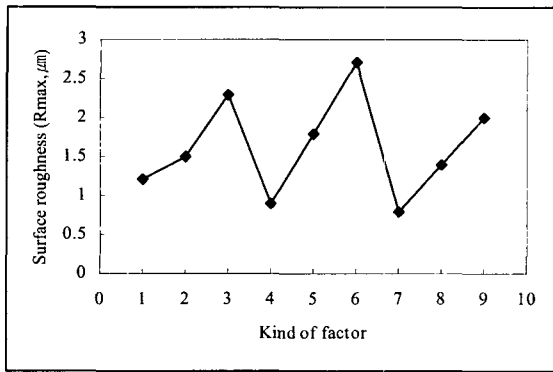


Fig. 2 Variation of surface roughness for kind of factors (material : Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 3 ANOVA table for Rmax of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

| Factor | S    | Φ | V    | F     |
|--------|------|---|------|-------|
| A      | 0.25 | 2 | 0.13 | 1.86  |
| B      | 2.82 | 2 | 1.41 | 20.14 |
| E      | 0.14 | 2 | 0.07 |       |
| C      | 0.04 | 2 | 0.02 | 0.29  |
| T      | 3.25 | 8 |      |       |

Table 4 ANOVA table for Rmax after pooling of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

| Factor | S             | Φ | V    | F      | F(0.05) | F(0.01) |
|--------|---------------|---|------|--------|---------|---------|
| A      | 0.25          | 2 | 0.13 | 2.60   | 6.94    | 18.0    |
| B      | 2.82          | 2 | 1.41 | 28.2** | 6.94    | 18.0    |
| E      | 0.18          | 4 | 0.05 |        |         |         |
| C      | pooled factor |   |      |        |         |         |
| T      | 3.25          | 8 |      |        |         |         |

\*\* : 99% confidence level, \* : 95% confidence level

Table 5 Effective factor for Rmax of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

|                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|
| A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |
| 5.0            | 5.4            | 4.2            |
| B <sub>0</sub> | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> |
| 2.9            | 4.7            | 7.0            |

#### 4.2 연삭조건에 따른 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)의 연삭 특성

Fig. 3은 입도가 200인 비트리파이드 본드 휠로 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)를 연삭하였을 때의 표면거칠기 값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과를 Table 6에 나타내었다. 이 경우 표면거칠기에 기여한 인자는 절입량-주축회전수-이송속도의 순서로 나타났으며 C인자인 절입량이 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다. Table 7은 이송속도를 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다.

Table 8에서 보는바와 같이 표면거칠기를 최소화하는 요인은 C<sub>1</sub>A<sub>2</sub>의 조건이다. 즉 절입량은 0.02mm, 주축회전수는 3000rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적의 가공조건으로 나타났다. 알루미늄의 재료특성상 취성파괴에 의한 입자탈락에 의하여 연삭이 일어나므로 절입량이 표면거칠기에 영향을 미친다고 보여진다.

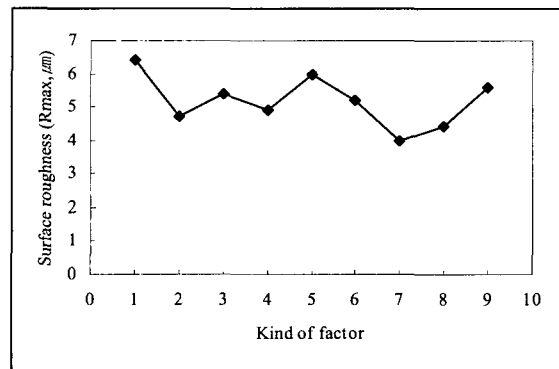


Fig. 3 Variation of surface roughness for kind of factors (material : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 6 ANOVA table for Rmax of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

| Factor | S    | φ | V    | F <sub>0</sub> |
|--------|------|---|------|----------------|
| A      | 1.21 | 2 | 0.61 | 10.17          |
| B      | 0.24 | 2 | 0.12 | 2.0            |
| E      | 0.12 | 2 | 0.06 |                |
| C      | 3.15 | 2 | 1.58 | 26.34          |
| T      | 4.72 | 8 |      |                |

Table 7 ANOVA table for Rmax after pooling of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

| Factor | S             | φ | V    | F <sub>0</sub> | F(0.05) | F(0.01) |
|--------|---------------|---|------|----------------|---------|---------|
| A      | 1.21          | 2 | 0.61 | 6.78           | 6.94    | 18.0    |
| B      | pooled factor |   |      |                |         |         |
| E      | 0.36          | 4 | 0.09 |                |         |         |
| C      | 3.15          | 2 | 1.58 | 17.56*         | 6.94    | 18.0    |
| T      | 4.72          | 8 |      |                |         |         |

\*\* : 99% confidence level, \* : 95% confidence level

Table 8 Effective factor for Rmax of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

| A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |
|----------------|----------------|----------------|
| 16.5           | 16.1           | 14.0           |
| C <sub>0</sub> | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> |
| 18.0           | 13.9           | 14.7           |

### 4.3 연삭조건에 따른 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>)의 연삭특성

Fig. 4는 입도가 200인 비트리파이드 본드 휠로 지르코니아(ZrO<sub>2</sub>)를 연삭가공 하였을 때의 표면거칠기 값을 나타낸 것이다. 이 결과를 토대로 분산분석한 결과는 Table 9에 나타내었다.

표면거칠기에 기여한 인자는 이송속도-주축회전수-절입량 등의 순서로 나타났으며 B인자는 이송속도가 다른 인자에 비해 표면거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요인자로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 10은 절입량을 풀링하여 분산분석한 결과를 나타내었다. Table 11에서 보는 바와 같이 표면거칠기를 최소화 할 수 있는 요인은 B<sub>0</sub>A<sub>2</sub>의 조건이다. 즉 이송속도를 1m/min, 주축회전수를 3000rpm의 조건이 표면거칠기를 최소화하는 최적의 가공조건으로 나타났다. 지르코니아의 경우도 질화규소와 같은

경향으로 나타나고 있으며, 이송속도가 표면거칠기에 영향을 미친다고 보여진다.

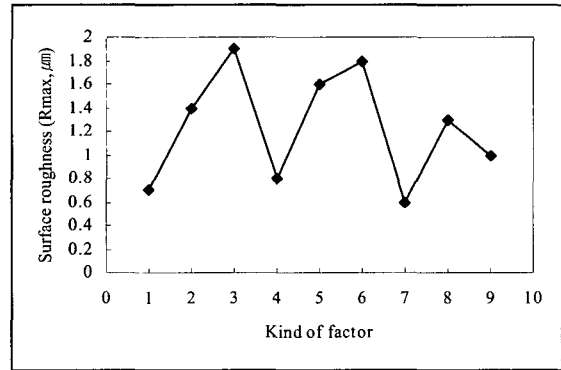


Fig. 4 Variation of surface roughness for kind of factors (material : ZrO<sub>2</sub>, mesh number : 200, bond : vitrified)

Table 9 ANOVA table for Rmax of ZrO<sub>2</sub>

| Factor | S    | φ | V    | F <sub>0</sub> |
|--------|------|---|------|----------------|
| A      | 0.33 | 2 | 0.17 | 2.43           |
| B      | 1.31 | 2 | 0.66 | 9.43           |
| E      | 0.14 | 2 | 0.07 |                |
| C      | 0.09 | 2 | 0.05 | 0.71           |
| T      | 1.87 | 8 |      |                |

Table 10 ANOVA table for Rmax after pooling of ZrO<sub>2</sub>

| Factor | S             | φ | V    | F <sub>0</sub> | F(0.05) | F(0.01) |
|--------|---------------|---|------|----------------|---------|---------|
| A      | 0.33          | 2 | 0.17 | 2.84           | 6.94    | 18.0    |
| B      | 1.31          | 2 | 0.66 | 11.0*          | 6.94    | 18.0    |
| E      | 0.23          | 4 | 0.06 |                |         |         |
| C      | pooled factor |   |      |                |         |         |
| T      | 1.87          | 8 |      |                |         |         |

\*\* : 99% confidence level, \* : 95% confidence level

Table 11 Effective factor for Rmax of ZrO<sub>2</sub>

| A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |
|----------------|----------------|----------------|
| 4.0            | 4.2            | 2.9            |
| B <sub>0</sub> | B <sub>1</sub> | B <sub>2</sub> |
| 2.1            | 4.3            | 4.7            |

## 5. 결론

본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 질화규소, 알루미늄 및 지르코니아의 세라믹재료를 다이아몬드 휠로 연삭가공 할 때 표면거칠기에 영향을 미치는 연삭인자와 표면거칠기 최소화의 최적 연삭조건을 규명한 것으로 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 연삭가공에서는 미소 파괴현상이 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卷, 第4号, pp. 77-83, 1992.
5. 박성현, "현대 실험 계획법," 민영사, pp. 16-18, 2001.