

티타늄의 워터젯 밀링을 위한 가공깊이/폭 모델링

박승섭^a, 김화영^b, 안중환^{a*}Modeling of Depth/Width of Cut for Abrasive Water Jet
Milling of TitaniumSeung Sub Park^a, Hwa Young Kim^b, Jung Hwan Ahn^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

^b Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University,

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	2	November	2015
Revised	11	December	2015
Accepted	31	December	2015

Keywords:

Abrasive water jet (AWJ)
AWJ milling
Depth profile
Depth/width of cut
Regression analysis

ABSTRACT

Because of the increasing tool cost for cutting hard-to-cut materials, abrasive water jet (AWJ) milling recently has been regarded as a potential alternative machining method. However, it is difficult to control the depth and width of cut in AWJ milling because they vary depending on many AWJ cutting parameters. On 27 conditions within a limited range of pressure, feed rate, and abrasive flow rate, AWJ cutting was conducted on titanium, and depth profiles were measured with a laser sensor. From the depth profile data, depth and width of cut were acquired at each condition. The relationships between depth and parameters and between width and parameters were derived through regression analysis. The former can provide proper cutting conditions and the latter the proper pick feed necessary to generate a milled surface. It is verified that pressure mostly affects depth, whereas abrasive flow rate mostly affects width.

1. 서론

연마제 워터젯(AWJ: abrasive water jet) 가공은 2,000~4,000 bar 정도로 압축된 고압의 물을 노즐을 통해 음속의 2~3배의 속도로 분사시켜 피삭재를 가공하는 기술이다. 이는 난삭재를 포함한 대부분의 재료의 가공이 가능하며, 상온에서 물을 이용하는 가공 방법이므로 열에 의한 변형이 없어 자동차, 전자관련 산업뿐만 아니라 항공우주 분야 등 고부가 가치 부품들에 적용되고 있다^[1].

AWJ를 이용한 밀링 가공은 1987년 Hashish^[2]에 의해 처음 언

급된 후부터 현재까지 꾸준히 연구가 진행되고 있다. AWJ 시스템은 재료의 구분없이 가공성이 매우 뛰어나며^[3] 재료에 미치는 영향이 적고 공구소모 등의 가공 비용 측면에 장점을 가지고 있기 때문에 최근 난삭재-텅스텐 카바이드, 인코넬, 공구강, 티타늄, 유리, 화강암, 복합재료 등의 수요가 늘어남에 따라 급격히 증가하고 있는 난삭재 가공용 공구비용을 줄이기 위한 방법으로 절단 위주로 사용하는 AWJ기술을 밀링에 적용하려는 노력이 시도되고 있다.

하지만 공구 끝점의 위치를 제어하여 원하는 가공깊이를 얻을 수 있는 기존의 밀링과 달리 AWJ는 원하는 가공 깊이를 얻기 위해서는 연마제 유량, 펌프 압력, 가공 속도와 같은 가공 변수를 적절

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2333

Fax: +82-51-581-3087

E-mail address: jhwahn@pusan.ac.kr (Jung Hwan Ahn).

하게 조절해야 한다. 아울러 pick feed를 얼마로 주어야 밀링으로 생성되는 면의 거칠기가 적절할 것인가도 가공깊이의 폭에 따라 조절해야 한다.

본 논문에서는 AWJ의 가공 변수에 따른 가공 깊이와 폭을 예측하기 위해 가공 깊이/폭을 모델링하여 실험적으로 구하고자 한다. 실제 난삭재인 티타늄을 대상으로 실험을 하여 회귀분석법으로 가공 깊이/폭 모델 식을 구하였다. 이 모델 식을 바탕으로 포켓가공에 필요한 절삭조건을 찾아 샘플가공을 하였으며 모델링 결과를 이용하면 밀링가공에 필요한 절삭깊이 및 pick feed의 가공 파라미터에 대한 값을 예상할 수 있으며 이를 이용하여 AWJ 밀링가공에 적용할 수 있을 것이다.

2. AWJ 밀링가공의 개념

2.1 AWJ 시스템 구성

Fig. 1은 AWJ 가공의 개념도를 나타낸 것이다. AWJ 밀링 시스템은 크게 고압의 물을 만들어내는 증압기(intensifier)와 고압의 물을 고속으로 변환하고 연마재를 혼합하여 가공하는 커팅헤드 두 부분으로 이루어져있다^[5]. 먼저 증압기는 크게 필터를 거쳐 불순물이 제거된 저압의 물을 고압을 물로 가압시키는 증압 펌프와 고압수의 압력 맥동을 완화해 압력을 일정하게 유지시켜 주는 축압기로 구성된다.

증압기로부터 생성된 고압수는 고압 관로(extension tube)를 통해 커팅헤드로 유입되고, 오리피스(orifice)의 작은 구멍을 통과하면서 고속으로 변환된다. 혼합챔버(mixing chamber)에서는 연마재 주입구(abrasive inlet tube)를 통해 유입된 연마재와 오리피스를 통과하여 고속으로 바뀐 물이 혼합된다. 이렇게 혼합된 물과 연마재는 노즐(nozzle)을 통과하는 동안 가속되어지며, 직진성이 보장된 상태로 분사되어 피삭재를 가공한다. Fig. 2는 가공깊이 실험에 사용된 (주)티오피에스의 SUPER JET 3015이다.

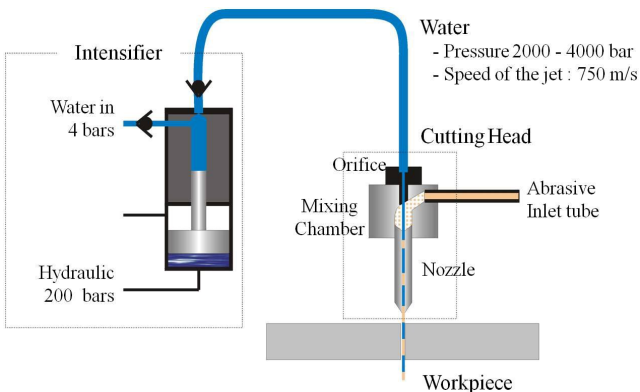


Fig. 1 Schematic of AWJ milling system^[4]

2.2 Pick feed를 이용한 AWJ 밀링

AWJ는 보통 부품을 절단할 때 사용하지만 밀링에 사용하고자 할 때는 가공조건을 적절히 조절해서 깊이를 맞추어야 한다. Fig. 3(a)는 AWJ 가공단면형상을 나타내는데 h 는 최대가공깊이, $w_{0.1}$ 은 하단 0.1 mm 지점에서의 가공폭을 나타낸다. 이와 같은 가공형상이 나타나는 것은 노즐에서 분사된 물과 연마재가 피삭재에 접근함에 따라 연마재가 정규분포를 이루며 진행하기 때문이다^[6]. Fig. 3(b)는 면가공 시 한 줄 가공한 뒤 옆으로 pick feed량($w_{0.1}$)만큼 이동해서 또 한 줄 가공하고 이를 5회 반복하면 Fig. 3(b)처럼 물결 모양의 작은 cusp가 있는 면이 생성된다. 여기서 h_c 는 cusp의 최대 높이를 나타내며 h_c 가 클수록 거친 면이 되고 작을수록 면이 고와진다. 또한, pick feed가 클수록 h_c 가 커진다.

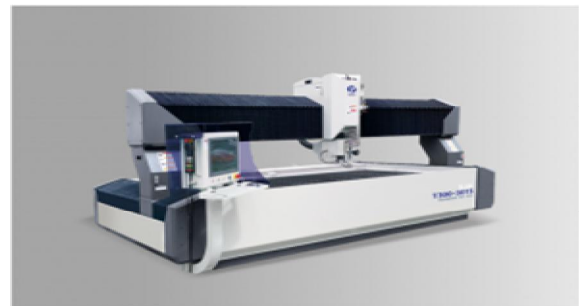
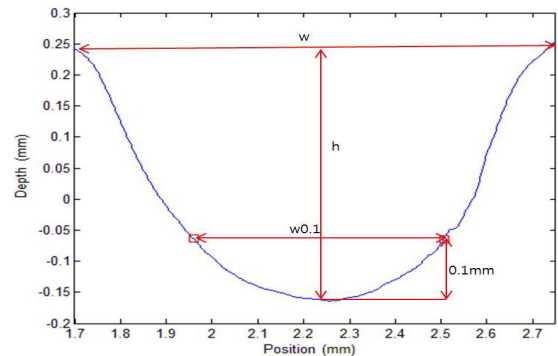
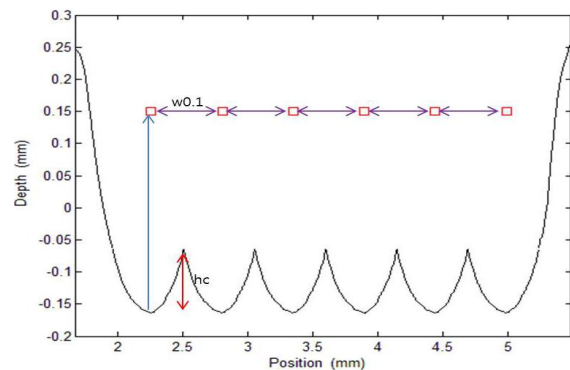


Fig. 2 Waterjet machine used in experiment



(a) Depth profile in AWJ



(b) AWJ milling with pick feed

Fig. 3 Concept of AWJ milling

3. AWJ 가공 실험 및 깊이/폭 측정

3.1 AWJ 가공 변수

AWJ 가공에서 절삭력에 영향을 끼치는 가공변수로는 워터젯 조건, 노즐 조건, 연마재와 가공물 조건 등에 관련된 많은 변수가 있으나^[7] 이 연구에서는 이격거리(SOD: stand-off distance), 연마재 종류와 입도, 노즐 형상, 오리피스 형상을 고정하였으며 펌프 압력, 이송속도, 연마재 유량을 주요 변수로 하여 이들이 가공깊이/폭의 변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

3.2 AWJ 가공 실험 조건

Table 1은 가공깊이 변화 실험에 사용한 피삭재의 기계적 물성치를 나타낸 것이다. 티타늄합금인 Ti6Al4V는 일반적인 재질에 비해 기계적 성질이 우수하고 가벼워 항공분야에 주로 사용되나, 가공성이 좋지 않아 난삭재로 분류된다^[8].

AWJ 가공깊이 예측모델링을 위해 주로 압력, 이송속도, 연마재 유량, 이격거리, 연마재입자크기 등을 변수로써 사용한다. AWJ는 연마재입자의 충돌에너지로 피삭재가 가공되며 이는 압력에 의한 입자속도, 이송속도에 의한 가공시간, 연마재유량에 의한 연마재입자 수와 질량이 가장 큰 영향을 미치기 때문에 위 조건을 가공변수로 사용하였다. 입자크기는 장비를 사용하여 작업자의 문의와 선행연구^[9]에서 티타늄합금가공시 80 mesh 연마재크기를 사용했기에 80 mesh로 고정하였다. 따라서 압력, 이송속도, 연마재유량을 3가지 단계(level)로 두고 나머지 조건을 고정하여 총 27회 실험을 진행하였다. Table 2는 AWJ의 가공 변수의 설정값을 나타낸 것이다. 각 조건에서 가공 길이는 200 mm이다.

3.2 가공깊이/폭 측정결과

Fig. 4는 가공 깊이 측정 시스템을 나타낸다. 가공 깊이 측정 시스템은 측정위치 제어를 위한 직선 이송계와 가공깊이 측정을 위한 레이저 변위센서로 구성된다. 가공깊이의 측정은 레이저 변위 센서를 가공 방향에 수직으로 이송하면서 가공깊이를 측정하였다. 이때 레이저센서 이송속도는 0.2 mm/s 이고, 샘플링 간격은 100 Hz로 하였다. Fig. 5(a)는 측정 데이터 예를 보이는데 신호에 섞여있는

잡음성분을 제거하기 위해 MA(moving average) 필터를 적용하여 Fig. 5(b)와 같은 가공깊이 형상을 얻었으며 이로부터 최대깊이 h와 cusp 0.1 mm 해당 가공폭을 구할 수 있다. 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 동일조건에서의 가공깊이 3지점에서 측정하고 이

Table 2 Experimental conditions of cutting parameters

SOD (mm)	5
Abrasive	Garnet (#80)
Nozzle diameter (mm)	1.016
Nozzle length (mm)	76.2
Orifice diameter (mm)	0.33
Pump pressure (P) (MPa)	100, 150, 200
Abrasive flow rate (m) (g/min)	100, 200, 300
Feed rate (f) (mm/min)	600, 1200, 1800

Table 3 Combinations of experimental conditions and measured values of depth/width

No	P	m	f	h	w0.1
1	1000	100	600	0.433	0.541
2	1000	100	1200	0.221	0.641
3	1000	100	1800	0.172	0.737
4	1000	200	600	0.586	0.485
5	1000	200	1200	0.224	0.653
6	1000	200	1800	0.160	0.748
7	1000	300	600	0.514	0.548
8	1000	300	1200	0.231	0.689
9	1000	300	1800	0.144	0.783
10	1500	100	600	1.110	0.421
11	1500	100	1200	0.386	0.611
12	1500	100	1800	0.264	0.656
13	1500	200	600	1.732	0.372
14	1500	200	1200	0.542	0.520
15	1500	200	1800	0.332	0.597
16	1500	300	600	1.991	0.358
17	1500	300	1200	0.542	0.517
18	1500	300	1800	0.340	0.620
19	2000	100	600	1.839	0.407
20	2000	100	1200	0.600	0.617
21	2000	100	1800	0.344	0.657
22	2000	200	600	3.131	0.319
23	2000	200	1200	0.977	0.456
24	2000	200	1800	0.557	0.539
25	2000	300	600	3.503	0.405
26	2000	300	1200	1.331	0.406
27	2000	300	1800	0.600	0.508

Table 1 Material property of Ti6Al4V

Workpiece	Ti6Al4V (Gr5)
Workpiece thickness (mm)	11
Yield strength (MPa)	910 (typical)
Tensile strength (MPa)	1000 (typical)
Density (g/cc)	4.43
Size (mm)	200×300×11

를 평균하였다.

Table 3은 27개 조건에서 측정된 가공 조건별 3회 측정된 최대

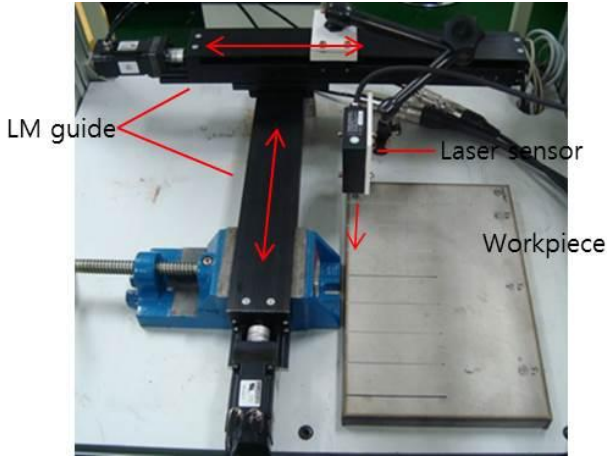
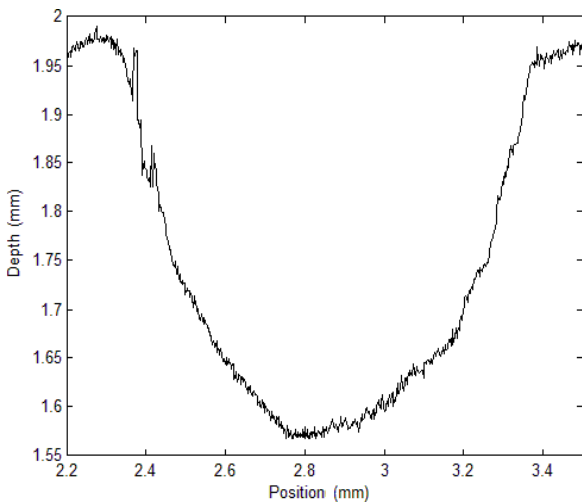
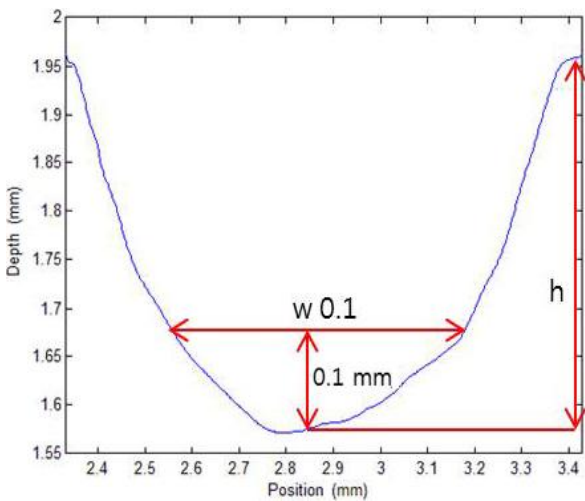


Fig. 4 Laser based measuring system of depth profile



(a) Raw data



(b) MA filtered data

Fig. 5 Depth profile

가공깊이와 cusp이 0.1 mm일 때 가공폭의 평균값을 정리한 것이다. P는 압력, m은 연마재 유량, f는 노즐이송속도이며 h는 최대 가공깊이, w0.1은 최저점에서 0.1 mm인 지점의 가공폭이다.

4. 회귀분석을 이용한 가공깊이/폭 모델링

4.1 가공깊이의 모델식과 회귀분석

최대 가공 깊이는 연마재의 충돌에너지와 관계되는 펌프 압력, 연마재 유량, 가공 시간, 가공물 재질, 노즐 직경 등과 밀접한 관계를 가지기 때문에 최대 가공 깊이는 일반적으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다^[10,11].

$$h = K \frac{m^x P^y}{d \rho f^z} \quad (1)$$

여기서 K는 상수, m는 연마재 유량(g/min), P는 펌프 압력(bar), f는 이송 속도(mm/min), d는 노즐직경(mm), ρ는 피삭재의 밀도(g/cc)를 나타낸다. 압력, 이송속도, 연마재 유량은 각각 지수형태의 미지수를 가지며, 미지수의 크기에 따라 최대가공깊이에 미치는 영향을 분석할 수 있다. 본 연구에서는 펌프 압력과 이송속도, 연마재 유량을 변수로 두고, 노즐직경과 피삭재 밀도는 고정으로 두었기 때문에 식 (1)을 식 (2)처럼 간략화 하였고, 양변에 로그를 취하여 식 (3)과 같이 선형화하였다.

$$h = KP^a f^b m^c \quad (2)$$

$$\log(h) = \log(K) + a \log(P) + b \log(f) + c \log(m) \quad (3)$$

식 (3)의 최대가공깊이 모델에서 미지수를 구하기 위해 회귀분석 상용 통계분석프로그램인 SPSS를 사용하였고, Table 4의 분산분석(ANOVA)을 하여 유의확률이 2.4E-16으로 0.001보다 작게 나왔으므로 회귀식의 적합성을 확인하였다^[11].

회귀모델 결과는 식 (4)와 같으며, 펌프 압력, 이송속도, 연마재 유량의 순서로 최대 가공깊이에 영향을 미침을 알 수 있다.

$$h = 10^{-3.204} P^{2.03} f^{-1.392} m^{0.339} \quad (4)$$

Fig. 6은 가공조건별 측정값과 회귀모델 값을 뺀 오차를 나타낸 것으로 대부분 ±20% 이내이지만 3, 7, 20번 실험과 같이 30-40%에 달하는 것도 일부 있다. 이러한 오차의 원인은 워터젯의 펌프압력이 약 100 bar의 변동폭을 가지고 있고, 연마재의 혼입이 일정하지 않았기 때문이라고 생각된다.

4.2 가공폭의 모델 식과 회귀분석

가공깊이 모델 식처럼 가공폭의 모델식을 구한다. 가공단면의 최

저점에서 0.1 mm 높이의 폭을 w0.1로 하여 펌프압력(P), 이송속도(f), 연마재 유량(m)을 독립변수하여 로그변환한 회귀모델 식은 식 (5)와 같다.

$$\log(w0.1) = \log(K) + a\log(P) + b\log(f) + c\log(m) \quad (5)$$

Table 5는 회귀분석의 분산분석(ANOVA) 결과를 나타낸 것으로 유의확률(p)이 1.5E-10으로 0.001 미만으로 이는 회귀모델이 적합하지 않을 확률을 뜻하므로 모델의 적합성을 확인할 수 있다¹¹⁾. 회귀모델 식 결과는 식 (6)과 같은데 최대 가공깊이와 반대로 압력과 연마재 유량과는 반비례, 이송속도와는 비례한다. 압력과 이송속도의 영향은 가공깊이의 경우에 비해 1/4 정도로 작아졌으나, 연마재 유량의 영향은 가공깊이의 경우에 비해 3배 정도 커졌음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7에 보이는 것처럼 AWJ 밀링 가공 메커니즘이 절단가공의 경우와 달리 가공물에 직각으로 분사된 워터젯이 가공물을 관통하지 않고 가공 밀면 근처에서 이송방향의 반대방향으로 흘러 나가면서 밀면을 생성하기 때문에 연마재

유량이 밀링가공면의 형상을 결정하는데 비교적 큰 영향을 미친다고 생각된다.

$$w0.1 = 10^{0.234P - 0.458f + 0.387m - 0.104} \quad (6)$$

Fig. 8은 가공조건별 가공폭(w0.1)의 측정값과 회귀모델 값을 뺀 오차를 나타낸 것으로 모두 ±20% 이내로 가공조건의 변동에도 불구하고 회귀모델이 측정값을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

AWJ를 난삭재 중 하나인 티타늄합금(Ti6Al4V)의 밀링에 적용하기 위해 워터젯 주요 가공조건인 압력, 이송속도, 연마재 유량 3가지 변수에 따른 가공깊이와 가공폭의 관계식을 모델링하고 회귀분석으로 그 적합성을 확인하는 연구를 통해 다음과 같은 결론을

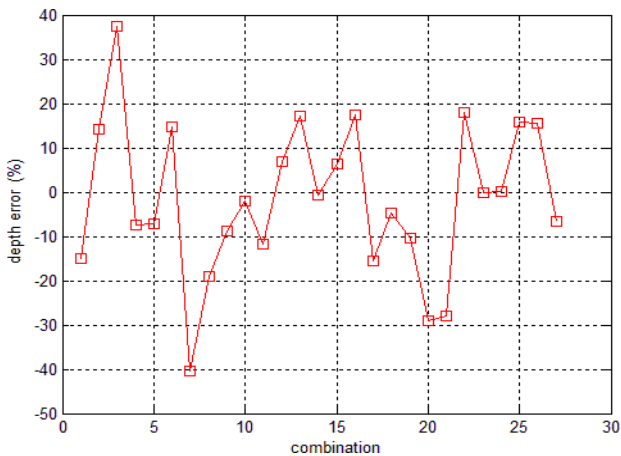


Fig. 6 Depth error between measured and modeled values

Table 4 ANOVA of multiple linear regression model of h

	Sum of squares	Mean square	Significance probability (p)
Regression	3.847	1.282	less than 0.001
Residual	0.156	0.007	
Total	4.003		

Table 5 ANOVA of multiple linear regression model of w0.1

	Sum of squares	Mean square	Significance probability(p)
Regression	0.254	0.085	less than 0.001
Residual	0.036	0.002	
Total	0.290		

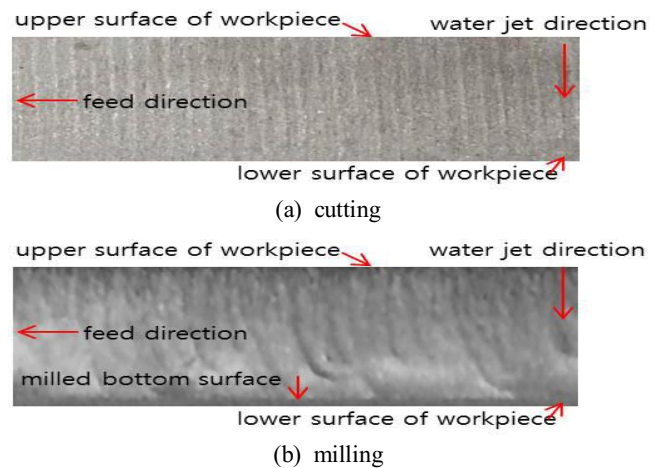


Fig. 7 Comparison of machined surface along with traverse direction by AWJ

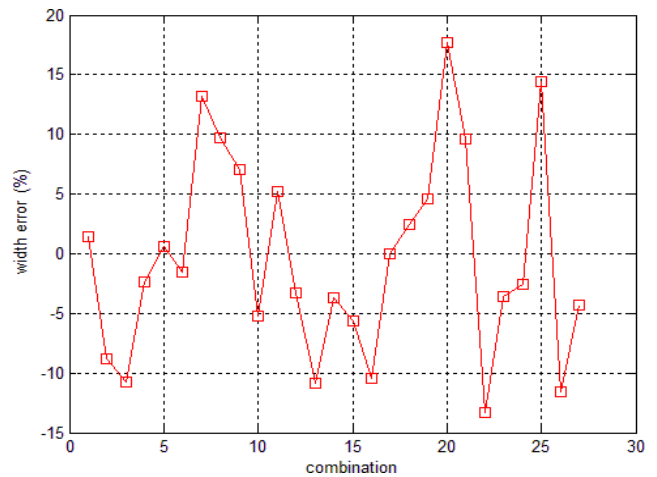


Fig. 8 Width error between measured and modeled values

얻었다.

(1) 가공깊이에 가장 큰 영향을 미치는 것은 압력이고, 연마재 유량의 영향이 가장 작았다.

(2) 가공폭은 연마재 유량의 영향을 많이 받고, 가공깊이의 경우에 비해 3배 정도 커졌다.

(3) 가공깊이와 가공폭의 회귀모델과 측정값의 오차는 가공폭의 경우 전체 조건에서 평균오차가 0.036 mm 최대오차가 0.109 mm로 비교적 잘 맞았으나, 가공깊이의 경우 평균오차는 0.127 mm로 3번 조건, 7번 조건의 가공깊이는 40% 가량 오차가 발생하게 되는데 이는 0.172 mm, 0.514 mm에서 각각 0.064 mm, 0.208 mm의 오차를 갖고 가공조건별 3회의 깊이 측정결과 간 편차와 비슷하거나 낮은 값을 가지며 가공깊이가 작은 탓에 실제 오차에 비해 오차율이 크게 표시되는 측면이 있어 회귀모델의 신뢰성에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술평가원”, “우수기술 연구센터사업(위터젯을 이용한 난삭재 3D 형상 가공 시스템 기술 개발)”으로 수행된 연구 결과입니다 (10048626).

References

- [1] Jin, Y. H., Chung, N. Y., Kim, K. H., 2004, Characteristics of Cut Surface by Abrasive Waterjet Cutting of Titanium Alloy, 2004 KSAE Annual Conference, 1441-1447.
- [2] Hashish, M., 1987, Milling with Abrasive-Waterjets-A Preliminary Investigation, Proceedings of the 4th U.S. Water Jet Conference, 1-20.
- [3] Hashish, M., 1984, A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Water Jets, ASME Journal Engineering Materials and Technology, 106:1 88-100.
- [4] Lee, H. R., Kwak, Y. K., Kim, H. Y., Ahn, J. H., Yeo, M. H., 2011, Effects of Mixing Chamber Shape on Cutting Performance in AWJ, KSMTE, 20:5 535-540.
- [5] Park, Y. K., Park, K. S., Kim, H. H., Shin, B. S., Ko, J. S., Ko, J. S., 2008, Evaluation of Efficiency on Glass Precision Machining by using Abrasive Water-jet, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 27:7 87-93.
- [6] Srinivasu, D. S., Axinite, D. A., Shipway, P. H., Folkes, J., 2009, Influence of Kinematic Operating Parameters on Kerf Geometry in Abrasive Waterjet Machining of Silicon Carbide Ceramics, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49:14 1077-1088.
- [7] Kolahan, F., Khajavi, A. H., 2009, Modeling and Optimization of Abrasive Waterjet Parameters using Regression Analysis, World Academy of Science Engineering and Technology, 59 488-493.
- [8] Zeng, J., 2007, Determination of Machinability and Abrasive Cutting Properties in AWJ Cutting, 2007 American WJTA Conference and Expo.
- [9] Fowler, G., Shipway, P. H., Pashby, I. R., 2005, Abrasive Water-jet Controlled Depth Milling of Ti6Al4V alloy- an Investigation of the Role of Jet-workpiece Traverse Speed and Abrasive Grit Size on the Characteristics of the Milled Material, Journal of Materials Processing Technology, 161:3 407-414.
- [10] Mukul, S., 2013, Nontraditional Machining Processes(Ch6), Springer Verlag, England.
- [11] Song, G. Y., Moon, H. H., Park, B. G., Kim, S. C., Lee, E. S., 2002, A Study on the Tool Temperature Estimation for Different Cutting Conditions in Turning Using Statistical Method, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 19:11 96-102.