

미세입자 분사가공시 직교배열표의 통계적 분석에 의한 표면형상의 최적 분사 조건

권대규* 왕덕현#,**

*경남대학교 대학원, **경남대학교 기계공학부

Optimal Blasting Conditions for Surface Profile when Micro Particle Blasting by Statistical Analysis of Orthogonal Arrays

Dae-Gyu Kwon*, Duck Hyun Wang#,**

*Graduate School, Kyungnam Univ., **School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

ABSTRACT

A study on the micro particle blasting was conducted to find the optimum conditions of the blasted surface of aluminum 6061. The particle type such as Al_2O_3 and SiC, nozzle diameter, pressure, standoff distance and injection time were used as blasting conditions. Statistical method of orthogonal arrays(ANOVA) was used to find optimum conditions of maximum depth and maximum diameter of blasted surface. Particle type, nozzle diameter, and pressure were found to be the main factors of maximum blasted depth and diameter. Maximum blasted diameter was affected by increasing pressure and nozzle diameter but saturated maximum diameter. Maximum blasted depth was affected by pressure and nozzle diameter when aluminum 6061 was blasted with Al_2O_3 particle. The value of surface roughness was increased as pressure and nozzle diameter increased when aluminum 6061 was blasted with SiC

Key Words : Micro particle blasting(미세입자 분사가공), Orthogonal arrays(직교배열), Surface roughness(표면 거칠기), Standoff distance (분사높이), Injection time(분사시간), Analysis of Variance(ANOVA, 분산분석)

1. 서 론

알루미늄은 비중이 낮고 우수한 기계적 성질 때문에 경량화 금속재료로 항공분야뿐만 아니라 많은 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 알루미늄 합금은 일반적으로 용접이 높고, 고경도이며 내환경성이 우수하여 고온 구조용 재료로서 주목받고 있으며, 알루미늄 6061 합금은 양호한 용접성, 절삭성 그리고 비교적 좋은 내식성을 가지고 있다.

최근 섬유강화 복합재료와 같은 경량화 재료가 알루미늄 제품들을 대체하고 있지만, 알루미늄합금의 금속학적 특성으로 전자부품 등 많은 분야에서 사용되고 있다. 향후 더 다양한 분야에 사용되기 위해서는 표면형상이 중요하며, 코팅 또는 이종 재료와의 접착력 향상에 대한 대책이 필요하다.

알루미늄 소재의 접착강도 향상을 위한 연구로는 excimer laser¹⁾, CO₂ laser^{2,3)}, 아크열처리⁴⁾ 그리고 cyro-blasting⁵⁾에 연구들이 진행되었다. 알루미늄 표면에 연마분사 가공시 상당한 양의 접착강도(adhesive strength)가 향상 되었다⁶⁾, 그렇지만 미세입자 분사 가공시 주요인자들을 파악하고, 가공방식의 최적조건을 찾아내는 연구가 필요하다.

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr
Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-505-999-2160

연삭입자 분사가공이 산업현장에서 많이 사용되며, 연삭입자인 알루미나(Al_2O_3)나 탄화규소(SiC) 마이크로 입자를 이용한 표면개질에 대한 통계학적 해석 연구⁷⁻⁸⁾와 입자의 포켓 분사가공에 대한 실험적 연구⁹⁾가 진행되었다. 또한 티타늄합금의 마이크로 분사가공 기초연구와 원형단면을 위한 회전 연마 연구가 진행되었다.¹⁰⁻¹¹⁾ 알루미늄의 입자분사 가공 시 표면형상은 코팅과 이종재의 접촉강도에 큰 영향을 주고 있다.

본 연구는 미세입자 분사 가공 시 가공조건 주요인자들을 통계적 분석 방법인 직교배열방식의 분산분석으로 파악하고자 하였다.¹²⁾ 분산분석의 주요 인자로 연삭입자인 알루미나, 탄화규소 그리고 노즐직경(Nozzle diameter), 압력, 분사높이(Standoff distance), 분사시간(Injection time)으로 주요인자들을 파악하고자 분사된 표면의 표면 거칠기, 분사가공면의 최대깊이, 분사가공면의 최대지름을 측정하여 그 특성들을 통해 최적의 분사 조건을 연구하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

미세입자 분사가공은 Fig. 1에 나타난 것처럼 공기 압축장치, 정제장치, 분사장치 및 흡진장치로 구성되어 있는 Dual tank micro blaster, MB1006 (Comco Inc. USA)를 사용하였다. 정제장치는 미세입자의 습기를 제거하는 공기 건조기를 포함하고 있다.

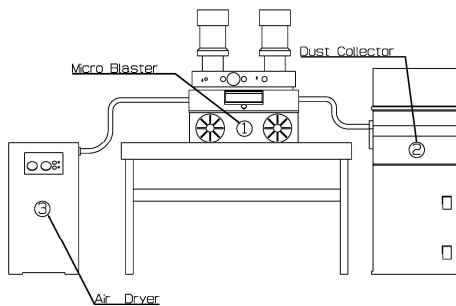


Fig. 1 Schematic illustration of micro blaster equipment
① Micro blaster ② Dust collector ③ Air dryer

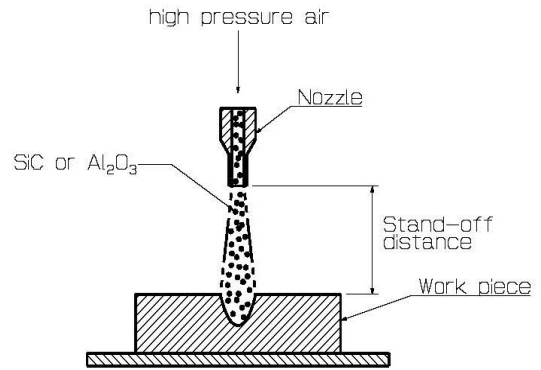


Fig. 2 Schematic illustration of main experimental factors of blasting

Fig. 2는 고압으로 압축된 공기에 의해 일정량을 공급할 수 있는 진동 공급장치(vibrating feeder)에 의해서 수 μm ~ 수십 μm 의 미세 입자들이 혼합되고 노즐을 통하여 고속으로 분사된다. 분사된 입자들이 80~200m/s의 속도로 시편을 타격하면서 미세가공을 수행하게 되며, 기계적 타격(mechanical hammering)이 주요 가공 방식이다.

본 연구에 사용한 미세입자는 탄화규소와 산화알루미늄이다. 산화알루미늄(일명 알루미늄)은 보크사이트와 탄소 등의 혼합물을 전기 용융시켜 제조된다. 이 보크사이트에서 단단한 결정체의 순수한 산화알루미늄이 양생되고 최종제품의 순도는 기술적인 특성에 따라 탄소의 첨가량에 따라 조정된다. 거의 100%에 가까운 고순도 제품은 경도가 높고 부서지기 쉬운 성질을 가지고 있고 다소 순도가 낮은 제품은 강인한 특성에 경도는 낮다.

분사재료는 규석질 등 경도가 높은 물질로 천연광물 연마제와 천연 또는 인조 연삭입자를 결합제로 써서 인공적으로 만든 합성 또는 제조 연마제, 합성수지, 금속입자로 구분 되는데 현재 여러 종류의 분사재가 생산되고 있지만 가장 많이 사용되고 있는 입자는 실리콘카바이드와 알루미늄이다. 일반적인 산화알루미늄의 경도 범위는 9.0 ~ 9.4이다.

실험 연구는 평면분사 가공시 표면의 가공 특성을 파악하고자 사각시편 단면에 수직으로 입자 분사가공을 하는 방법으로, 다양한 조건에 따른 분사된 표면의 표면 거칠기, 분사가공면의 최대깊이, 분사가공면의

Table 1 Factor and levels for micro blasting experiment for Al 6061

Factor		Level	0	1
A	Particle		SiC	Al ₂ O ₃
B	Nozzle diameter (mm)		φ0.46	φ1.16
C	Pressure (psi)		25	50
D	Standoff distance(mm)		25	50
E	Injection time(sec.)		10	20

최대지름을 측정하여 파악하였다.

본 실험 인자는 (A)입자 (B)노즐직경(Nozzle diameter) (C)압력, (D)분사높이(Standoff distance) (E)분사시간(Injection time) 다섯 가지로 정했다. 각각 인자에 대하여 2가지 수준에 의해 마이크로 입자가공 실험 방법을 Table 1에 나타내었다.

위 조건을 토대로 직교 배열표를 활용하여 실험 계획을 세우고 아래 Table 2와 같이 7개의 열중에서 5개의 열을 임의로 택하여 배치하면 된다. 5개의 인자를 각각 A, B, C, D, E로 표시하고 각각 열 번호 1, 2, 3, 4, 5에 차례로 배치하면 실험 인자 의 실험조건은 아래와 같이 된다. 열 번호 6,7의 배치에는 오차(e)를 썼으므로 분산 분석 시에 오차항의 자유도는 2가 된다. 인자의 수준은 표 중의 숫자 0에는 수준 0을, 숫자1에는 수준1을 배치한다.

직교 배열표에서 어떤 인자를 어떤 열 번호에 배치하느냐, 또는 각 인자에 대해서 어떤 수준을 0 또는 1에 배치하느냐는 불규칙적으로 결정한다. 그러나 가급적이면 기본표시 a에는 A를 b에는 B를 배치시키는 것이 취급하기에 편리하다. 그리고 실험번호대로 실험순서를 정하여서는 안 되며, 반드시 실험순서는 불규칙적으로 정해 주어야 한다. 제작된 시편(알루미늄(6061))을 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 마이크로 입자가공 실험을 한 후 접촉 미세 형상 측정기에 의해 표면 형상의 변화를 측정 하였다. 본 연구를 위한 실험은 8회 불규칙적으로 실시하였다.

Table 2 $L_8(2^7)$ in place of the five factors

No.	Experimental procedure	Column index							Experimental condition
		1	2	3	4	5	6	7	
1	3	0	0	0	0	0	0	0	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀ E ₀
2	2	0	0	0	1	1	1	1	A ₀ B ₀ C ₀ D ₁ E ₁
3	4	0	1	1	0	0	1	1	A ₀ B ₁ C ₁ D ₀ E ₀
4	1	0	1	1	1	1	0	0	A ₀ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁
5	5	1	0	1	0	1	0	1	A ₁ B ₀ C ₁ D ₀ E ₁
6	8	1	0	1	1	0	1	0	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁ E ₀
7	7	1	1	0	0	1	1	0	A ₁ B ₁ C ₀ D ₀ E ₁
8	6	1	1	0	1	0	0	1	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁ E ₀
Fundamental Presentation		a	b	a b	c	a c	b c	a b c	
Batch		A	B	C	D	E	e	e	

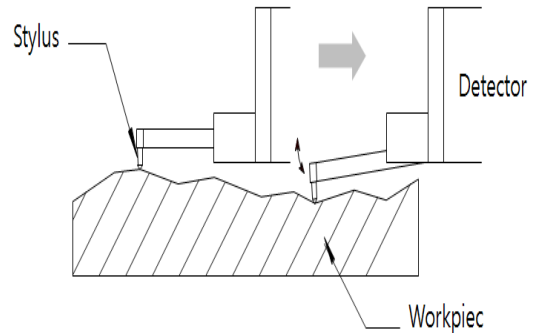


Fig. 3 Measuring method of surface roughness

Fig. 3은 시험편 표면에 촉침을 접촉시켜 이송장치에 의해 검출기를 이동하여 표면의 요철에 의해 상하 촉침의 움직임을 차동 변압기에 의해 전기신호로 변환하고 증폭하여 측정단면 곡선을 얻는 원리를 나타내고 있다. 시험편의 측정방향은 표면 형상이 가장 크게 나타나는 입자분사 가공 방향을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 2의 실험계획에 따라 미세 입자가공을 수행하여, 입자 가공된 면의 최대 깊이, 최대 직경 및 중심선 평균 표면 거칠기 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. The results of surface fine shape measurement experiment

No.	Condition	Experimental results		
		depth h(μm)	hole Ø(mm)	Roughness Ra(μm)
1	A ₀ B ₀ C ₀ D ₀ E ₀	-14.5	4.0	0.831
2	A ₀ B ₀ C ₀ D ₁ E ₁	-9.975	3.0	1.052
3	A ₀ B ₁ C ₁ D ₀ E ₀	-43.39	5.5	1.024
4	A ₀ B ₁ C ₁ D ₁ E ₁	-36.22	8.2	1.296
5	A ₁ B ₀ C ₁ D ₀ E ₁	-9.268	0	0.725
6	A ₁ B ₀ C ₁ D ₁ E ₀	-11.30	0	1.079
7	A ₁ B ₁ C ₀ D ₀ E ₁	-9.975	4.0	0.710
8	A ₁ B ₁ C ₀ D ₁ E ₀	-9.98	4.5	1.248

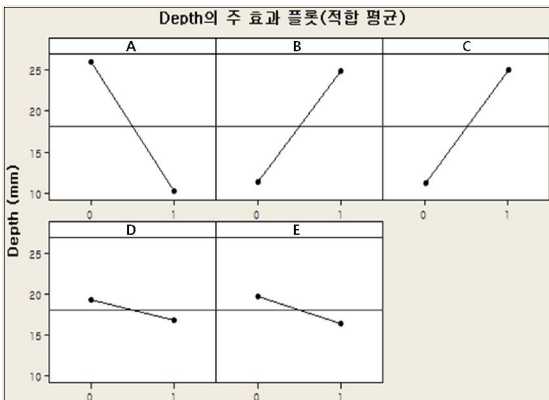


Fig. 4 Main effects plot of maximum depth of micro blasted surface

통계적 방법인 분산분석 방법에 의한 결정인자의 분사가공면의 최대깊이에 미치는 영향 결과를 Fig. 4와 Table 4 에 나타내었으며, 분석한 결과 유용한 인자로 입자, 노즐 직경, 압력을 따라 최대깊이의 변동이 발생하는 것으로 판명되었다. 분사높이의 경우 10% 수준이며, 기준 위험률 $\alpha=0.05$ 보다 크므로 귀무가설은 채택되어야 한다. 분사시간의 경우 5.4% 수준이다 기준위험률 $\alpha=0.05$ 보다 크므로 귀무가설은 채택되어야 한다, 즉 분사높이에 따라 분사 가공면의 최대깊이의 변화는 없으며 분사시간의 경우도 분사 가공면의 최대깊이의 변화는 없다고 보는 것이 맞다. 분사 가공면의 최대깊이 Table 4와 같이 입자, 압력, 노즐 직경, 분사 시간, 분사 높이의 순으로 중요도가 결정된다.

Table 4. The factor analysis of variance for the maximum depth of micro blasted surface

Source	DF	Sea SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	505.02	505.02	505.02	363.82	0.003
B	1	371.58	371.58	371.58	267.69	0.004
C	1	388.48	388.48	388.48	279.87	0.004
D	1	11.66	11.66	11.66	8.40	0.101
E	1	23.57	23.57	23.57	16.98	0.054
Error	2	2.78	2.78			
Total	7	1303.08				

S=1.17817 R-Squared =99.79% R - Squared (correction) =99.79%

Table 5 The factor analysis of variance for the maximum hole of micro blasted surface

Source	DF	Sea SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	22.1113	22.1113	22.1113	34.75	0.028
B	1	22.1112	22.1112	22.1112	34.75	0.028
C	1	0.9112	0.9112	0.9112	0.02	0.906
D	1	1.7113	1.7113	1.7113	1.43	0.354
E	1	0.2725	0.2725	0.2725	2.69	0.243
Error	2	1.2725	1.2725	0.6363		
Total	7	48.1287				

S=0.797653 R-Squared = 97.36% R - Squared (correction)=90.75%

Table 5는 표면 미세 형상 측정 실험을 통하여 각각의 인자의 분사가공면의 최대지름에 미치는 영향에 대하여 나타내고 있다. 미세 형상 측정 실험을 통하여 실험된 결과를 분석 해석하였다. 인자 가 분사가공면의 최대지름에 영향을 분석한 결과 유리한 인자로 입자, 노즐 직경, 분사 시간, 분사 높이, 압력의 순으로 분사가공면의 최대지름의 변동이 발생되고 있는 것으로 볼 수 있다.

Table 6은 표면 미세 형상 측정 실험을 통하여 각각의 인자의 분사가공면의 표면 거칠기에 미치는 영향에 대하여 나타내고 있다. 미세 형상 측정 실험을 통하여 실험된 결과를 분석 해석하였다.

인자가 분사가공면의 표면 거칠기에 영향을 분석한 결과 유리한 인자로 노즐 직경, 압력, 입자, 분사 높이, 분사 시간 순으로 중요도가 결정된다.

Table 6 The factor analysis of variance for the surface roughness of micro blasted surface

Source	DF	Sea SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	1	0.03367	0.03367	0.03367	1.17	0.392
B	1	0.22078	0.22078	0.22078	7.67	0.109
C	1	0.06498	0.06498	0.06498	2.26	0.272
D	1	0.00189	0.00189	0.00189	0.07	0.822
E	1	0.00007	0.00007	0.00007	0.00	0.966
Error	2	0.05756	0.05756	0.02878		
Total	7	0.37895				

S=0.169649 R-Squared =84.81% R - Squared (correction)=46.84%

Table 7 Factor and levels for micro blasting experiment for Al 6061

Division	0	1	2	3
A Particle	SiC	Al ₂ O ₃	•	•
B Nozzle diameter	MB1520-24 ∅ 0.46 mm	MB1520-29 ∅ 0.7 mm	MB1520-29 ∅ 1.16 mm	MB1520-29 ∅ 1.5 mm
C Pressure	25psi	50psi	75psi	100psi
D Standoff distance	50mm	50mm	50mm	50mm
E Injection time	20sec	20sec	20sec	20sec

결과적으로 입자, 노즐직경, 압력이 주요 인자로 판명되었다. 이에 Table 7과 같은 인자를 통해 분사가공면의 최대지름, 분사된 표면의 표면 거칠기, 분사가공면의 최대깊이 측정 실험을 진행했다.

주요인자로 나온 (A) 입자 (B) 노즐직경(C) 압력세 가지 변수 값으로 지정하고 (D) 분사높이(E) 분사시간 두 가지를 고정 값으로 하여 재 실험을 진행하였다.

미립입자 가공을 실시하기 전에 예비 시편을 선정하여 평면 연삭하여 5개의 시편을 각 3회 측정하였다. 측정된 시편의 평균값으로 표면 거칠기를 구하였으며, 그 값은 산술평균 거칠기(Ra) 값이 0.386 μ m이다.

Fig. 5와 Fig. 6는 각각 작동압력과 노즐직경 변화에 따른 최대깊이 값들을 나타낸 그림으로 마이크로 연마 입자인 알루미늄입자 크기가 50 μ m에서는 작동압력의

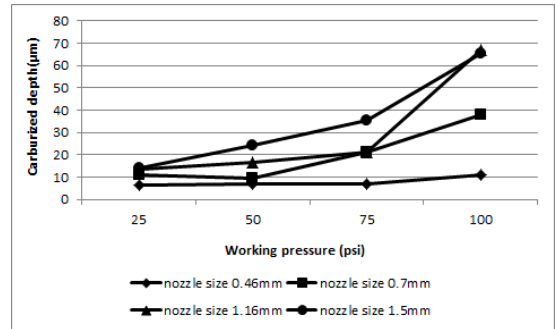


Fig. 5 Maximum depth according to the working pressure (Injection time: 20 sec, Al₂O₃: 50 μ m, Standoff distance: 50mm)

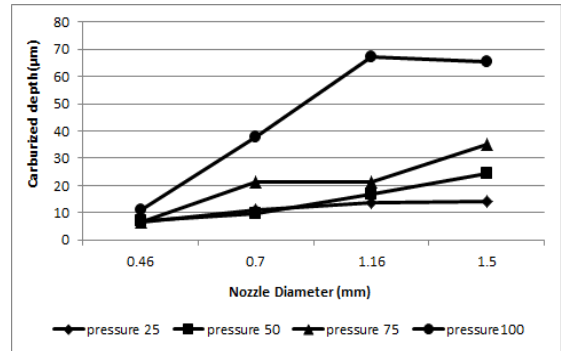


Fig. 6 Maximum depth according to the nozzle size (Injection time: 20 sec, Al₂O₃: 50 μ m, standoff distance: 50mm)

증가에 따라 분사가공면의 최대깊이가 증가하는 경향을 나타나고 있었다. 이 현상은 압력에 따라 최대 깊이는 영향을 받고 있음을 보여주는 것이다. 그러나 노즐직경과 100psi 압력에서 ∅1.16mm, ∅1.5mm 분사가공면의 최대깊이 값들은 유사한 모습을 보인다. 이는 작동압력의 증가와 노즐직경 증가에 의해 분사가공면의 최대깊이가 항상 비례적으로 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 탄화규소(SiC)입자 분사 가공시 각각 작동압력과 노즐직경 변화에 따른 연마가공면의 표면 거칠기를 나타낸 그림이다. 탄화규소 분말의 크기가 50 μ m에서는 작동압력의 증가에 따라 급격하게 표면 거칠기 값이 증가한다. 이는 표면 거칠기 값이

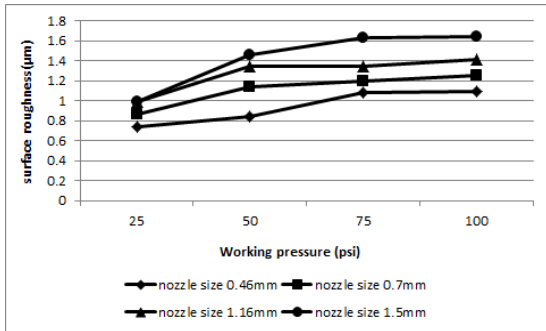


Fig. 7 Surface roughness according to the working pressure (Injection time: 20 sec, SiC: 50µm, standoff distance: 50mm)

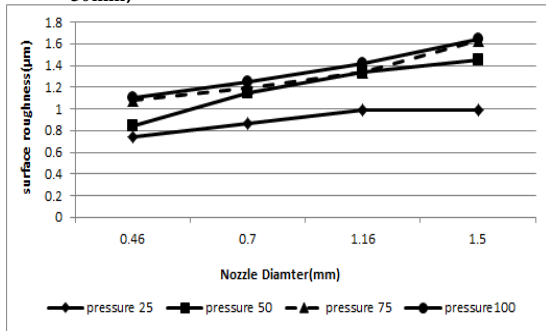


Fig. 8 Surface roughness according to the nozzle size (Injection time: 20 sec, SiC: 50µm, standoff distance: 50mm)

압력에 따라 영향을 받고 있음을 보여주는 것이다. 그러나 노즐직경이 $\varnothing 0.46\text{mm}$, $\varnothing 0.7\text{mm}$, $\varnothing 1.16\text{mm}$ 의 조건에서는 예외적으로 압력의 증가에도 오히려 양호하고 일정한 표면 거칠기를 보이는데, 이는 입자가 시편의 표면에 골고루 분사되어 나타나는 현상으로 파악된다.

4. 결론

본 연구는 미세입자 분사 가공 시 가공조건 주요인자들을 통계적 분석 방법인 직교배열방식의 분산분석으로 파악하고자 하였다. 분산분석의 주요 인자로 연삭입자인 알루미나, 탄화규소 그리고 노즐직경, 압력, 분사높이, 분사시간으로 주요인자들을 파악하고자 분사된 표면의 표면 거칠기, 분사가공면의 최대깊이, 분

사가공면의 최대지름을 측정하여 그 특성들을 통해 최적의 분사 조건을 연구하고자 한다.

1. 통계적 방법인 분산분석 방법에 의한 인자의 분사가공면의 최대깊이에 미치는 영향을 분석한 결과 유용한 인자로 입자, 노즐 직경, 압력을 따라 최대깊이의 변동이 발생하는 것으로 판명되었다.
2. 통계적 방법인 분산분석 방법에 의한 인자의 분사가공면의 최대지름에 영향을 분석한 결과 유리한 인자로 입자, 노즐직경, 압력을 따라 분사가공면의 최대지름의 변동이 발생하는 것으로 판명되었다.
3. 분사가공면의 최대 지름은 일정한 영역에 분사가 되므로 압력과 노즐직경에 영향이 약간은 있으나 일정 범위 이상의 영역으로 넓어지지 않는 것을 알 수 있었다.
4. 작동압력과 노즐직경 변화에 따른 최대깊이 값들을 마이크로 연마입자인 알루미나입자는 작동압력의 증가에 따라 분사가공면의 최대깊이가 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이 현상은 압력에 따라 최대 깊이는 영향을 받고 있음을 보여주는 것이다.
5. 탄화규소(SiC)입자 분사 가공 시 각각 작동압력과 노즐직경 변화에 따른 연마가공면의 표면 거칠기는 작동압력의 증가에 따라 급격하게 표면 거칠기 값이 증가한다.

REFERENCES

1. R. P. Digby and D. E. Packham, "Pretreatment of aluminium : topography, surface chemistry and adhesive bond durability", Int. J. of Adhesion and Adhesives, Vol. 15 Issue 2, pp. 61-71, 1995.
2. G. W. Critchlow, D. M. Brewis, D. C. Emmony and C. A. Cottam, "Initial investigation into the effective of CO₂-laser treatment of aluminium for adhesive bonding", Int. J. of Adhesion and Adhesives, Vol. 15 Issue 4, pp. 233-236, 1995.
3. G. W. Critchlow, C. A. Cottam, D. M. Brewis and D. C. Emmony, "Further studies into the effectiveness of CO₂-laser treatment of metals

- for adhesive bonding”, *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 17 Issue 2, pp. 143-150, 1997.
4. H. Kleinert, S. Grober, B. Schultrich and P. Siemroth, “Activating adherend surfaces by applying arc-discharge treatment”, *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 17 Issue 3, pp. 203-206, 1997.
 5. D. M. Brewis, G. W. Critchlow and C. A. Curtis, “Cyroblasting as a pretreatment to enhance adhesion to aluminium alloys : an initial study”, *nt. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 19 Issue 4, pp. 253-256, 1999.
 6. F. Elbing, N. Anagreh, L. Dorn and E. Uhlmann, “Dry ice blasting as pretreatment of aluminium surfaces to improve the adhesive strength of aluminium bonding joints”, *nt. J. of Adhesion and Adhesives*, Vol. 23 Issue 1, pp. 69-79, 2003.
 7. M. Mellali, A. Grimaud, A. C. Leger, P. Fauchais and J. Lu, “Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying blasting operation”, *J. of Thermal Spraying Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 217-227, 1997.
 8. J. Day, X. Huang and N. L. Richards, “Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods”, *J. of Thermal Spray Technology*, Vol. 14, No. 4, pp. 471-479, 2005.
 9. P. S. Park, M. W. Cho and T. I. Seo, “Mechanical etching of micro pockets by powder blasting”, *Int. J. of Adv. Manuf. Technology*, Vol. 25, pp. 1098-1104, 2005.
 10. S. W. Kim, D. H. Wang and W. I. Kim, “A by micro abrasive blaster”, *J. of KSMPE*, Vol 8, No 4, pp.20-27, 2009.
 11. S. H. Kim, D. H. Wang and S. H. Lee, “ The Characteristics of Surface Roughness when Micro Blasting of Titanium Alloy with Spiral Movement”, *J. of KSMPE*, Vol. 11, No, 4, pp.125-130, 2012.
 12. S. H. Park, J. W. Kim “Modern Design of Experiments Using MINITAB” Min Young Sa, Vol. 5, No.5, 2010.