

회전하는 알루미늄 환봉의 미세입자 분사가공시 통계적 방법에 의한 분사조건에 대한 연구

권대규*, 왕덕현**,#

*경남대학교 대학원, **경남대학교 기계공학부

A Statistical Study on the Blasting Conditions when Micro Blasting for Rotating Aluminum Rod

Dae Kyu Kwon*, Duck Hyun Wang**,#

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

(Received 31 January 2017; received in revised form 20 March 2017; accepted 5 April 2017)

ABSTRACT

An experimental study of micro blasting for a rotating aluminum rod was conducted through the statistical analysis of ANOVA to obtain the effect of blasting conditions. The rotating equipment was designed and constructed with forward and backward moving for helical blasting, but rotation was used in this study. The blasting condition factors were the type of abrasive particle, nozzle diameter, pressure, standoff distance, injection time, etc. The width of the surface, the maximum depth of the sprayed surface, and ANOVA were analyzed by statistical analysis. The results showed that the contributions of the main factors were pressure, nozzle diameter, and injection particle.

Key Words : Rotating and Straight Movement Equipment(회전과 직선운동 장치), Micro Particle(미세입자), Nozzle Diameter(노즐직경), Pressure(압력), ANOVA(분산분석)

1. 서 론

알루미늄의 비중(2.7)은 철(7.8)이나 동(8.9)과 비교하면 약 3분의 1 수준이다. 경량화의 요구가 가속화되고 있는 지금 특히 자동차, 철도 차량, 항공기, 선박 컨테이너 등의 수송기기 분야에 다량의 알루미늄이 사용되고 있다. 철에 비해 강도가 낮고 적절한 표면처리가 없어 구조용 재료로는 많은 제약이 있지만, 고강도화에 대한 연구가 현재 실용화 단계로 다양하게 사용되고 있다. 또한 경량성을 살려, 각종 기계의 고속 회전 부품의 작동 효율을 향상시킨다든지 장치의 대형화에 의한 중량 증가를 억제하는 등의 효과를 발휘하고 있다.

알루미늄 합금은 일반적으로 용점이 높고 고경도이며 내환경성이 우수하여 고온 구조용 재료로서 주목받고 있다.¹⁻²⁾

알루미늄은 소성가공이 용이해 다양한 형상으로 성형이 가능하다. 예를 들어 종이와 같이 얇은 박판이나 복잡한 형상의 압출 형체를 용이하게 제조할 수 있다. 알루미늄은 공기 중에서는 치밀하고 안정한 산화피막을 형성하여 부식을 방지한다. 내식성과 강도를 겸비한 알루미늄 합금은 각종 용도에 사용되고 있으며 특히 건축, 자동차, 선박, 해양 개발 등의 분야에서는 이 특성이 크게 활용되고 있다. 정밀 기계가공에서는 평활한 표면 거칠기를 요구하는 것이 일반적이나 최근 섬유강화 복합재료가 알루미늄 제품들을 대체하고 있고, 전자부품과 공학 분야에서 많이 사용하고 있지

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

만 다양한 분야에 사용되기 위해서는 코팅 혹은 이중 재료와의 접착력 향상에 대한 대책이 필요하다^{3,4)}.

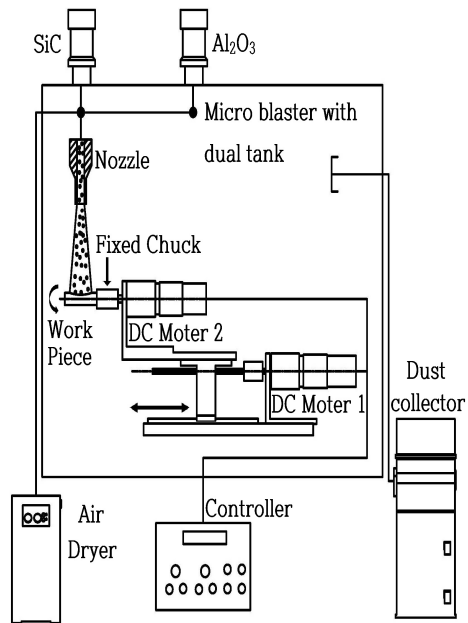
알루미늄 소재의 접착강도 향상을 위한 연구로는 eximer laser, CO₂ laser, 아크열처리 그리고 cyroblasting⁵⁾에 연구들이 진행되었다. 알루미늄 표면에 연마분사가공 시 상당한 양의 접착강도(adhesive strength)가 향상되었으며 또한 입자분사 가공은 시간 소모적으로 가공방식의 최적조건을 찾아내는 연구가 필요하다. 적절한 수준의 거친 표면 거칠기를 가져야 할 필요가 있으며 이를 위하여 기계적인 금속표면처리 방법인 입자분사가공과 화학적인 방법 등 다양한 연구들이 시도 되고 있다⁶⁾. 연삭입자 분사가공이 산업현장에서 많이 사용되며, 연삭입자인 알루미늄(Al₂O₃)나 탄화규소(SiC) 마이크로 입자를 이용한 표면개질에 대한 통계학적 해석 연구⁷⁾와 입자의 포켓 분사가공에 대한 실험적 연구⁸⁾가 진행되었다. 또한 티타늄합금의 마이크로 블레스팅 기초연구와 원형단면을 위한 회전 연마 연구가 진행되었다.⁹⁾ 알루미늄의 입자분사 가공 시 표면형상은 코팅과 이중재의 접착강도에 큰 영향을 주고 있다.

본 연구는 원통형 시편을 회전시키면서 연마분사를 하는 경우 주요 실험조건들의 영향을 통계적 방법인 분산분석¹⁰⁾에 의하여 파악하고자 하였다. 주요인자로는 탄화규소(SiC), 산화알루미늄(Al₂O₃)와 같은 연마제 종류, 노즐직경(Nozzle diameter), 압력(Pressure), 분사높이(Standoff distance), 분사시간(Injection time) 등의 조건으로 하였으며, 분사 후 표면형상을 측정하여 분사면의 최대 폭, 최대 깊이 등에 대한 분산분석으로 주요인자들의 영향을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 미세입자 분사 가공을 위하여 사용된 장비는 Comoco사(USA) 제품인 Dual tank micro blaster(MB1006)을 사용하였으며 가공 실험 중 발생하는 분진을 제거하기 위해서는 흡진 장치를 부착하였고, 정밀 미세 입자의 습기를 제거하여 건조한 상태를 유지하기 위해서 공기 건조기를 부착하여 실험을 하였다. Fig. 1은 정밀 입자 분사 가공 장치의 작동시스템을



① Micro blaster with dual tank ② Air dryer ③ Dust collector

Fig. 1 The schematic diagram of micro blasting system with rotating and straight movement system

도식적으로 나타낸 것이다. 이 장치는 미세 입자분사 가공을 위하여 시편의 정확한 고정과 분사거리의 일정한 조절이 가능하며, 2개의직류 스태모터를 이용하여 회전축에 원형 시편을 부착하여 실험할 경우에 시편의 회전수와 전후 이송 속도를 가변적으로 조절할 수 있도록 모터구동 스테이지를 제작하여 사용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 실험 장치 중 원통형 시편 가공용 지그와 장치의 그림과 작동의 계통도를 나타낸 것이다. 원통시편은 시편과 노즐의 고정, 분사거리의 정확성, 노즐의 분사 높이 조절, 시편의 이송 및 회전의 속도를 조절하기 위하여 분사가공용 지그를 직접 제작하여 사용하였다. 이 장치는 미세 입자분사 가공을 위하여 시편을 척에 고정하고, 분사거리의 일정한 조절이 가능하게 만들었다. 2개의 소재 분사 저장소에서 호스를 연결하여 에어 드라이어에서 건조된 공기가 나올 때 실험에 사용하는 분사소재를 각각 분사시키도록 하였다. 소재는 SiC, Al₂O₃ 를 분사소재 밸브를 시퀀스 제어 통하여 일정량으로 분사하였다.

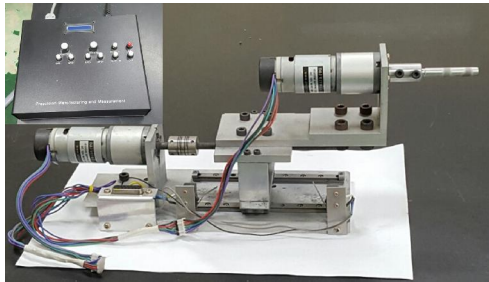
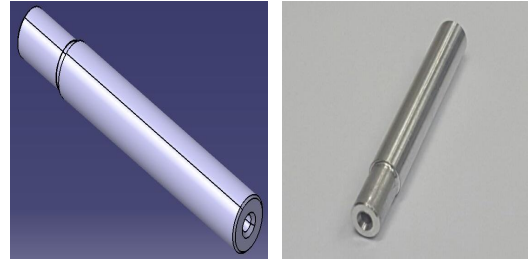


Fig. 2 Experimental jig for rotating and straight movement



(a) 3D modeling

(b) Experimental specimen

Fig. 5 Experiment specimen 3D modeling

시편에 나선형 분사를 설정하기 위해 모터 제어 컨트롤러를 이용하여 하단부 DC모터에서는 전후 움직임을 상단부 DC모터에서는 회전운동을 주어 시편에 나선형 분사를 시킬 수 있도록 스테이지를 구축하였다. 사용된 분사소재는 집진기에 의해서 호스를 통하여 밖으로 배출되도록 하여 분사되었던 분사소재가 작업에 영향을 미치지 않도록 시스템을 구축하였다. 전체 실험 장치는 제어기 우측상단에 있는 전원 스위치를 활성화 시켜서 동작된다.

2.2 실험 시편 제작

본 실험에 앞서 원활한 실험 진행을 위해 실험시편을 설계 및 가공하였다. Fig. 4은 Auto CAD 프로그램을 사용하여 만든 시편의 2D 도면이다. 시편의 형상을 정의하여 실험 장치를 구상하였으며, 그에 따른 소재 정의를 하였다. 또한 2D형상을 3D형상으로 구현하여 형상의 모습을 알아보았다.

Fig. 5(a)와 5(b)는 CATIA 프로그램을 사용한 3D Modeling과 실제 가공한 시편의 모습이다. 설계한 시편의 소재는 알루미늄 6061소재를 선정하였다.

시편의 제작은 알루미늄 6061소재를 구매한 뒤 선삭가공을 통하여 환봉 형상의 시편을 제작하였으며, 원통 연삭가공을 통해 표면 거칠기 Ra값을 0.386 μm 로 매끄럽게 제작 하였다. 시편의 표면이 매끄럽기 때문에 분사 가공 시 분사가공면의 최대깊이, 분사가공면의 회전면의 폭 변화 값을 쉽게 측정할 수 있도록 제작되었으며, 표면 변화를 가시적으로 쉽게 알 수 있다.

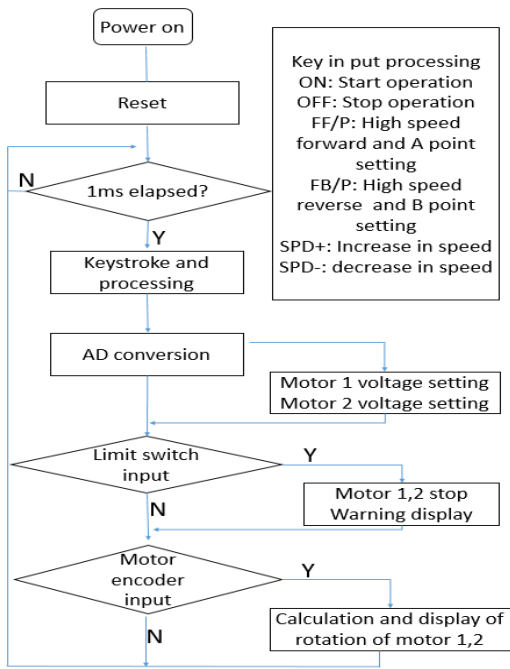


Fig. 3 Experimental operation flowchart for rotating and straight movement system

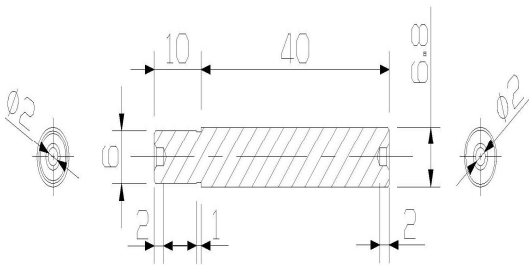


Fig. 4 Experiment specimen of 2D drawing

2.3 실험방법

본 실험은 시편을 준비하여 실험계획법에 의한 실험 순서대로 마이크로 연마제인산화규소(SiC), 산화알루미늄(Al_2O_3)의 입자크기는 $50(\mu m)$ 을 사용하였다.

가공조건은 분사 높이를 30mm, 분당 이송거리는 1.5m/min, 지그 주축 회전수를 30rpm으로 고정하였고, 노즐의 직경, 분사압력, 분사입자 에 변화를 주었다. 그 값은 Table 1에 표시하였다.

원통형 시편을 회전시키면서 미립입자분사가공을 한 후 분사 가공된 면의 측정을 위하여 표면 거칠기 및 윤곽형상 두 가지를 모두 측정할 수 있는 접촉식 3차원 형상 측정기(MITUTOYO, SV-C3000H4)를 사용하였다. 특히 표면 거칠기 분석 프로그램인 SURFPAK-SV에는 다양한 파라메타 및 다양한 분석 기능이 갖추어져 있어 데이터 처리 능력 및 표면상태 분석과 윤곽측정에 대한 평가까지 자유자재로 실행할 수 있는 장점이 있다. 본 실험에서는 표면 거칠기 부분보다 분사조건의 연구에 집중하기 위하여 형상측정을 실시하였다.

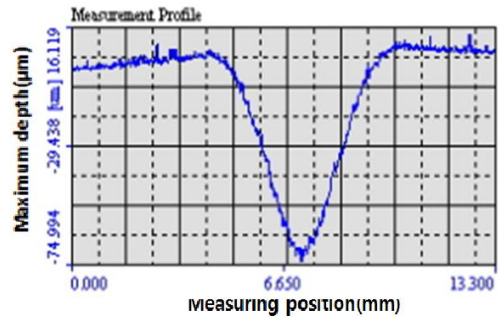
3. 실험결과 및 고찰

3.1 입자 분사된 회전면의 폭(Width)

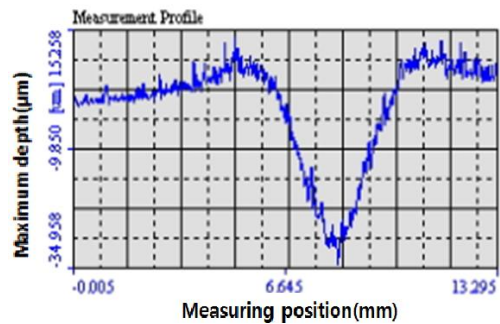
원통형 시편을 회전시키면서 미립 입자 분사가공을 한 후 시편의 입자분사 된 회전 운동면의 최대 깊이 측정하였다. 시편의 크기는 $\varnothing 6 \times 50$ 의 원통이며 미세 분사 가공을 실시하였다. 미립입자 가공을 실시하기 전에 예비 시편을 선정하여 원통연삭 하였다.

Table 1 Factor and levels for micro blasting experiment for aluminum 6061-T6 (unit: mm)

Division	0	1	2	3
A Particle	SiC	Al_2O_3	•	•
B Nozzle diameter	$\varnothing 0.46$	$\varnothing 0.7$	$\varnothing 1.16$	$\varnothing 1.5$
C Pressure	25KPa	50KPa	75KPa	100KPa
D Height injection	30	30	30	30
E Injection time	20sec	20sec	20sec	20sec
F Revolutions	30rpm	30rpm	30rpm	30rpm



(a) Using SiC ($50\mu m$) particles

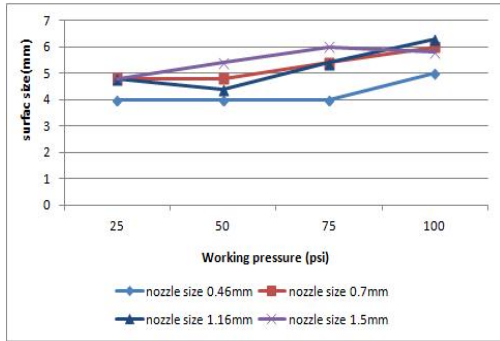


(b) Using Al_2O_3 ($50\mu m$) particles

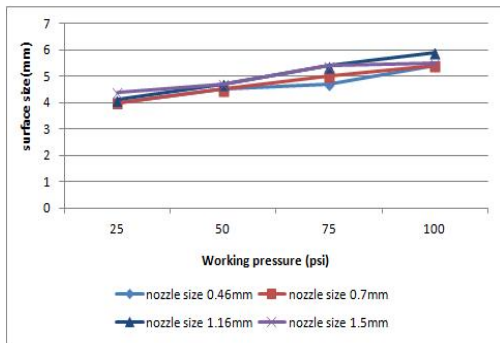
Fig. 6 Measured surface profile after micro blasted for max depth (Injection time: 20 sec, Standoff distance: 30mm, Revolutions: 30rpm, Travel distance: 1.5m/min)

Fig. 6(a)는 마이크로 연마제인산화규소(SiC), 의 입자크기는 $50(\mu m)$ 을 사용하였다. 노즐의 직경 MB1520-29 $\varnothing 1.16mm$, 분사압력 100KPa, 분사 높이를 30mm, 분당 이송거리는 1.5m/min, 지그 주축 회전수를 30rpm으로 실험을 실시하고 원통형 시편의 측정을 위해서는 접촉식 3차원 형상 측정기를 사용하였다. 그 결과 값은 입자분사 된 회전면의 폭(Width)은 6.3mm 이고, Fig. 6(b) 마이크로연마제인 산화알루미늄(Al_2O_3)의 입자크기는 $50(\mu m)$ 을 사용하였다. 노즐의 직경 MB1520-29 $\varnothing 1.16mm$, 분사압력 100KPa, 분사 높이를 30mm, 분당 이송거리는 1.5m/min, 지그 주축 회전수를 30rpm으로 실험을 실시하고 원통형 시편의 측정을 위해서는 접촉식 3차원 형상 측정기를 사용하였다. 입자분사 된 회전면의 폭(Width)은 5.9mm이다.

Fig. 7(a)와 7(b)의 X축에 작동압력의 변화 값을 Y축 에는 입자분사 된 회전면의 폭을 노즐직경의 크기별로



(a) Max. width for different working pressure of SiC (50µm)



(b) Max. width for different working pressure of Al₂O₃(50µm)

Fig. 7 Maximum width according to the different nozzle diameter (Injection time: 20 sec, Standoff distance: 30mm, Revolutions: 30rpm, Travel distance: 1.5m/min)

변화량을 나타내었다. 마이크로 연마제인 산화규소 (SiC), 연마입자인 산화알루미늄 (Al₂O₃) 크기가 50(µm)에서는 작동압력의 증가에 따라 입사가공분사면의 회전면의 폭이 증가하는 경향을 나타나고 있었다. 이 현상은 압력에 따라 회전면의 폭의 크기에 영향을 주고 있음을 보여준다.

그러나 Fig. 7(a) 그래프를 보면 nozzle size Ø0.46mm 일 때 25psi, 50psi, 75psi의 회전면의 폭 값이 거의 변화가 없었고, 100psi에서 회전면의 폭 값으로 증가함을 나타내었다. 또한 nozzle size Ø1.5mm일 때, 75psi와 100psi에서 비슷한 회전면의 폭 값을 나타내었는데, 이를 통하여 압력의 증가에 따라 폭의 크기가 증가하나, nozzle size의 크기에 더 많은 영향을 주는 것으로 판단된다.

Table 2 The factor analysis of variance for the width of micro blasted surface

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	level of contribution (%)
Particle	1	0.3403	0.3403	0.3403	3.20	0.086	2.45
Nozzle diameter (mm)	3	2.9759	2.9759	0.9920	9.32	0.000	21.41
Pressure (KPa)	3	8.0284	8.0284	2.6761	25.14	0.000	57.76
Error	24	2.5550	2.5550	0.1065			18.38
Total	31	13.8997					100.00

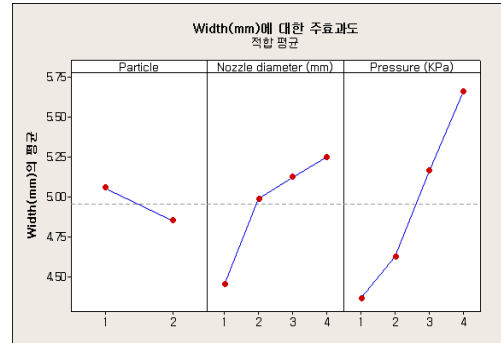


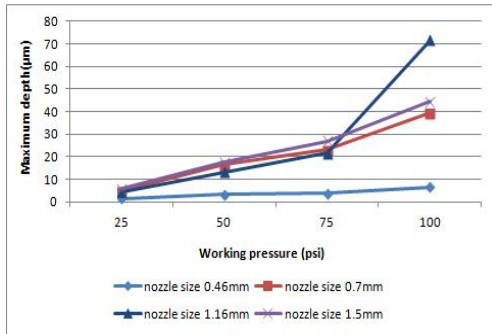
Fig. 8 Main effects plot of width of micro blasted surface

Table 2은 표면 미세 형상 측정 실험을 통하여 각각의 인자가 회전면의 폭에 미치는 영향에 대하여 분산분석의 결과를 나타내고 있다. 분산분석표를 보면 세 개의 인자 중 노즐직경, 압력 두 인자가 0.05에서 유의하다. 그리고 기여도 측면으로 보면 압력, 노즐 직경, 입자의 순으로 회전면의 폭에 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다.

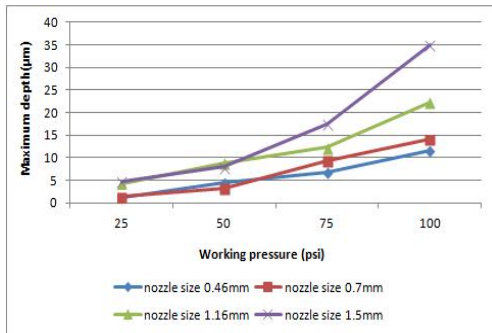
Fig. 8은 인자의 주 효과를 나타내었다. 주효과도를 보면 회전면의 폭 값이 가장 큰 인자들의 수준을 정하면 입자는 SiC이며, 노즐직경 Ø1.5이며 그리고 압력은 100KPa이다.

3.2 입자분사 된 회전면의 최대 깊이(Depth)

회전하는 원통형 시편에 미립 입자 분사 가공을 한 후 입자 가공된 면의 앞서 얻은 Fig 6과 같은 표면형상을 측정하면서 또한 최대 깊이를 측정하였다. 원통형 시편에 접촉식 3차원 형상 측정기를 사용하여 최대



(a) Max. depth for different working pressure of SiC (50 µm)



(b) Max. depth for different working pressure of Al₂O₃ (50 µm)

Fig. 9 Maximum depth according to the different nozzle diameter (Injection time: 20 sec, Standoff distance: 30mm, Revolutions: 30rpm, Travel distance: 1.5m/min)

깊이 값들을 파악하였다. SiC 입자를 사용한 경우로 입자분사 된 회전 운동면의 최대 깊이는 Fig 6(a)에서 또한 얻을 수 있으며, 그 값은 74.994(µm) 이고, Al₂O₃ 입자를 사용한 입자분사 된 회전 운동면의 최대 깊이는 Fig. 6(b)에서 34.958(µm) 값을 얻었다.

Fig. 9(a)와 9(b)의 X축에는 작동압력의 변화 값을 Y축에는 입자분사 된 회전면의 깊이를 노즐직경의 크기별로 변화량을 나타내었다. 노즐직경과 작동압력 변화에 따른 최대 깊이 값들을 나타낸 그림으로 마이크로 연마제인 산화규소(SiC), 연마입자인 산화알루미늄(Al₂O₃) 크기가 50(µm)에서는 작동압력의 증가에 따라 입자분사 된 회전 운동면의 최대 깊이가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 노즐직경과 100psi 압력에서 Ø0.7mm,

Table 3 The factor analysis of variance for the maximum depth of micro blasted surface

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	level of contribution (%)
Particle	1	678.6	678.6	678.60	7.49	0.012	9.78
Nozzle diameter (mm)	3	1137.9	1137.9	379.30	4.19	0.016	16.40
Pressure (KPa)	3	2948.6	2948.6	982.88	10.85	0.000	42.49
Error	24	2175.0	2175.0	90.62			31.34
Total	31	6940.1					100.00

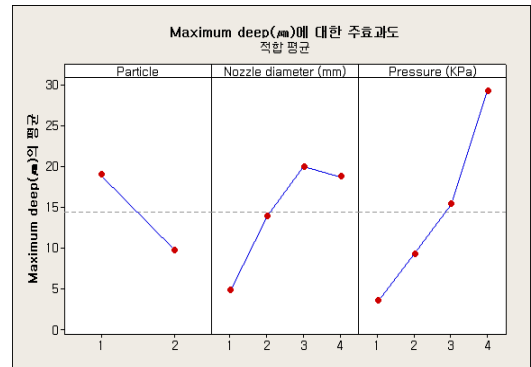


Fig. 10 Main effects plot of maximum depth of micro blasted surface

Ø1.16mm, Ø1.5mm 분사 가공면의 최대 깊이 값들이 증가한다. 이는 작동압력의 증가와 노즐직경 증가에 의해 분사가공면의 최대 깊이가 항상 비례적으로 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다.

Table 3은 표면 미세 형상 측정 실험을 통하여 각각의 인자가 분사가공면의 최대깊이에 미치는 영향에 대하여 분산분석의 결과를 나타내고 있다. 분산분석표를 보면 세 개의 인자 모두 유의하다. 그리고 기여도 측면으로 보면 압력, 노즐 직경, 입자의 순으로 분사가공면의 최대깊이에 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 10은 인자의 주 효과를 나타내었다. 주효과도를 보면 분사가공면의 최대 깊이 값이 가장 큰 인자들의 수준을 정하면 입자는 SiC이며, 노즐직경 Ø1.16이며 그리고 압력은 100KPa이다.

4. 결론

본 연구는 원통형 알루미늄 시편을 회전 시키면서 미립 입자 분사가공을 한 후 시편의 표면 형상을 측정하였다. 시편의 크기는 $\varnothing 6 \times 50$ 으로 선삭가공을 한 후 원통연삭을 하였다. 주요 인자로 연삭입자인 알루미늄, 탄화규소 그리고 노즐직경, 압력, 분사높이, 분사시간, 주축회전수. 이송으로 주요인자들을 파악하고자 입자분사 된 회전 운동면의 최대 깊이, 회전면의 폭을 측정하여 그 특성들을 통계적 기법을 통해 분사 분석을 실시하였다.

1. 회전 분사 입자가공 시 최대 폭에 영향을 주는 인자(factor)는 통계적 방법인 분산분석에 의하면 노즐직경, 압력이 0.05에서 유의하고 기여도 측면으로 보면 압력, 노즐 직경, 입자의 순으로 최대 폭에 영향을 주고 있다.
2. 회전 분사 입자가공 시 분사면 최대깊이에 영향을 주는 인자는 입자, 노즐직경, 압력 모두 유의하며, 기여도 측면으로 보면 압력, 노즐 직경, 입자의 순이다.
3. 주효과도를 보면 회전면의 최대 폭에 영향을 주는 인자들의 수준을 정하면 입자는 SiC이며, 노즐직경 $\varnothing 1.5$ 이며 그리고 압력은 100KPa이다. 또한 분사가공면의 최대깊이에 영향을 주는 인자들의 수준을 정하면 입자는 SiC이며, 노즐직경 $\varnothing 1.16$ 이며 그리고 압력은 100KPa이다.

REFERENCES

1. Kim, H. T. and Kil, S. C., "Recent Research Trend of Friction Stir Welding Process," Spring Conference of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 49, p. 77, 2008.
2. Song, S. W., Kim, N. K. and Kang, C. Y., "Liquation Cracking of Mg and Al Alloys during Friction Stir Welding," Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol. 28, No. 5, pp.28-34, 2010.
3. Anoop, S., Natarajan, S., Kumaresh Babu, S.P., "Analysis of factors influencing dry sliding wear behaviour of Al/SiC p-brake pad tribosystem," Materials and Design, Vol. 30, No. 9, pp.3831-3838, 2009.
4. Goo, B. C. and Jung, H. S., "Finite element modeling of frictional heat in friction stir welding," Journal of The Korean Welding and Joining Society, Vol 55, pp. 154-154, 2011.
5. D. M. Brewis, G. W. Critchlow and C. A. Curtis, "Cyroblasting as a pretreatment to enhance adhesion to aluminium alloys : an initial study", Int. J. of Adhesion and Adhesives, Vol. 19 Issue 4, pp. 253-256, 1999.
6. D. G. Kwon and D. H. Wang, "Optimal Blasting Conditions for Surface Profile when Micro Particle Blasting by Statistical Analysis of Orthogonal Arrays", Int. J. of KSMPE., Vol. 15 No. 4, pp. 148-154, 2016.
7. Klokkevold PR. Nisshimura RD. Adachi M, Caputo A : Osseointegration enhanced by chemical etching of the titanium surface, A torque removal study in the rabbit. Clin Oral Impl Res 8:442-447, 1997
8. Baker D. London RM. O' Neal R. Rate of pull-out strength gain of dual-etched titanium implants : A comparative study in rabbits. Int J Oral Maxillofac Implants 14:722-728,1999
9. 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.
10. S. Y. Choi, D. G. Kwon, I. S. Park and D. H. Wang, "A study on the optimal conditions for machining accuracy when endmill fillet cutting at the corner", Int. J. of KSMPE., Vol. 15 No. 4, pp. 101-108, 2016.