

# 다구찌 방법에 의한 IED 초정밀 래핑의 최적 가공에 관한 연구

황성철\*, 김백겸\*, 원종구\*, 이은상<sup>+</sup>

(논문접수일 2007. 12. 27, 심사완료일 2008. 5. 28)

## A Study on the Optimal Machining of the IED Ultra-precision Lapping by Taguchi Method

Sung-Chul Hwang\*, Baek-Kyoum Kim\*, Jong-Koo Won\*, Eun-Sang Lee<sup>+</sup>

### Abstract

Application of ceramic has increased due to excellent mechanical properties, and machining of ceramic has demanded gradually a precision surface machining. For decreasing the surface roughness, the control of IED lapping parameters is very important. This paper deal with the analysis of the process parameters such as applied forces, percentage of h-BN and IED lapping time, developed based on Taguchi method. Also, SEM was used for monitoring of a machinable ceramic surface.

**Key Words** : IED(연속 전해 드레싱, In-process Electrolytic Dressing), Machinable Ceramic(머신어블 세라믹), Taguchi Method(다구찌 방법), SEM(주사 전자 현미경), h-BN(육방정계 질화붕소)

## 1. 서론

세라믹은 우수한 재료적 성질로 인해 항공우주, 전자, 자동차 산업 등 여러 분야에 걸쳐 그 사용이 증가되어 왔고, 더불어 세라믹의 가공 향상에 대한 노력도 많이 이루어졌다. 하지만 세라믹의 가공 정밀도 향상에는 공작기계의 한계로 인해 정밀도를 요하는 분야에서는 활용에 제한이 있어왔다. 세라믹의 가공성을 높이기 위해 판상구조의 벽계성을 지닌 h-BN을 AlN계 또는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 세라믹의 소결과정에 첨가한

머신어블 세라믹이 개발되었지만 이러한 머신 어블 세라믹과 같은 재료를 래핑가공 시 초지립 메탈 본드숫돌(Super-abrasives metal-bonded wheel)의 이용이 요구되어진다. 이로 인해 눈매움, 날무디어짐 현상이 일어나 고품질의 연삭 가공성능을 위해서 효과적인 드레싱 방법 적용으로 가공 시에 숫돌의 입자마멸 또는 절삭 칩의 용착 등에 의한 가공 방해인자를 제거하여 숫돌의 날 끝에 대한 연삭 성능을 유지하는 것이 요구되는데 이를 위해 연속 전해드레싱(IED, In-process Electrolytic Dressing)이 개발되었다. 연속 전해드

\* 인하대학교 기계공학과 대학원  
<sup>+</sup> 교신저자, 인하대학교 기계공학과 (leees@inha.ac.kr)  
주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

레싱은 래핑 스톨 표면과 전극사이에 약전도성의 전해액을 공급하여 전해현상을 발생시켜 가공 중에도 연삭스톨의 드레싱이 계속해서 이루어질 수 있어 기존의 래핑가공보다 빠른 시간 안에 공작물을 제거할 수 있고 또한 눈 메움과 날 무디어짐 현상을 방지할 수 있다<sup>(1,2)</sup>.

머신어블 세라믹의 높은 가공품위를 얻기 위해서는 많은 가공 변수들을 제어해서 좋은 결과를 낼 수 있도록 최적 가공 조건 선정이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 IED를 이용한 래핑가공을 대상으로 다구찌 방법(Taguchi method)을 적용하여 IED를 이용한 래핑 가공 시 표면 거칠기를 줄이기 위한 조건을 구하는데 목적이 있다. 따라서 IED 래핑 메커니즘을 이해하여 IED 초정밀 래핑 시스템에 영향을 미치는 주요 인자를 파악하고 각 인자들이 가공 결과에 영향을 미치는 정도를 분석하여 최적 가공 조건을 결정하였다.

## 2. 다구찌 방법 및 IED 원리

### 2.1 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법은 실험에 의한 정보관리 행위를 실험 계획법으로 광범위하게 정의하여 주고 있으며, 특히 기술정보의 획득효율에 초점을 맞추고 있다. 파라미터 설계 시 손실함수와 S/N 비를 사용하여 도출된 최적의 파라미터는 외부의 환경변화나 다른 잡음 요인에 매우 둔감한 특성을 가지므로 다구찌 방법에 있어 파라미터 설계는 매우 중요한 사항이다.

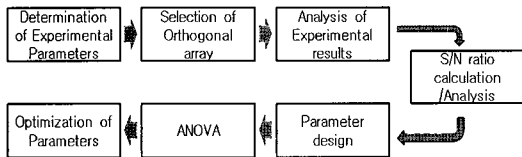


Fig. 1 Optimization process of Taguchi method

다구찌 방법의 강건 설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소화 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 S/N비(signal to noise ratio)를 사용한다. S/N 비는

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

의 형태로 표현되며, 식에서 n은 측정값의 수이고,  $y_i$ 는 측정된 특성치를 나타낸다. S/N비는 신호 대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력의 힘과 잡음의 힘 비율로서 나타낸다. S/N비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(The nominal the better), 망소(The lower the better), 망대(The higher the better) 특성의 3가지로 분류된다. 본 연구에서는 표면 거칠기 값이 작을수록 좋은 망소 특성이므로 망소특성에 준하여 실행하였다<sup>(3)</sup>.

### 2.2 IED의 원리

약 전도성 전해액에 전류를 흐르게 하여 스톨의 초지립을 안정적으로 가공에 이용할 수 있는 드레싱 방법을 연속 전해 드레싱(IED)이라고 한다.

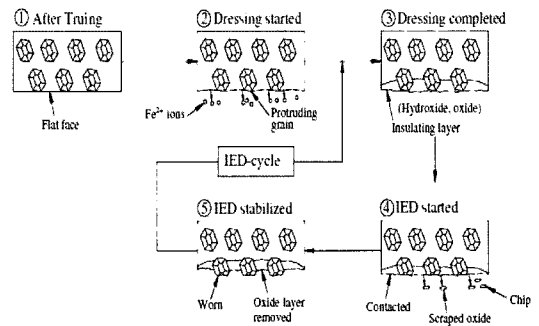


Fig. 2 Mechanism of IED

Fig. 2는 연속 전해 드레싱의 원리를 나타낸 것으로서 미세한 다이아몬드 연마재를 가진 메탈본드 스톨은 트루잉 작업 후에 다이아몬드의 미세입자와 결합체가 평탄화 되어 연마성이 저하된다. 그래서 초기 전해 드레싱을 통하여 다이아몬드의 미세입자를 돌출시킨다. 이 과정에서 래핑 스톨의 결합체가 용출한 후 빠르게 부도체 피막에 의한 절연 층이 래핑 스톨 표면에 형성되어 과도한 용출은 방지된다. 그리고 래핑을 시작하면 공작물이 이 부도체 피막과 접촉하여 연마재가 마멸된 분량만큼 피막이 벗겨진다. 이렇게 되면 피막에 의한 절연이 저하되고 또다시 결합체가 필요한 만큼 용출되어 연마재의 돌출이 유지된다.

연속 전해드레싱을 적용하는 가공의 장점은 자율적인 제어에 의해 연속적인 드레싱에 의한 고능률 초정밀 가공이 가능하다는 것이다.

### 3. 실험 방법 및 구성

#### 3.1 실험 장치 및 측정 방법

Fig. 3과 같이 통전이 가능한 초지립 메탈본드 슷돌에 흑연 브러시를 사용하여 양극을 연결하고, 순동으로 제작된 전극에 음극을 연결하였다. 슷돌과 전극사이 전도성 전해액(수용성)을 통과시키고 드레싱 양과 부도체 피막 두께의 제어성을 높이기 위해 고주파 직류 펄스를 공급하였다. 공작물을 고정하기 위해 리테이너와 템플릿을 사용하고 가압조건, 가공 시간을 달리하여 실험하였다.

가공된 머신어블 세라믹 시편은 접촉식 표면 조도 측정기 (Taylor hobson SURTRONIC 3+)를 사용하여 각 시편의 표면거칠기 값을 얻었다. 그리고 각 시편의 측정부분을 진공 상태에서 백금막을 입힌 후 주사전자현미경으로 촬영을 하였다.

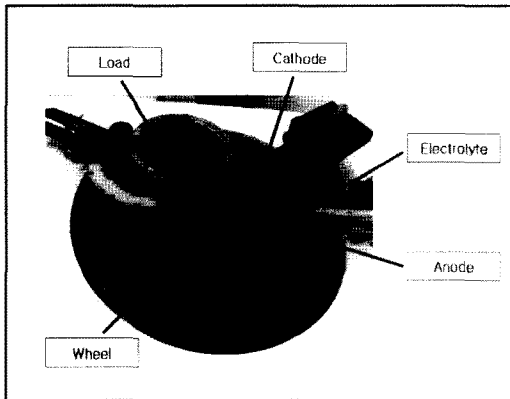


Fig. 3 IED Lapping System

Table 1 Experiment Setup

Wheel	Cast-Iron metal bonded diamond lapping wheel(CIB-D)
Power	$I_p$ : 25A ton/off : 20/10 $\mu$ m
Wheel speed	70rpm
Lapping Time	5, 10, 15min
Work Piece	BN10(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /h-BN-10%) BN20(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /h-BN-20%) BN30(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /h-BN-30%)
Applied force	2.5kg, 5kg, 10kg

#### 3.2 가공 변수 설정

예비 실험을 통해 얻어진 결과를 바탕으로 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 주된 인자로 작용할 것으로 여겨지는 가압력, h-BN의 함유량 그리고 IED 래핑시간을 실험인자로 설정하였다. 선정된 인자와 인자수준은 Table 2에 나타내었고, Table 3은 선정된 직교 배열표를 나타낸 것이다.

예를 들어, 실험 1은 가압력 2.5kg, h-BN 함유량 10% 그리고 IED 래핑 시간 5분으로 실험을 수행한 경우이다.

Table 2 IED lapping parameters and their levels

Sign	Factor	Unit	Level		
			1	2	3
A	Applied force	kg	2.5	5	10
B	h-BN percentage	%	10	20	30
C	Lapping time	minute	5	10	15

Table 3 Orthogonal array table<sup>(4)</sup>

No.	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	1
6	2	3	3
7	3	1	3
8	3	2	2
9	3	3	1

### 4. 실험결과

#### 4.1 실험결과 및 S/N비 분석

다구찌 방법은 제어 조건들이 실험 결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치로 변환하여 산포를 작게 하는 조건들의 값을 찾아내므로 가공 실험 시, 각 파라미터 별 S/N 비의 평균값을 계산하면 최적의 가공 조건을 도출할 수 있다.

실험은 Table 3과 같이 직교 배열표에 따라서 실시하였고, 각 실험은 2회 반복실험을 하였다.

Table 4는 직교 배열표에 따라 IED 래핑가공 후 측정결과를 나타낸 것이며, Table 5는 S/N비의 각 인자 수준별 일원

**Table 4 Experimental results for surface roughness**

No.	Factor			Surface roughness(Ra)	
	A	B	C	Data 1( $\mu\text{m}$ )	Data 2( $\mu\text{m}$ )
1	1	1	1	0.4245	0.4817
2	1	2	2	0.5557	0.4677
3	1	3	3	0.5753	0.7543
4	2	1	2	0.2827	0.3045
5	2	2	1	0.4873	0.5597
6	2	3	3	0.6063	0.5967
7	3	1	3	0.313	0.3637
8	3	2	2	0.4845	0.5677
9	3	3	1	0.5847	0.4543

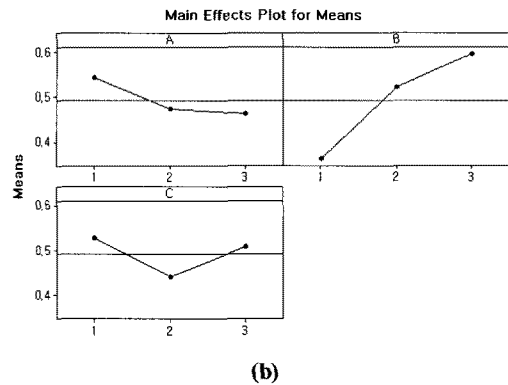
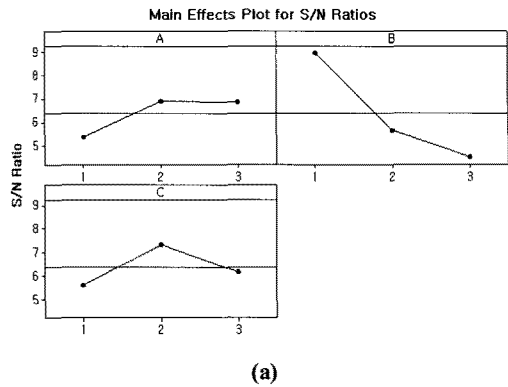
**Table 5 Sum of S/N ratios for surface roughness**

	A	B	C
1	16.11472	26.88611	16.82543
2	20.65486	16.94021	22.04701
3	20.56034	13.5036	18.45749
Sum	57.32992	57.32992	57.32992
Rank	3	1	2

표를 나타낸 것이다.

Table 5에 나타난 각 인자에 따른 가공 결과를 통하여 통계프로그램인 미니탭(MINI TAB)을 이용하여 평균값을 도출하고 최적 수준을 결정하였다.

Fig. 4는 머신어블 세라믹의 표면 거칠기 값에 대하여 각 인자에 대한 수준별 S/N비와 평균값을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 특성치의 구분에 상관없이 S/N비가 가장 클수록 특성치의 성능이 우수하다. Fig. 4의 그래프에서 살펴보면 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 준 것은 h-BN의 함량인 것을 알 수 있다. 이는 h-BN이 질화규소( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) 세라믹의 분자 간 결집도를 떨어뜨려 표면을 연화시켜 가공성에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 가압력과 래핑 가공시간은 머신어블 세라믹의 표면가공에 어느 정도 영향을 미치지만 그 영향력이 h-BN의 함유량에 비해 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 가압력, h-BN의 함유량 그리고 래핑시간 중에서 IED 래핑가공 중 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 영향을 많이 주는 순서대로 나열하면 h-BN의 함유량, 래핑시간, 가압력 순으로 가압력이 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 가장 영향을 적게 주는 것으로 나타났다.



**Fig. 4 S/N ratio and Means graphs with respect to each factor**

따라서 다구찌 방법을 이용하여 머신어블 세라믹의 최적 가공 조건을 선정하면 가압력 5kg, h-BN의 함량 10% 그리고 래핑 시간은 10분일 때 잡음이 가장 강건하여 표면거칠기 값이 가장 좋은 것을 알 수 있다.

#### 4.2 분산분석

각 인자에 따른 정량적인 분석을 위해서 Table 6에 분산분석표(ANOVA, analysis of variance)를 나타내었다.

**Table 6 ANOVA with pooling**

Factor	S	$\Phi$	V	F	p(%)
B	32.20	2	16.10	7.18	77.70
C	4.76	2	2.38	1.06	11.48
$\epsilon$	4.49	2	2.24		10.83
Sum	41.45	6			100

분산분석 시 인자 A(Applied force)가 매우 작은 S(자승합)를 가지므로 유의하지 않은 항목으로 간주하여 오차 항으로 풀링하여 분산분석 하였다. 그 결과를 보면 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 가장 영향이 큰 것은 h-BN의 함유량이라는 것을 알 수 있다. 머신어블 세라믹의 h-BN 함유량이 약 77.7%의 기여도를 나타내고 있다.

### 4.3 SEM 사진에 의한 표면 분석

머신어블 세라믹의 IED 래핑가공에서 표면 거칠기에 가장 영향을 많이 주는 요인인 h-BN의 함유량의 변화가 가공성에 미치는 재료적 영향력을 확인하기 위해 IED 래핑가공 후에 머신어블 세라믹의 단층을 주사 전자 현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 촬영을 하여 Fig. 5에 나타

내었다.

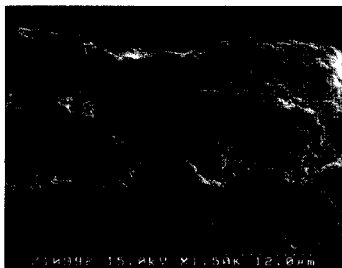
Fig. 5(a)에서 BN10은 래핑가공동안  $Si_3N_4$ 의 균열이 전파되어 발생된 균열이 적은 것에 비해 h-BN이 조금 더 함유된 BN20(Fig. 5(b))에서는 균열의 발생이 많아진 것을 볼 수 있고, BN30(Fig. 5(c))에서는 작은 균열들이 BN 20보다 더 많이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는  $Si_3N_4$ 는 h-BN의 첨가량이 증가할수록 결정들의 입자 크기가 작아지고, 분자간의 결집도가 낮아져 강도와 경도 값이 감소된다. 그로인해 h-BN의 함유량이 높은  $Si_3N_4$ 는 입자 탈락이 h-BN을 덜 함유한  $Si_3N_4$ 에 비해 쉽게 일어나게 되어 표면에 많은 균열을 일으킨 것으로 사료된다.

따라서 균열이 가장 적게 발생한 BN10이 BN20과 BN30에 비해 표면 거칠기가 좋을 것으로 판단된다.

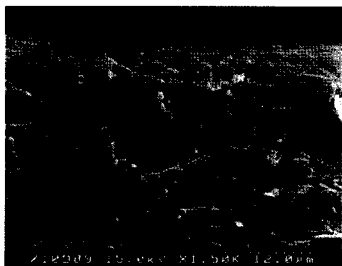
## 5. 결론

본 연구는 머신어블 세라믹인  $Si_3N_4$ -BN의 초정밀 가공을 위하여 IED 래핑가공에 대한 실험과 다구찌 방법을 통하여 머신어블 세라믹의 표면 거칠기 향상에 대하여 최적 조건을 연구하였다. 여러 가공 변수 중에 주요 인자를 도출하고 표면 거칠기에 대한 최적 조건을 표준화한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

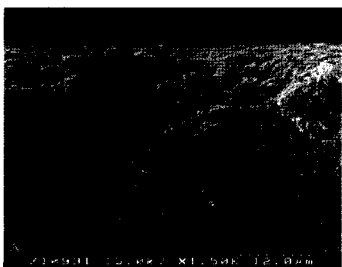
- (1) 머신어블 세라믹  $Si_3N_4$ -BN의 IED 래핑가공에 주된 인자로 작용할 것으로 여겨지는 가압력, h-BN의 함유량 그리고 IED 래핑시간 중에서 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 영향을 미치는 순서는 h-BN의 함유량, IED 래핑시간, 가압력 순이었다.
- (2) 다구찌 방법에 의하여 IED 래핑가공의 최적 가공 조건을 도출한 결과 가압력이 5kg, h-BN의 함유량이 10% 그리고 래핑가공 시간이 10분이었을 때로 나타났다.
- (3) 표면 거칠기의 S/N비를 통해 분산분석 한 결과 h-BN의 함유량이 머신어블 세라믹의 표면 거칠기에 미치는 영향이 약 77.7%로 높게 나온 반면 IED 래핑시간과 가압력의 영향은 각각 약 11.48%와 10.83%로 나와 h-BN의 함유량에 비해 IED 래핑시간과 가압력이 IED 래핑가공 결과에 미치는 영향이 상대적으로 낮았다.
- (4) 머신어블 세라믹의 IED 래핑가공 후 SEM 사진을 촬영한 결과 h-BN의 함유량이 높을수록 균열의 발생이 증가하였고, 이로 인하여 IED 래핑가공에서 h-BN의 함유량이 미치는 영향을 확인할 수 있었다.



(a) BN10



(b) BN20



(c) BN30

Fig. 5 SEM of Cross Section on  $Si_3N_4$ /h-BN

## 참고 문헌

- (1) Won, J. K. and Lee, E. S., 2003, "Ultra Precision Lapping of Machinable Ceramic by In-process Electrolytic Dressing," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 1~7.
- (2) Lee, E. S., Won, J. K., Chun, Y. J., Cho, M. W., Cho, W. S., and Lee, J. H., 2007, "Ultra-precision lapping of machinable ceramic Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN by in-process electrolytic dressing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 11-12, pp. 1101~1108.
- (3) Lee, S. H. and Son, J. M., 2004, "Optimization of Nano Machining Parameters Using Acoustic Emission and the Taguchi Method," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 3, pp. 1101~1108.
- (4) Park, S. H., 2003, *Design of experiment*, Min-Young-Sa, South Korea, pp. 563~584.
- (5) Sun, Y., Meng, Q., Jia, D., and Guan, C., 2007, "Effect of hexagonal BN on the microstructure and mechanical properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, No. 1-3, pp. 134~138.
- (6) Ruigang, W., Wei, P., Jian, C., Mengning, J., and Minghao, F., 2002, "Fabrication and characterization of machinable Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/h-BN functionally graded materials," *Materials Research Bulletin*, Vol. 37, No. 7, pp. 1269~1277.