

# 실험계획법을 이용한 반도체용 대구경 스테인레스관의 내경 가공에 관한 연구

김창근\*, 이은상<sup>+</sup>

A study on the Internal machining of a large-diameter  
Stainless pipe for Semiconductor Using Experimental Design Method

Chang-Geun Kim\*, Eun-Sang Lee<sup>+</sup>

## Abstract

This paper describes the characteristic of a large-diameter pipe to obtain smooth surface using Electropolishing after grinding using a non-woven fabric. Grinding using a non-woven fabric is possible under lower load and fine effect comparing with Wheel grinding. Also, the ion from the surface of the metal is eliminated by means of an electrical potential and current in Electropolishing. Electropolishing is used for leveling the surface, improving the physical appearance of the part, promoting corrosion properties and reducing contamination and adhesion of the surface. Therefore, the aim of the present study is to investigate the internal machining of a large-diameter pipe for semiconductor using experimental design method.

**Key Words** : Experimental design method(실험계획법), Electropolishing(전해연마), Non-woven fabric(부직포)

## 1. 서론

반도체용 대구경 가스 이송관의 경우 일반 기계가공에 의한 내경 가공으로는 최종제품의 고품질, 고능률 생산체 제 구축이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으 로 부직포(Non-woven fabric)를 이용한 기계가공과 비 접

촉 가공인 전해연마를 적절하게 이용하면 표면정도 향상 오염물 제거 효과로 인한 극도의 내식성 향상으로 원가절 감을 기대할 수 있다. 반도체 대구경 가스 이송관은 반도 체 제조공정 특징상 청정성을 요구하므로 스테인레스 강 을 사용한다. 스테인레스 강은 오래전부터 대표적인 난삭 재료 알려져 왔으나, 그 뛰어난 재료 특성으로 우리 생활

\* 주저자, 인하대학교 대학원 기계공학과 (ohskcg@daum.net)

주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

+ 인하대 기계공학부

에 폭넓게 사용되어져 왔다. 따라서, 앞으로도 스테인레스 강을 효율적으로 가공하기 위한 공정개발에 대한 요구는 클 것으로 예상된다. 일반적으로 스테인레스 강의 연삭성이 나쁜 것은 다음과 같은 이유 때문이다.

- ① 끈끈하다 : 공구에 용착하기 쉽다.
- ② 열전도가 나쁘다 : 연삭열이 잘 달아나지 않는다.
- ③ 가공 경화한다 : 다듬질 작업을 하기가 어렵다.

이 같은 이유로 스테인레스 강의 단점을 극복하기 위한 가공방법의 개발이 이루어지고 있다. 대표적으로, 연속 전해드레싱을 적용한 스테인레스 강의 내경 연삭<sup>(1)</sup>과 자력을 이용한 내경 연삭<sup>(2)</sup> 등이 연구되었다.

본 연구에서는 초기실험으로 일반 슷돌과 부직포를 이용해 내경 가공한 후 이를 비교하고, 그 결과를 토대로 실험계획법을 적용하여 내경연삭과 전해연마 시 적합한 가공조건을 도출, 분석하였다.

## 2. 전해연마의 원리

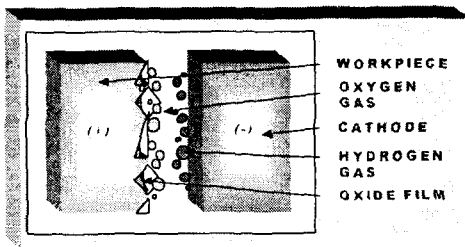


Fig 1. Schematic diagram of Electropolishing

전해연마는 전해액 중에 공작물을 (+) 극에, 전기저항이 작은 동(銅) 등을 (-) 극에 연결하고 전류를 통할 때 공작물의 표면을 용해시켜 매끈하고 광택이 있는 면으로 만드는 방법이다. 이것은 가공 중에 발생하는 점성이 높은 산화막이 표면의 미소한 골(凹)부를 덮어 그 부분의 용해를 방해하고, 전류밀도가 집중하는 산(凸)부의 선택적 용해에 의해 전해연마가 이루어지는 것으로<sup>(3)</sup> 보다 평활한 면을 얻을 수 있는 금속연마법이다.

Fig. 1과 같이 전해액 속에 (+) 극에는 공작물을, (-) 극에는 전극을 연결한 후 전류를 인가하면 (+) 극에서는 산소가 발생하여 금속의 용출이 이루어지고, (-) 극에서는 용출작용 없이 다량의 수소가스가 발생한다<sup>(4)</sup>.

## 3. 실험계획법

### 3.1 실험계획법

실험계획법(Experimental design method)이란 제품 품질특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위해 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하면 최소의 노력과 비용으로 최대의 정보를 얻을 수 있는가 하는 최적 작업조건을 가장 경제적으로 찾아내기 위한 기법이다<sup>(5)</sup>.

특히 손실함수(Loss function)를 사용하는 다구짜 방법에서는 제품특성의 목표치가  $m$ 이고, 제품의 실질 특성치가  $y$ 인 경우에 손실함수는

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

으로 정의된다. 여기서  $k$ 는 적절한 상수이다. 실험계획법에서는 이 손실함수에 근거하여 만들어진 S/N비를 특성치로 하여 인자들의 최적조건을 찾아주는 방법을 주로 사용하는데, 일반적으로 3가지 경우의 손실함수에 대한 계산식으로 망목 특성, 망소 특성, 망대 특성으로 분류되어 적용되고 있다. 본 논문에서는 내경연삭과 전해연마후의 표면 거칠기에 대한 최적의 가공조건을 선정하는 것이므로, 망소 특성을 선택하였다. 망소 특성에 대한 S/N비(Signal-to-Noise ratio)는 아래 식을 이용한다.

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

여기서  $n$ 은 실험의 수,  $y_i$ 는  $i$ 차 실험에서 실험값이다.

### 3.2 직교배열표

직교배열표(Tables of orthogonal arrays)는 관심 있는 인자의 수가 많은 경우에 각 인자의 주 효과와 일부의 교호작용을 구하고, 나머지 교호작용과 고차의 교호작용에 대한 정보를 얻지 않음으로써 실험회수를 적게하여 실험계획을 손쉽게 만들 수 있도록 한 표이다<sup>(6)</sup>.

### 3.3 분산분석

분산분석(Analysis of variance : ANOVA)이란 특성치의 산포를 제곱합(Sum of squares)으로 나타내고 이 제곱

합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여, 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법으로 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 방법이다<sup>(7)</sup>.

#### 4. 실험장치 및 구성

##### 4.1 초기실험

##### 4.1.1 연삭실험

Fig. 2는 연삭실험의 개략도로서, 드릴링머신에서 7종류의 지석(Wheel)을 결합시킨 후 360rpm으로 회전시키면서 이송(10mm/min)하였다.

Table 1은 실험한 지석(Wheel)의 사양을 보여준다.

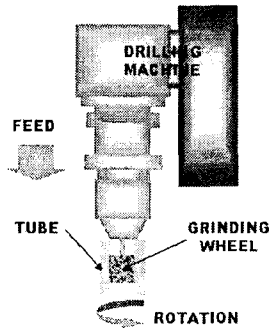


Fig. 2 The experimental setup

Table 1 Specification of Wheel

Type	Symbol	Mesh	Name
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WA	100	White Aluminum Oxide
	32A	60	Single crystal Aluminum Oxide
	RA	60/100	Pink Aluminum Oxide
	AZ	60	Zirconia Aluminum Oxide
SiC	GC	60	Green Silicon Carbide
CBN	CBN	800	Cubic Boron Nitride
Non-woven		100	Non-woven(SiC)

##### 4.1.2 전해연마

Fig. 3은 전해연마 전, 후의 표면상태를 표현한 그림이다. 전해연마 후에 표면에서 전기분해된 물질들이 전해액속으로 용해되고, 표면에는 크롬(Cr)층이 발생하는 것을 알 수 있다. 본 실험에서 전극봉은 구리를 사용하여 (-)극에 연결하였고, 스테인레스 강 지그를 (+)극에 연결하여 공작물을 고정할 수 있게 하였다. 전원 공급 장치는 최대 50A, 50V

까지 인가할 수 있으며, 전극봉과 지그는 인산과 황산, 증류수의 혼합 전해액에 담겨져 있다.

Table 2는 전해연마 실험의 조건을 나타낸다.

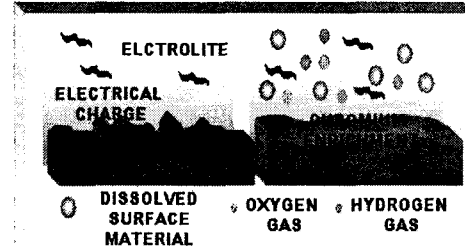


Fig. 3 The principle of Electropolishing

Table 2 Experimental conditions

Power supply	50V,50A DC
Workpiece(anode)	STS316
Electrolyte	Phosphoric acid (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) Sulphuric acid (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) Distilled water
Electrode(cathode)	Cu
Jig	Stainless steel
Surface roughness tester	Talyplofile 3.0 (Surtronic 3+)

##### 4.2 실험계획법에 의한 내경가공

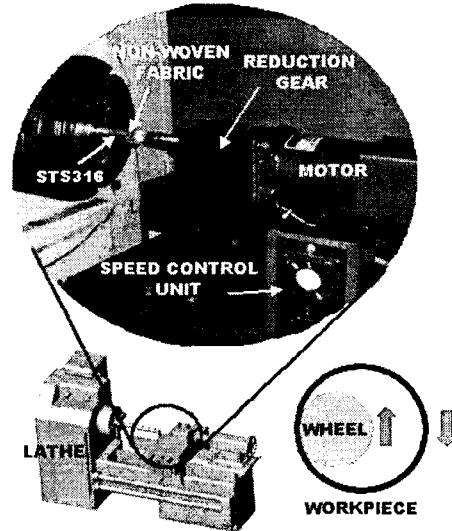


Fig. 4 The experimental setup

**Table 3 Factors and levels used in experiment(Grinding)**

Sign	Factor	Unit	Level		
			1	2	3
A	Workpiece speed	rpm	70	100	140
B	Wheel speed	rpm	200	275	350
C	Depth of cut	mm	1	2	3
D	Feed rate	mm/rev	0.1	0.2	0.3

**Table 4 Experimental design for an  $L_9(3^4)$  orthogonal array(Grinding)**

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

**Table 5 Factors and levels used in experiment(Electropolishing)**

Sign	Factor	Unit	Level		
			1	2	3
A	Current density	A/cm <sup>2</sup>	0.5	1	1.5
B	Polishing time	sec	50	100	150
C	Electrode gap	mm	2	4	6

**Table 6 Experimental design for an  $L_9(3^3)$  orthogonal array(Electropolishing)**

No.	Factor		
	A	B	C
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

Fig. 4는 실험계획법에 의한 내경연삭 실험의 시스템 사진

을 나타낸다. 본 실험에서는 초기실험을 통해 가장 좋은 결과를 나타내었던 부직포(Non-woven fabric)를 이용해 실험하였다. 초기실험과는 달리 공작물과 부직포를 함께 회전시키고, 범용선반의 왕복대를 이송시키면서 내경가공을 실시한 후 공작물의 표면상태를 측정하였다. 표면 거칠기에 영향을 미칠 것으로 예상되는 내경연삭의 인자는 공작물의 회전속도, 부직포의 회전속도, 절입깊이, 이송속도로 하였으며, 전해연마에서는 전류밀도, 가공시간, 간극으로 결정하였다. 선정된 인자와 수준은 각각 Table 3과 Table 5에 나타냈으며, 인자들은 Table 4와 Table 6에  $L_9(3^4)$ 과  $L_9(3^3)$ 의 직교배열표를 이용하여 배치하였다. 직교배열표에 의해 실험을 2회 실시하여 각 공작물의 표면 거칠기(Ra)를 측정 후 S/N비를 계산하였으며, 실험에 적용된 인자들의 영향을 분석하기 위해 분산분석 하였다.

## 5. 실험결과 및 고찰

### 5.1 초기실험

Fig. 5와 Fig. 6은 일반지석(#60, #100)으로 내경연삭 후 전해연마 한 스테인레스 강의 표면 거칠기 Ra를 비교한 그림이다. 전해연마 시 전류밀도는 0.5cm<sup>2</sup>/A, 간격은 2mm, 가공시간은 90sec로 실험하였다. 보는 바와 같이 연삭 후에 표면 거칠기가 초기보다 좋으며, 전해연마 후에도 표면 거칠기가 좋아지는 것을 알 수 있다. 그러나, 전해연마는 전기공의 표면상태에 따라 전해연마 후의 표면 거칠기가 결정되는 한계가 있으므로 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이것은 일반지석의 슷돌입자가 너무 거칠어서 목적한 표면 거칠기를 얻을 수 없었기 때문에 마지막 공정인 전해연마 후에도 표면 거칠기가 나쁜 결과를 얻었다. 이 실험에서는 AZ-60-V, WA-100-V가 가장 좋은 결과를 얻었다.

Fig. 7에서 CBN지석을 이용한 연삭은 보다 좋은 결과를 얻기 위해 STS316 pipe를 미리 전 가공(내경연삭) 하였다. 전해연마 시 전류밀도는 0.5cm<sup>2</sup>/A, 간격은 2mm, 가공시간은 90sec로 실험하였다. 실험결과 CBN지석으로 내경연삭하고 난 후의 표면 거칠기가 오히려 나빠졌다. 이는 슷돌자체가 너무 연해서 눈매움>Loading)현상과 탈락(Shedding)현상이 나타났기 때문이다. 이 실험에서는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 부직포를 이용한 내경가공이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 이는 부직포 자체의 복원력으로 인해 내경연삭 시 발생하는 진동뿐만 아니라 공작물과 부직포간의 편심을 보완해주었기 때문이다.

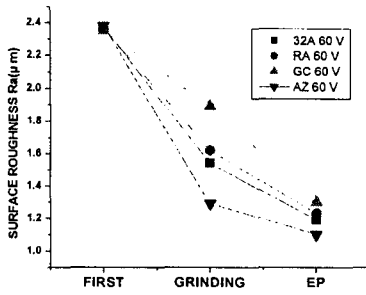


Fig 5. Surface roughness of #60

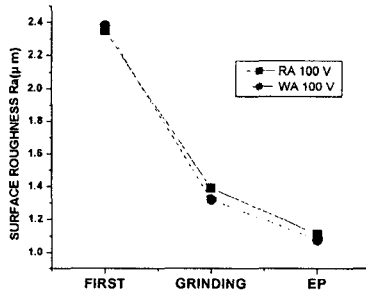


Fig 6. Surface roughness of #100

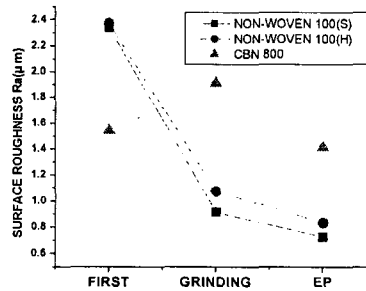


Fig 7. Surface roughness of CBN and Non-woven fabric

## 5.2 실험계획법

Table 7과 Table 8은 각각 내경연삭과 전해연마 실험을 2회 수행한 후의 표면 거칠기를 측정하여 이 결과를 토대로 S/N비를 계산한 것이다. Table 9는 내경연삭 실험 후 공작물의 회전속도를 풀링(Pooling)하여 분산분석 한 결과를 나타낸다. 내경연삭 시 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 이송속도이며, 다음으로 절입깊이, 부직포의 회전속도, 공작물의 회전속도 순이다. 부직포의 높은 복원력으로 인해 연삭시 절입깊이보다는 이송속도에 따른 공작물에 접하는 연삭입자의 양이 표면 거칠기에 가장 영향을 미

치는 것으로 보인다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 내경연삭 시 표면 거칠기를 최소화하는 수준은  $A_2B_3C_3D_1$ 의 조건이다. 전해연마 시 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 Table 10의 분산분석 결과 가공시간이며, 다음으로 전류밀도, 간극 순이다. 전기화학 반응시간에 따른 표면에서의 금속제거량이 표면 상태에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 전해연마 시 표면 거칠기를 최소화하는 수준은  $A_2B_3C_1$ 이다.

Table 7 Experimental design for an  $L_9(3^4)$  orthogonal array(Grinding)

No.	Factor				Ra		S/N
	A	B	C	D	1	2	
1	1	1	1	1	0.724	0.575	3.692
2	1	2	2	2	0.879	0.773	1.643
3	1	3	3	3	0.609	0.677	3.824
4	2	1	2	3	0.748	0.581	3.482
5	2	2	3	1	0.623	0.536	4.715
6	2	3	1	2	0.744	0.776	2.382
7	3	1	3	2	0.886	0.601	2.418
8	3	2	1	3	0.857	0.613	2.556
9	3	3	2	1	0.494	0.627	4.968

Table 8 Experimental design for an  $L_9(3^3)$  orthogonal array(Electropolishing)

No.	Factor			Ra		S/N
	A	B	C	1	2	
1	1	1	1	0.595	0.612	4.386
2	1	2	2	0.512	0.602	5.054
3	1	3	3	0.501	0.472	6.254
4	2	1	2	0.542	0.511	5.568
5	2	2	3	0.539	0.562	5.183
6	2	3	1	0.323	0.311	9.977
7	3	1	3	0.598	0.631	4.226
8	3	2	1	0.548	0.578	4.987
9	3	3	2	0.453	0.412	7.271

Table 9 Analysis of Variance(Grinding)

factor	S	$\phi$	V	F0	F(0.1)
B	0.8967	2	0.4484	2.6564	9
C	0.9925	2	0.4613	2.7328	9
D	8.0093	2	4.0047	23.725*	9
E	0.3325	2	0.1688		
T	10.166	8			

Table 10 Analysis of Variance(Electropolishing)

factor	S	$\Phi$	V	F0	F(0.1)
A	4.886	2	2.443	3.713	9
B	17.39	2	8.695	13.204*	9
C	2.298	2	1.149	2.264	9
E	1.317	2	0.658		
T	25.891	8			

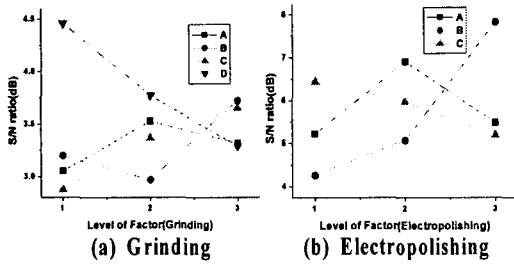


Fig 8. S/N ratio response graph

## 6. 결론

본 실험에서는 반도체용 대구경 가스 이송관의 내경연삭과 전해연마를 통해 내경가공을 실시하여 그 결과를 고찰하였다. 최적 가공조건을 도출하기 위해 실험계획법을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 일반지식으로 연삭한 경우 지석의 입도가 거칠어 만족할 만한 결과를 얻지 못하였고, CBN지석의 경우 지석 자체의 눈메움>Loading)현상과 탈락(Shedding)현상에 의해 표면 거칠기가 전해연마 후에도 양호하지 못하였다. 부직포를 이용할 경우 부직포 자체의 복원력으로 스테인레스 강의 내경가공 시 가장 좋은 결과를 얻었다.
2. 실험계획법을 이용한 내경연삭 시 영향력이 강한 인자의 수준은  $A_2B_3C_3D_1$  이며, 표면 거칠기에 대한 기여도는 이송속도>절입깊이>부직포의 회전속도>공작물의 회전속도이다. 이송속도에 따른 공작물에 접하는 연삭입자의 양이 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 보인다. 전해연마 시 영향력이 강한 인자의 수준은  $A_2B_3C_1$  이며, 표면 거칠기에 대한 기여도는 가공시간>전류밀도>간극이다. 전기화학 반응시간에 따른 표면에서의 금속제거량이 표면 상태에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- (1) Qian, J., Li, W. and Ohmori, H., 2000, "Precision internal grinding with metal-bonded diamond grinding Wheel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1-2, pp. 80~86.
- (2) Umehara, N., Kobayashi, T. and Kato, K., 1995, "Internal polishing of tube with magnetic fluid grinding Part 1, fundamental polishing properties with taper-type tools", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 149, No. 1-2, pp. 185~187.
- (3) Lee, E. S., Park, J. W. and Moon, Y. H., 2001, "Development of Ultra Clean Machining Technology with Electrolytic Polishing Process", *International Journal of KSPE*, Vol. 2, No. 1, pp. 18~25.
- (4) Kovacheva, R., Gidikova, N. and Lilova, A., 1992, "A New Electropolishing Technique for Metallographic Specimen Preparation of Zinc and Zinc Alloy", *Materials Characterization*, Vol. 28, pp. 205~211.
- (5) Ko, S. H., Choi, H. Y. and Han, S. Y., 2001, "Optimal Design for a Structure Using Design of Experiment", *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 34~39.
- (6) Kim, D. J., Kim, H. K., Choi, J. C. and Kim, B. M., 1998, "Process Design of a Hot Forged Product using the Artificial Neural Network and Stastical Design of Experiments", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 15~24.
- (7) Shaji, S. and Radhakrishnan, V., 2003, "Analysis of process parameters in Surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 141, No. 1, pp. 51~59.