한국기계가공학회지, 제5권, 제3호, pp.65～70 (2006. 9)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5 No. 3, pp.65～70 (2006. 9)

AWJM을 이용한 Al6061 절단조건 최적화에 관한 연구

이재광*, 민병현#, 예상돈**, 제원수**

A Study on the Optimization of Machining Process for Al6061 Using the AWJM

Jae-Kwang Lee*, Byeong-Hyeon Min#, Sang-Don Ye**, Wone-Soo Jea**

ABSTRACT

The AWJM(Abrasive Water-jet Machining) technology is one of the cutting technologies, which can cut various materials with 2 or 3 times of the speed of sound. In this study, processing conditions such as jet-pressure, cutting speed, orifice diameter and stand-off distance, are used by following the design of experiments with 3 levels. Al6061 material which is normally applied on the field, is applied. Through the S/N ratio analysis with measured values, the optimization value of processing conditions to minimize the surface roughness and taper value is obtained. The order of significance is as follows; jet pressure, cutting speed, abrasive mixing ratio, orifice diameter and stand-off distance. RSM(Response Surface Method) is applied to find the optimal processing conditions to minimize both the surface roughness and the taper value by using jet pressure, cutting speed and abrasive mixing ratio.

Key Words : Abrasive Water Jet(연마제 워터제트), Taguchi Method(다구찌 법), Design of Experiments(실험계획법), RSM(반응표면분석법)

1. 서 론

연마제 워터제트(Abrasive water jet) 가공기술은 고압의 물을 빠른 속도로 분사하고 그와 동시에 연마제를 투입 혼합하여 다양한 소재를 절단 가공하는 기술이다[1]. 연마제 워터제트 가공은 기존의 레이저, 플라즈마 등과 같이 임의의 점에서 시작하여 정해진 형상 가공이 가능하기 때문에 소재 절감 장점이 있다. 기존의 절단가공 장비인 가스 절단기, 플라즈마 절단기, 레이저 절단기, 와이어 커팅 등은 가열에 의한 산화와 용융을 이용한 방식이다. 열을 이용한 절단가공 방식은 열 전도성이 낮고 저융점을 가진 재료에는 절단가공이 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 연마제 워터제트는 상온에서 가공이 이루어져서 열에 의한 변형이 없다. 하지만 연마제 워터제트를 이용한 가공은 다양한 공정변수들의 영향으로 절단흔적인 물결무늬가 발생하여 절단품위가 전통적인 기계가공에 의한 방식에 미치지 못하므로 다양한 절단조건들의 최적화가 필요하다. 연마제 워터제트 절단가공에 관한 연구는 여러 가지 공정변수에 의한 절단깊이에 관

* 동의대학교 기계공학과
# 교신저자 : 동의대학교 기계공학과
E-mail : bhmin@deu.ac.kr
** 동의대학교 대학원 기계공학과

계된 워터제트의 가공성능에 관한 연구가 주로 수행되고 있다[2~4]. 그러나 앞서 기술한 공정변수들에 의한 표면거칠기 및 치수정밀도에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이 연구에서는 다구찌법을 이용하여 분사압력, 절단속도, 오리피스 직경, 이격거리, 연마제 혼합비의 인자들을 가공변수로 하고, 중심선 평균거칠기(Ra)와 테이퍼 값을 반응 값으로 하여 실험계획법을 적용하였다. 측정된 데이터의 S/N비를 분산분석을 통하여 실험인자들이 절단 표면에 미치는 영향력을 분석하였다. 분산분석을 통해 얻어진 유의인자를 토대로 2차 실험을 하였으며, 반응표면분석법을 적용하여 각각의 유의인자들의 2차 회귀곡선식을 구하여 표면거칠기와 테이퍼 값의 예측에 적용하였다[5].

2. 연마제 혼합형 워터제트 가공

2.1 시스템의 구조

Fig. 1은 실험 장치의 구성도를 나타낸 것이다. 일반적인 연마제 워터제트 장치의 구성은 고압 발생장치, 커팅헤드(cutting head), 이송기구부 등으로 구성된다. 고압 발생장치는 물을 압축하여 원하는 압력의 물을 만들고, 고압 배관을 통하여 커팅헤드 부분까지 배출하는 역할을 한다.

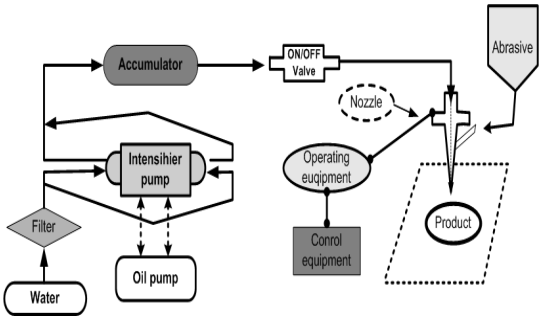

Fig. 1 Schematic diagram of abrasive water-jet machining system

커팅 헤드는 고압의 물을 오리피스를 통하여 분사하여 혼합실에서 연삭입자와 혼합하여 분사할 때 음속의 2~3배 정도의 속도에너지를 가질 수 있도록 설계되었다. 이송 기구부는 서보모터(servo moter)를 이용한 볼 스크류(ball screw) 방식으로 X축, Y축은 동시 구동방식이며, Z축은 독립형 이송방식이다.

2.2 고압 발생장치

연마제 워터제트의 절단 메카니즘에서 중요한 부분을 차지하는 고압 발생 장치는 물을 원하는 압력으로 가압하는 장치로 증압펌프(intensifier)가 사용되며 유압으로 구동되는 피스톤 왕복식 펌프이다. 이 펌프는 비교적 저압의 유압유를 단면이 보다 큰 저압의 피스톤에 가하고 이에 따라 피스톤이 전후로 움직이면서 작동한다. 단면이 큰 유압 피스톤에 보다 작은 고압의 단면을 갖는 피스톤 플렌저(plunger)가 연결되어 있으며 이 플렌저가 압축된 물을 펌핑한다. 조절밸브(check valve)는 저압수(0.4 MPa)의 흡입과 고압수(400 MPa)의 배출을 제어한다. 피스톤에 유압오일의 압력이 작용하면 직경이 큰 실린더 피스톤에 작용하여 직경이 작은 쪽에 물을 밀어내어 압축시킨다. 물이 압축되었을 때 유압유가 피스톤에 가하는 작용력과 압축된 물이 플런저에 가하는 반작용력은 서로 평행상태에 도달한다. 그런데, 피스톤의 직경과 물의 출구쪽 직경비가 약 1/20 정도로 작기 때문에 분사 실린더 속의 물의 압력은 유압오일의 압력에 비례해서 20배 정도로 증가할 수 있다. Fig. 2는 고압펌프의 모습이다.

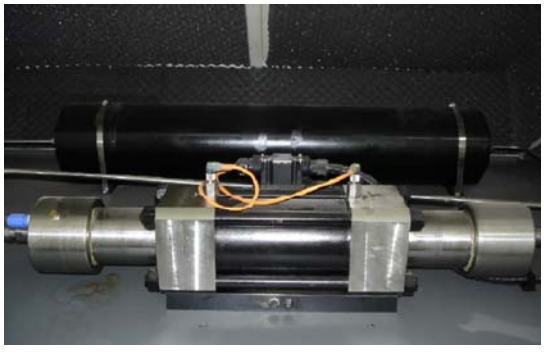

Fig. 2 Photograph of intensifier pump

2.3 커팅헤드

커팅헤드(cutting head)는 물의 압력에너지를 운동에너지로 바꾸는 오리피스와 연마제가 혼합되는 혼

합실로 구성되어 있다. 오리피스는 보통 사파이어, 루비, 다이아몬드 등의 재료로 만들어지며 나사 조합과 운송로에 의해 분사 운송파이프 끝에 조립된다. 이 연구에서는 직경이 0.25 mm, 0.3 mm, 0.33 mm 인 사파이어 오리피스을 채택하였다. 다이아몬드 오리피스의 수명은 약 800~2000 시간 정도이나 가격이 비싸다. 사파이어 오리피스은 비교적 값이 저렴하고 수명은 약 150~250시간 정도이다. 이 오리피스를 통해 고압 고속의 물이 분출되며, 그 고속의 분출로 인한 압력차로 인하여 연마제의 유입과 함께 혼합실을 지나면서 혼합되어 노즐을 통해 분사되어 재료를 절단한다. Fig. 3은 커팅헤드 장치이다.

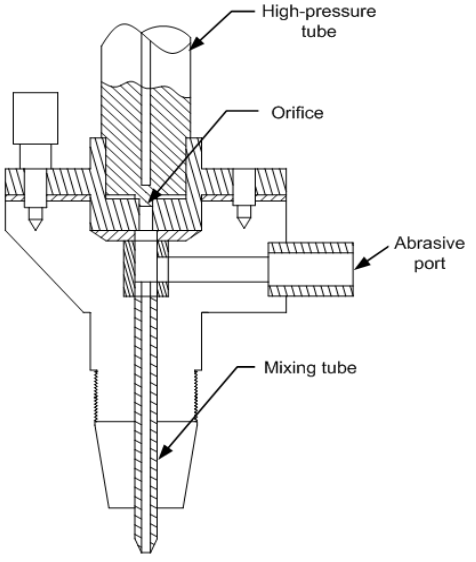

Fig. 3 Schematic diagram of cutting head

2.4 연마제

절단에 이용되는 연마제의 종류는 여러 가지가 있지만 널리 이용되는 연마제로는 천연 Garnet, 알루미나, 실리콘 카바이드, 금강석 등을 들 수 있다. 연마제의 종류에 따른 물리적 성질은 다음 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 연마제 입자는 고밀도, 예리한 모서리, 고인성을 요하며 연마제 입자의 크기는 # 50, #80, #120등이 사용된다. 이 연구에 사용된 연마제는 입자의 크기가 #80 (180 μm)의 천연 Garnet이다.

Table 1 Physical properties of abrasive

Item \ Abrasiv	Garnet	Alumina	Silicon Carbide
Mohs Hardness	7.5	8~9	9.15
Knoop Hardness	1,350	2,100	2,500
Specific Gravity	3.84	3.98	3.41
Particle Size (mesh)	80	80	80

3. 실험방법

3.1 다구찌 법

이 연구에 사용된 시편은 연마제 워터제트 가공에서 가장 많이 사용되고 있는 Al6061판을 사용하였고, 시편의 두께는 25 mm를 선정 하였다. 연마제는 천연 Garnet으로 입도는 # 80을 사용하였다. 최근 Al6061은 기계적 성질이 우수하여 산업 현장에서 가장 널리 사용 되고 있다. 이렇게 산업 현장에서 가장 많이 사용하는 재료를 선정함으로써 이 연구에 얻어진 결과를 현장에 적용할 수 있게 하기 위함이다. 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Factors and levels used in the experiment test conditions

Item	Factor	Unit	Level		
			1	2	3
A	Pressure	MPa	270	300	330
B	Cutting speed	mm/min	50	60	70
C	Orifice diameter	mm	0.25	0.30	0.33
D	Abrasive rate	g/secec	6	8	10
E	Standoff distance	mm	2	3	4

이 연구에서는 연마제 워터제트의 절단공정에서 주어진 조건 이내에서 최적화하기 위해 절단면의 표

면조도와 테이퍼값을 반응값으로 선택하였다. 인자들이 너무 많으면 실험의 정밀도가 낮아지므로 제안된 영역 안에서 최적의 인자를 선택해야 한다. 인자들의 수준도 최적의 수로 결정해야 한다. 연마제 워터제트의 최적 절단 조건을 위해 고압수 압력(A), 노즐 이송속도(B), 오리피스 직경(C), 연마제 혼합비(D) 그리고 이격거리(E)를 인자로 선택 하였다. 5개의 인자 모두 3수준으로 나누었고, 다구찌 법을 사용하기 위해 직교배열표를 작성하였다. 이러한 직교배열표는 선택된 인자들의 수준을 조합하고 실험 순서 및 실험 횟수를 결정하기 위함이다. 시편의 표면거칠기의 상부는 연마제 입자 크기에 의해서 결정되는 부분으로 중심선 평균거칠기(R_a)가 3~4 μm로 균일하게 나타났고, 하단부에서 절단에너지의 감소로 물결무늬 현상이 뚜렷하게 발생하여 표면 조도가 거칠게 나타났다. 따라서 하단부에서 3 mm 부분의 표면거칠기(SE-1200, mitutoyo)를 측정하였고, 시편의 테이퍼값은 (주)덕인 MBH-101008C 3차원 측정기를 이용하여 측정하였다.

3.2 반응표면분석법

반응표면분석법은 독립변수와 종속변수간의 함수관계를 데이터로 부터 추정하여 독립변수의 변화에 따른 반응량을 예측하는 것이고, 독립변수의 어떤 값에서 최적화가 될 것인가를 찾아내고 데이터 분석을 통하여 적합한 반응표면의 성질을 규명하는 것이다. 워터제트 절단가공에서 목적하는 표면거칠기가 작을수록 좋으며, 테이퍼 값 또한 작을수록 정밀한 가공에 유의하다. 이와 같은 목적을 만족하기 위해 각 인자 수준 변화에 따라 실험을 하고 반응표면분석법을 이용하였다.

이 연구에서 워터제트 가공에서 주어진 조건이내에서 최적화하기 위해 다구찌 법과 같은 표면거칠기와 테이퍼 값을 반응 값으로 선택하였다. 제어인자들의 수준 수도 최적의 수로 결정해야 한다. 절단실험은 다구찌법에서 유의하다고 분석된 분사압력(A), 이송속도(B), 연마제혼합비(C)를 제어인자로 선택하였다. 3가지의 인자 모두 5수준으로 나누었고 α값을 2로 하여 반응표면분석법을 수행하였다. 결정된 인자들과 수준들은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Control factors and their levels concerned with the response surface analysis

Control factors	level				
	- α	-1	0	1	α
Pressure(A)	270	285	300	315	330
Cutting speed(B)	40	50	60	70	80
Abrasive rate(C)	6	7	8	9	10

4. 결과 및 분석

4.1 다구찌 법에 의한 결과 분석

절단실험을 통해 얻어진 시편의 표면거칠기의 값이 작은 것이 목표이므로 S/N 비에서 망소특성에 해당하는 식에 의해 계산되었다. 망소특성 식에 의해 Fig. 4과 같은 S/N 비 그래프를 얻을 수 있었다. S/N 비는 높을수록 좋으며, 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 S/N 비는 높아지므로, Fig. 4에서 각 인자가 최고 일 때의 수준이 선택 인자의 값이 되었다. 선택된 인자의 고압수 압력이 330 MPa, 노즐 이송속도가 50 mm/min, 오리피스 직경이 0.33 mm, 연마제 혼합비가 10 g/sec 그리고 이격거리는 2 mm 수준으로 이때 얻어진 표면거칠기 (R_a) 가 최적의 조건으로 도출되었다. 또한 S/N 비 그래프에서 인자분포가 클수록 큰 영향을 주는 인자로 A, B, D 인자가 유효한 인자임을 알 수 있었다.

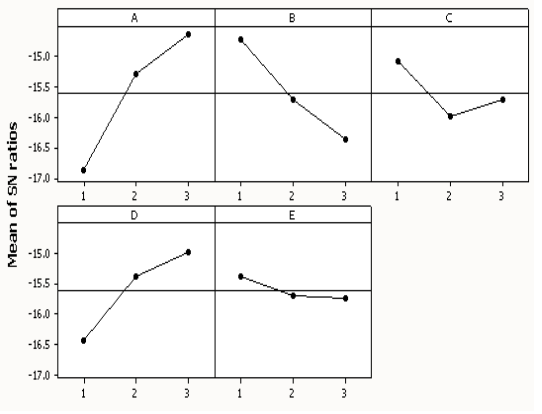

Fig. 4 Main effects plots for S/N ratio according to surface roughness

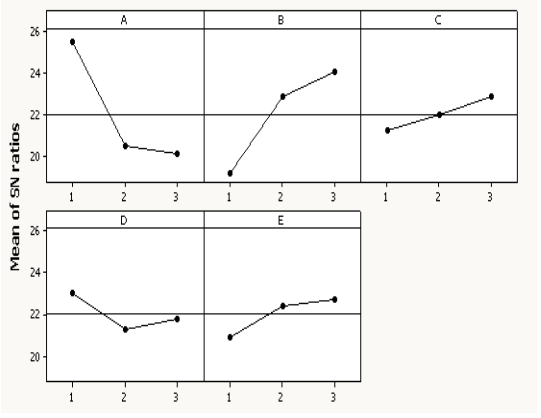

Fig. 5 Main effects plots for S/N ratio according to taper value

절단실험을 통해 얻어진 시편의 테이퍼값이 작은 것이 목표이므로 S/N 비 식에서 망소특성에 해당하는 식에 의해 계산되었다. 망소특성 식에 의해 Fig. 5과 같은 S/N 비 그래프를 얻을 수 있었다.

S/N 비는 높을수록 좋으며, 평균이 같은 두 집단에서 분산이 작을수록 S/N 비는 높아지므로, Fig. 5에서 각 인자의 최고일 때의 수준이 선택 인자의 값이 되었다. 선택된 인자는 각각 고압수 압력이 270 MPa, 노즐 이송속도가 70 mm/min, 오리피스 직경이 0.25mm, 연마제 혼합비가 6 g/sec 그리고 이격거리는 4mm 수준으로 이때 얻어진 테이퍼값이 최적의 조건으로 도출되었다. 또한 S/N 비 그래프에서 인자분포가 클수록 큰 영향을 주는 인자로 A, B, E 인자가 유효한 인자임을 알 수 있었다.

4.2 반응표면분석법에 의한 결과 분석

반응표면분석법 중에 중심합성계획법을 사용하기 위해 직교배열표를 작성하였고, 이러한 직교배열표는 선택된 인자들의 수준을 조합하고 실험 순서 및 실험 횟수를 결정하기 위한 것이다. 워터제트 가공실험을 직교배열표에 따라 20번 절단가공을 수행하였다. 표면거칠기 측정을 하여 중심선 평균거칠기 (R_a) 값과 3차원측정기를 이용한 테이퍼값을 반응값으로 하여 분석에 사용하였다.

표면거칠기와 테이퍼값의 가중치를 각각 1로 선택하여 분석한 결과 식 (1),(2)와 같은 표면거칠기 값에 대한 2차 회귀방정식 (y_1) 과 테이퍼값에 대한 2차 회귀방정식(y_2)을 얻을 수 있었다. Fig. 6과 같이 제어인자 사이의 최적 값과 예측 값들이 나타내고 있다. 그 결과 각 인자들 분사압력(A), 이속속도(B), 연마제 혼합비(C)의 최적값은 각각 300MPa, 60mm/min, 8g/sec를 도출 할 수 있었다. 최적인자 값을 시험 인자로 사용하여 실험을 3번 실시하여 표면거칠기와 테이퍼값의 평균을 측정하였고, Table 4에 나타내었다. 반응표면분석법에 의해서 만들어진 이차회귀방정식에 의한 결과와 실험에서 얻어진 결과값이 유사함을 알 수 있다.

$$y_1 = 37.7971 - 20.3301\times10^{-3}A - 38.3949\times10^{-3}B - 752.994\times10^{-3}C + 3.6838\times10^{-6}A^2 + 1.2363\times10^{-3}B^2 + 46.7614\times10^{-3}C^2 - 28.75\times10^{-6}AB + 4.166\times10^{-6}AC + 562.5\times10^{-6}BC \quad (1)$$

$$y_2 = 4.21777 - 2.1311\times10^{-3}A - 13.069\times10^{-3}B - 152.761\times10^{-3}C + 0.2995\times10^{-6}A^2 + 34.7727\times10^{-6}B^2 + 1.2897\times10^{-3}C^2 - 1.3833\times10^{-6}AB + 29.5\times10^{-6}AC + 727.5\times10^{-6}BC \quad (2)$$

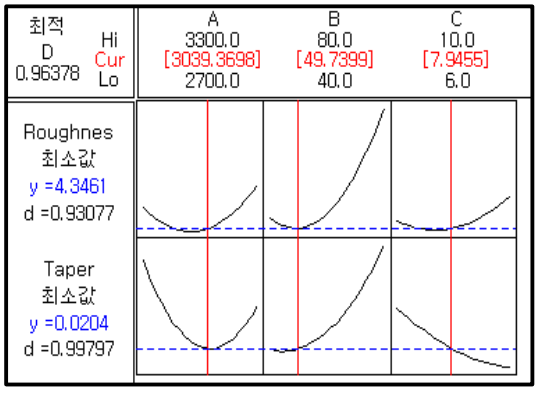

Fig. 6 Optimal values and the predicted response trace plots along the control factors

Table 4 Comparison of RSM and DOE under optimal processing condition

	RSM values	Experiment values
Surface roughness (R_a)	4.3461	4.455
Taper velue (mm)	0.0204	0.0255

5. 결 론

이 연구는 연마제 워터제트 가공상의 특성들 중에 표면거칠기와 테이퍼값의 품위 향상을 위한 공정조건은 실험계획법을 이용하여 최적화하였다.

(1) 표면거칠기에는 분사압력, 절단속도, 연마제혼합비, 오리피스직경, 이격거리의 순으로 영향을 주었으며, 표면거칠기를 최소화하기 위한 최적값으로 분사 압력이 330 MPa, 절단속도가 50 mm/min, 오리피스 직경이 0.33 mm, 연마제 혼합비가 10 g/sec 그리고 이격거리는 2 mm였다.

(2) 테이퍼값에 절단속도, 분사압력, 이격거리, 연마제혼합비, 오리피스직경 순으로 테이퍼 값에 영향을 주었으며, 테이퍼 값을 최소화하기 위한 최적값으로 분사 압력이 270 MPa, 절단속도가 70 mm/min, 오리피스 직경이 0.25 mm, 연마제 혼합비가 6 g/sec 그리고 이격거리는 4 mm였다.

(3) 반응표면분석법을 이용하여 표면거칠기 및 테이퍼값 두 가지 반응값을 고려한 실험에서 최적의 인자는 분사압력(A)은 303.94 MPa, 절단속도(B)은 49.74 mm/min, 연마제혼합비(C)은 7.95 g/sec이었고 최적조건하에서 실험을 수행한 결과 표면거칠기(R_a)는 4.455 μm였으며 테이퍼값은 0.0255 mm로 표면거칠기(R_a) 예측치 4.3461 μm와 테이퍼값의 예측치 0.0204 mm와 큰 차이가 없었다.

참고문헌

1. David A. Summers., 1995, “Waterjetting Technology,” Chapman & Hall, pp. 1-20.
2. Zeng, J. Kim, J. T., 1992, “Development of an abrasive water jet kerf model for brittle material,” Jet Cutting Technology, pp. 483-501.
3. Hashish, M., 1984, “Cutting with Abrasive Waterjets,” Mech. Eng, Vol. 106, No. 3, pp. 60-69.
4. Hashish, M., 1993, “The effects of beam angle in abrasive-waterjet machining,” Joumal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 51-56.
5. Taguchi, G., Chowdhury, S., and Taguchi, S., 2000, “Robust Engineering,” McGraw-Hill.