

Taguchi 실험계획법을 이용한 미세입자 분사가공조건 획득에 관한 연구

박동진*(영남대원), 이인환(충북대 기계공학과), 고태조, 김희술(영남대 기계공학부)

Experimental study for the process conditions of abrasive jet machining by Taguchi method

D. J. Park(Mech. Eng. Dept., YNU), I. H. Lee(Mech. Eng. Dept., CBNU), T. J. Ko(Mech. Eng. Dept., YNU), H. S. Kim(Mech. Eng. Dept., YNU)

ABSTRACT

Abrasive jet machining (AJM) has a large number of parameters such as powder flow rate, air pressure, diameter of abrasive, stand off distance, material hardness and fracture toughness, etc. It is not easy matter to control those parameter. To achieve high accurate machining, in this study, Taguchi method was used to select process parameters. The objective of the optimization was to get higher material removal rate (MRR). From the experiments and analysis, some process parameters were found to make efficient machining.

Key Words : Taguchi method(다구찌 방법), Micro abrasive jet machining(미세입자분사가공), MRR(모재제거율), Photolithography(포토리소그래피)

1. 서론

특수가공의 한 분야인 미세입자 분사가공은 (AJM) 아주 작은 미세입자를 고압으로 분사하여 일반적인 기계가공이 어려운 정도가 높고 취성이 강한 세라믹 재료를 침식시켜 원하는 형태의 구조물을 만드는 가공방법이다. 최근 들어 MEMS 분야에서 세라믹가공에 많은 연구들이 발표되고 있는데 랩 온어칩과 같은 미세구조물을 제작하기 위해서는 세라믹재료의 미세가공이 더욱 절실한 실정이다.

한편, 단결정 실리콘은 IC 산업이나 센서의 제작에 널리 쓰이는 세라믹 재료이다. 단결정 실리콘의 가공방법은 주로 화학약품에 의한 가공이 사용되는데, 이는 위험하고 가공시간도 많이 걸리며 에칭 후에 정확한 가공정밀도를 얻는데 많은 어려움이 있다.

미세입자 분사가공은 저가격의 장비로 세라믹 재료를 쉽게 가공할 수 있고, 습식에칭에 비해 가공속도가 월등히 빠르고 높은 세장비를 가지는 구조물을 만들 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 가공방법은 모재제거율과 관련해 많은 공정변수들이 있는데 이들

은 제어하기가 매우 어렵다. 따라서 각 공정변수들의 상관관계를 미리 파악해 두지 않으면 가공할 때 마다 새로이 공정조건을 파악하는 실험을 해야 하는 번거로움이 있다.

본 실험에서는 다구찌 실험방법을 통해 최소의 실험 횟수를 선정하여 데이터를 획득한 후 통계적 방법으로 분석하여 단결정 실리콘의 모재제거율과 공정변수들의 상관관계에 대해 알아보았다.

2. 미세입자 분사가공의 원리

미세입자 분사가공은 고압의 공기로 미세입자를 가속시켜 모재에 충돌시켜 그 충격에너지로 모재를 제거 시키는 기계가공이다. 미세입자 분사가공의 주요 인자와 모재제거율의 관계는 식(1)와 같이 나타내어진다.^[1]

$$W \propto v^{e1} d^{e2} \rho^{e3} Kc^{e4} H^{e5} \quad (1)$$

여기서, v는 입자의 분사속도, d는 입자의 직경, ρ는 입자의 밀도, Kc는 모재의 파괴인성, 그리고 H

는 모재의 경도이다.

모재 위에 마스크 패턴형상을 도포하여 선택된 부분만 가공이 되도록 미세입자를 분사하여 가공하는 방법을 사용하는데 일반적으로 1-5기압의 공기를 분사제와 함께 분사하여 침식 시킨다. 주로 사용되는 분사재료는 알루미나, 탄화규소, 규석, 합성 다이아몬드 등이며 분사제의 조건은 충격에 강하고, 화학적으로 안정적이며, 입도가 고르고 가격이 저렴해야 한다.^[2] Fig. 1은 미세입자가 모재에 충돌 시 크랙 진전에 관해 나타내었다. 최초 미세입자가 모재에 충돌되면 소성영역을 생성 시키고 재료강도를 저하시키는 수직방향의 반경크랙과 실제 소재의 이발을 일으키는 수평방향의 측면크랙이 발생하여 소재의 제거가 일어나게 된다.^[3]

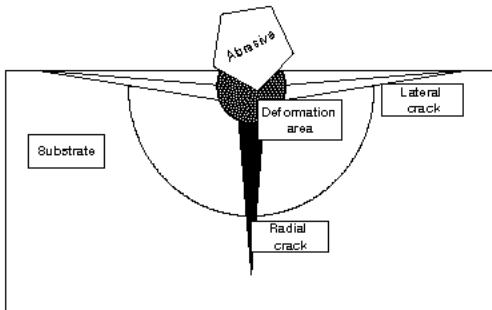


Fig. 1 The principle of material erosion

3. Taguchi 실험계획법

직교 배열표를 이용한 다구찌 방법은 각각의 실험 조건들이 실험 결과에 미치는 영향을 평가 특성치로 변환하여, 최소의 실험횟수의 결과 값을 이용하여 통계적인 방법으로 각 조건들의 상관관계를 알아보는 강건 모수 설계이다.

이 방법은 망목특성, 망소특성, 망대특성의 세 가지의 특성들로 분류 되는데 이 실험에서는 목표 결과값이 커질수록 좋은 경우인 망대 특성치를 보이고 있다.^[4]

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

여기서, y_i 는 실험결과 데이터, n 은 실험회수이다. 이 실험방법에서 많은 실험 인자들의 주된 효과와 각인자간의 가중치가 같으므로 각 요인을 서로 독립적으로 분석하여 각 인자간의 교호작용을 알아볼 수 있고 고려되지 않는 효과들은 희생시켜 실험회수를 줄일 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교 배열표인데, 이 연구에서는 $L_{27}(3^{13})$ 테이블을 사용하여 27번의 실험으로 모재인 단결정실리콘과 각 공정변수의 상관관계를 알아보았다. Table 1는 단결정실리

콘의 재료 기계적 특성을 나타낸다. 본 실험에서는 실리콘의 결정방향에 따른 가장 많은 차이를 보이는 탄성계수를 재료에 따른 인자로 두었다.

Table 1 Single-crystal Si Material Characteristics

Knoop hardness	850 kg/mm ²
Density	2.4 gr/cm ³
Young's modulus(E)	186.5 Gpa [111],
	168 Gpa [110],
	129.5 Gpa [100]
Fracture toughness	0.94Mpa/m ² [110]

4. 실험방법

4.1 주요인자와 직교 배열표

미세입자 분사가공의 주요인자로 본 실험에서 다루어진 것들은 입자분사 속도와 관련된 공기의 압력, 사용 미세입자의 크기, 모재와 노즐간의 거리(SOD), 분사시간, 그리고 단결정 실리콘의 결정방향 등을 다루었다. Fig. 2는 모재와 네 가지 변수간의 상관관계를 보기위한 L_{27} 의 선점도를 나타낸다. 여기서 13가지 변수를 취급하게 되는데 본 실험에서는 1~5까지는 공정변수로 설정하고 6~13까지 변수들은 오차변수로 취급하였다. Table 2은 실험에 사용된 알루미나 미세입자의 특성을 나타낸다.

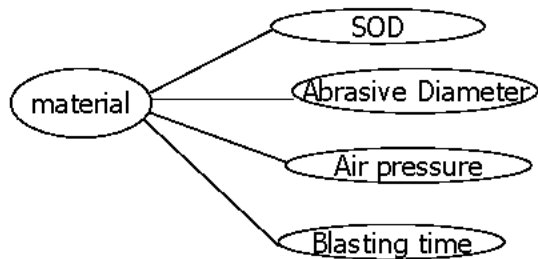


Fig. 2 Linear graphs for $L_{27}(3^{13})$

Table 2 Properties of the employed abrasive grits

Abrasive type	WA (alpha alumina)
Density(g/cm ³)	3.9
Knoop hardness(HK)	2100
Diameter	10μm,17μm,27μm

Table 3은 실험에 사용된 변수들과 수준들을 배열해놓은 직교 배열표이다. 각각의 인자들은 3수준으로 나타내었다.

Table 3 $L_{27}(3^{13})$ series of Taguchi orthogonal arrays

factor Num	material	SOD	powder diameter	air pressure	blasting time
1	<110>	6mm	10 μ m	70kpa	1.5sec
2	<110>	6mm	17 μ m	140kpa	3sec
3	<110>	6mm	27 μ m	210kpa	4.5sec
4	<110>	12mm	10 μ m	140kpa	4.5sec
5	<110>	12mm	17 μ m	210kpa	1.5sec
6	<110>	12mm	27 μ m	70kpa	3sec
7	<110>	18mm	10 μ m	210kpa	3sec
8	<110>	18mm	17 μ m	70kpa	4.5sec
9	<110>	18mm	27 μ m	140kpa	1.5sec
10	<100>	6mm	10 μ m	70kpa	1.5sec
11	<100>	6mm	17 μ m	140kpa	3sec
12	<100>	6mm	27 μ m	210kpa	4.5sec
13	<100>	12mm	10 μ m	140kpa	4.5sec
14	<100>	12mm	17 μ m	210kpa	1.5sec
15	<100>	12mm	27 μ m	70kpa	3sec
16	<100>	18mm	10 μ m	210kpa	3sec
17	<100>	18mm	17 μ m	70kpa	4.5sec
18	<100>	18mm	27 μ m	140kpa	1.5sec
19	<111>	6mm	10 μ m	70kpa	1.5sec
20	<111>	6mm	17 μ m	140kpa	3sec
21	<111>	6mm	27 μ m	210kpa	4.5sec
22	<111>	12mm	10 μ m	140kpa	4.5sec
23	<111>	12mm	17 μ m	210kpa	1.5sec
24	<111>	12mm	27 μ m	70kpa	3sec
25	<111>	18mm	10 μ m	210kpa	3sec
26	<111>	18mm	17 μ m	70kpa	4.5sec
27	<111>	18mm	27 μ m	140kpa	1.5sec

4.2 실험장치 및 실험

Fig. 3은 실험에 쓰인 미세입자 분사 가공기인 미국의 CRYSTAL MARK 사의 SWAM BLASTER MV-241과 노즐부의 3축제어가 가능한 마이크로 스테이지이다. 입자분사를 위한 노즐은 보론 카바이드 재질의 내경이 0.48mm의 원형노즐을 사용했고, Fig. 4는 실험에 사용된 폭150 μ m, 두께 100 μ m의 SU-8 포토리지스트(photoresist) 마스크 패턴이다.

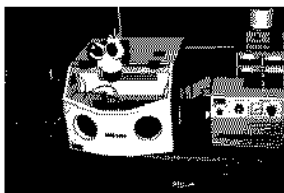


Fig. 3 Micro AJM

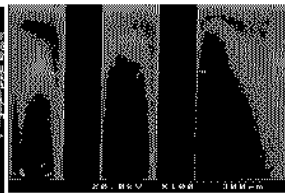


Fig. 4 SU-8Mask patterning

실험에 쓰인 시편은 <100>, <110>, <111> 방향의 단결정 실리콘 웨이퍼이다. 마스크 패턴 제작을 위하여 사용한 마스크얼라이너는 독일의 Karl Suss MJB 31000uv이고 사용파장은 350nm 이다. spin coater는 LAURELL WS-400 이고 baking을 위하여 oven bake

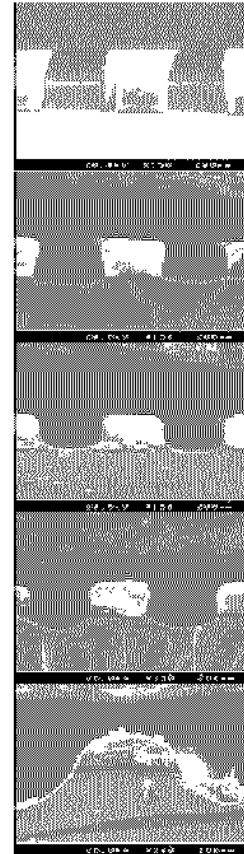


Fig. 5 Deformations of silicon wafers and SU-8 mask patterning depend on machining rate.

를 사용하였다. Fig. 5는 시간의 변화에 따른 실리콘 웨이퍼와 SU-8마스크 패턴의 변화를 나타낸다. 가공하기전의 상태부터 아래로 갈수록 가공변수들이 값이 증가함을 나타낸다. SU-8은 모서리 부분에서 마모가 일어나 원형형태로 마모되는 양상을 보이고 실리콘 웨이퍼는 가공변수 값이 증가함에 따라 V형태의 가공형상을 보인다.

5. 실험 결과 및 분석

Table 4는 각 실험 회수에 따른 실리콘의 가공결과를 나타낸다. 실리콘웨이퍼 상에 가공된 깊이를 결과 값으로 사용하였다. Fig. 6은 각 인자들의 수준에 따른 실리콘의 가공량에 대한 영향력을 그래프로 나타내었다. SOD의 변화가 가공에 있어서 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. Table 5는 각 인자들의 효과에 따른 반응 값을 나타낸다. 반응 값이 클수록 가공성이 좋은 결과로 나타난다. δ 가 클수록 변수 값의 차이에 가공량이 더 큰 영향을 보인다. SOD, 압력, 분사재 직경, 분사시간, 실리콘의 결정방향의 순서로 가공에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

Table 4 Experimental results of Si-wafers

Num	Depth(μm)	Num	Depth(μm)	Num	Depth(μm)
1	65	10	60	19	60
2	215	11	230	20	220
3	470	12	480	21	460
4	50	13	50	22	47
5	73	14	83	23	38
6	36	15	38	24	35
7	40	16	43	25	38
8	36	17	37	26	35
9	37	18	38	27	37

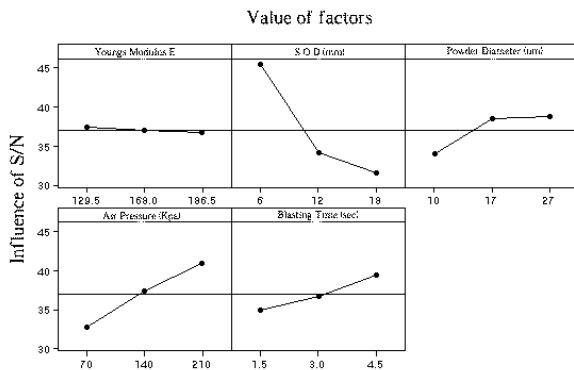


Fig. 6 Influence of S/N ratio for each factor

Table 5 Response of influence ratio for each factors

Level	Factor	Crystallization	SOD	Powder diameter	Air pressure	Blasting time
1		37.33	45.38	33.90	32.71	34.89
2		37.03	34.14	38.49	37.38	36.74
3		36.72	31.56	38.69	40.99	39.45
σ		0.61	13.83	4.80	8.29	4.57
Ranking		5	1	3	2	4

위 결과로 SOD가 가공에 가장 큰 변수로 나타나는데 이 특성을 알아보기 위해 SOD의 변화에 따른 가공깊이를 Fig. 7(a),(b)에 나타냈다.

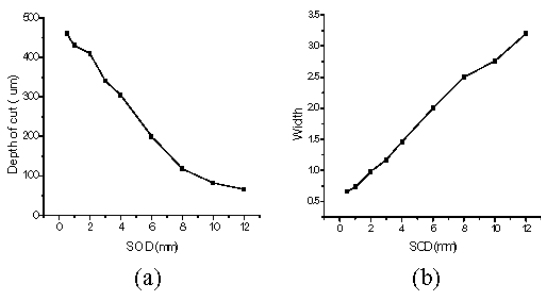


Fig. 7 Results of SOD experiment (Pressure 280kpa, blasting time 2sec, <100>Si-wafer)

Fig. 7(a)에서 SOD의 변화가 커질수록 가공깊이가 현저하게 변화함을 보였다. 또한 SOD가 8mm 지점 이하로 내려가면서 가공깊이가 급격히 감소함을 보였다. Fig. 7(b)는 SOD에 따른 가공부의 폭을 나타내었다. 가공 깊이는 달리 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 분사각도가 노즐측면부로부터 반경이 13도(280kpa, 0.48mm round nozzle)의 각도로 분사됨을 계산을 통하여 알 수 있었다.

Fig. 8은 미세입자 분사가공시간과 가공깊이에 관한 실험 결과이다. 분사 시작부터 약1초 까지 가공깊이가 급격히 증가함을 보였다. 1초 이후로 가공 깊이는 시간에 의존해 일정하게 증가 되었다.

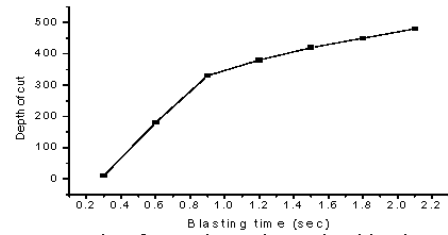


Fig. 8 Depth of cut depend on the blasting time

6. 결론

본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하여 미세입자 분사가공의 각 인자들의 가공 영향성을 파악 하여 보았는데 SOD, 압력, 분사재 직경, 분사시간, 실리콘의 결정방향의 순서로 가공에 큰 영향을 주었다. 또한 가장 쉽게 취급할 수 있는 인자로 SOD와 분사시간을 들 수 있는데 그 인자들의 영향을 별개의 실험을 통하여 알아보았다. SOD는 8mm 지점에서 영향성이 급격히 떨어짐을 보였고 분사시간은 최초 약1초 까지 가공깊이가 급격히 일어나고 그 후 실리콘 웨이퍼의 관통시간 까지 일정하게 증가됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. in't Veld, H. Scholten, "Erosion and damage by sharp particles," *Wear*, 217, pp.237-250, 1998.
2. 김광현, 최영현, 박동삼, "Powder Blasting 시 분사재에 따른 가공특성", 한국정밀공학회 2002년도 춘계 학술대회 논문집 pp.520-523
3. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.C.M. de Haas, "High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting," *Sensors and actuators* 85, pp.296-303, 2000.
4. 광재섭, 하만경, "Taguchi 실험계획법에 의한 연삭가공조건 최적화 및 표면거칠기 예측," 한국정밀공학회지, 제21권, 제7호, pp. 37-45, 2004.