

티타늄 합금의 연마제 워터 제트 절단에 의한 절단표면 특성

정 남 용* · 진 윤 호**

*숭실대학교 기계공학과

**숭실대학교 대학원 기계공학과

Characteristics of Cut Surface by Abrasive Waterjet Cutting of Titanium Alloy

Nam-Yong Chung* and Yun-Ho Jin**

*Dept. of Mechanical Engineering, Soong-Sil University, Seoul 156-743, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Soong-Sil University, Seoul 156-743, Korea

Abstract

Abrasive waterjet (AWJ) can provide a more effective means for precision of difficult-to-machining materials such as ceramics and titanium alloys. The present study is focused on the surface roughness of abrasive waterjet cut surfaces. This paper investigated theoretical and experimental surface characteristics associated with abrasive waterjet cutting of titanium alloy Gr2. It is shown that the proper variations of several cutting parameters such as waterjet cutting pressure, cutting speed and cutting depth improve the roughness and characteristics on specimen surfaces produced by AWJ cutting. From the experimental results by AWJ cutting of titanium alloy Gr2, the optimal cutting conditions to improve the surface roughness and precision were proposed and discussed.

* Corresponding author : nychung@ssu.ac.kr

(Received November 19, 2004)

Key Words : Abrasive waterjet, Cutting parameter, Cutting trajectory, Cutting wear mode, Kerf, Optimal cutting condition, Surface characteristics, Surface roughness, Titanium alloy

1. 서 론

고강도, 고경도 및 고기능성 신소재의 개발 및 응용은 이들 소재의 효과적인 가공방법을 동시에 필요로 한다. 현재 티타늄 합금은 비강도가 크고, 내피로성, 내식성 및 생체 적합성이 양호하며, 고온에서 안정된 특성을 가지므로 우주항공, 가스터빈, 화학기기, 자동차, 선박 및 생체재료 분야와 형상기억 합금 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 난삭재 중의 하나로서 기존의 가공 방법으로는 절단 표면 정밀도 및 생산성의 저하와 비용의 증가 등 많은 문제점이 있다. 이러한 난삭재의 절단 가공으로서 가장 최근에 개발된 기대되는 유망 기술로 연마제 워터 제트(abrasive water jet: AWJ) 절단법은 난삭의 균질재, 이종재료, 복합재료 및 이들에 의한 각종 신소재의 유용한 절단에 그 사용이 점차 증가하고

있다.

AWJ 절단기술은 각종 재료를 효율적으로 절단하기 위하여 연마제 입자를 첨가한 고속의 물을 사용하는 것이 특징이고, 물을 사용하므로 현재 많이 사용되고 있는 기존의 레이저 절단(laser cutting), 플라스마 절단(plasma cutting), 화염절단(flame cutting) 등과 비교하면 열 영향이 없고 절단표면이 양호하며, 표면 피로성능의 향상, 고경도 및 두꺼운 재료의 절단이 가능하고, 신속한 절단과 동력소비가 적게 드는 경제적 절단 등의 장점을 갖는다.

AWJ 절단에 관한 연구는 Hashish¹⁾, Ramulu 등²⁾과 Blickwedel 등³⁾의 절단 영향인자에 의한 표면 거칠기의 연구가 있지만, 이들은 재료의 특성 및 다상(multi-phase) 재료에 대한 상이한 파괴기구를 고려하지 않았다. Zeng 등^{4,5)}은 취성재료에 대한 절단공정의 연구를 하고, Arola 등⁶⁾에 의한 Ti 합금의 표면 조

직 및 미세구조의 연구와 Vikram 등⁷⁾의 AWJ 절단 메커니즘에 대한 연구가 있다. 또한, 세라믹스 재료에 대한 커프(kerf)의 형성 및 표면 품질에 관한 연구^{8,9)}, Wang 등^{10,12)}에 의한 AWJ 절단성능의 연구가 있고, Hassan 등¹⁴⁾은 AE(acoustic emission)에 의한 절단 깊이의 온라인 모니터링에 대한 모델을 연구를 하였다.

그러나 AWJ 절단에 대한 이들 연구의 대부분은 장치, 응용성 및 운동학 등의 절단성능에 국한되어 있기 때문에 재료 특성인자의 영향을 고려한 AWJ 절단 방법에 대한 연구가 시급히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 티타늄 합금 Gr2를 사용하여 절단 인자의 변화에 의한 AWJ 절단 실험을 통하여 표면 특성 및 정밀도를 검토하고, AWJ 절단에 대한 표면 정밀도를 향상시키기 위한 최적 절단조건을 제시하고자 한다.

2. AWJ 절단 메커니즘

2.1 절단 표면의 형성

연마제 워터 제트(AWJ) 절단의 기본 특성은 신속한 냉각과 관련된 새로운 침식(erosion) 방법으로 재료를 절단하는 것이다. 절단 표면은 워터 제트가 재료에 고속 침투하는 궤적(trajecory)으로 형성되고, 이 특수 궤적은 탄도학 이론에 기초하고, 재료 절단은 Bitter의 부식이론에 근거한다.

Fig. 1에 AWJ 절단에 의해 생성된 표면을 나타내었다. Fig. 1(a)와 같이 AWJ 절단은 연마제를 첨가한 물이 고압고속으로 노즐을 통과하면서 단일 연마제의 입자 충격 운동 에너지가 재료를 다중 충격으로 누적 부식시키는 미세 절단(micro-cutting) 효과로 재료가 제거되고, 절단된 표면은 그림에서와 같은 궤적이 형성된다. 이렇게 형성된 절단 표면은 3개의 영역으로 구분된다. 상부영역(upper zone)은 연마제의 작은 충격 각도에 의한 절단 마모(cutting wear) 영역이다. 이 영역에서는 입자 충돌에 의해 재료가 제거되고, 표면은 가장 매끈하며 줄무늬(striation)와 피트(pit)가 발생하지 않는다. 중간영역(middle zone)은 줄무늬가 나타나기 시작하고 피트는 발견되지 않으며, 절단 마모 형태에서 변형 마모(deformation wear) 형태로 바뀌는 영역이다. 또한, 하부영역(lower zone)은 피트가 존재하고 워터 제트가 위쪽으로 휘어져 큰 충격 각도에서 변형 마모에 의해 재료가 절단 제거된다.

절단 마모 영역은 표면 거칠기에 관계되고, 변형 마모 영역은 Fig. 1(b)와 같은 파상(waviness)의 영향을 받으며 파상은 절단표면의 밑 부분에서 줄무늬로 나

타난다. 절단표면의 거칠기는 AWJ 절단의 미시역학에 관계되고 연마제 입자의 크기가 중요한 인자이다. 그리고 파상은 절단공정의 거시역학에 관계되며, 절단 깊이와 유효 제트의 지름 감소는 파상에 밀접한 관계가 있다. 또한, 절단 출구에서는 연마제의 충격 작용으로 재료의 특성에 따라 버(burr)가 생성되는 경우도 있다.

AWJ 절단에서 피트는 연마제와 캐비테이션(cavitation)의 결정 입자에 의해 재료 표면에 생성된다. 워터 제트에 함유된 연마제 입자는 그들의 에너지, 운동량, 입자 크기, 응력 및 변형률 특성, 충격각 등의 인자에 따라 재료의 작은 부분을 제거, 또는 스스로 재료 표면에 스며들게 한다. 고속의 물에 의해 국부적인 표면 거칠기를 초과하여 캐비테이션이 생기고, 더욱 미시적이고 거시적인 형태는 AWJ의 연마제 입자 충격에 의한 줄무늬와 파상 때문에 생성된다.

Fig. 1(c)는 절단 폭 단면의 형상을 나타낸 것으로 커프(kerf)라 하고, 커프의 형상은 폭, 라운딩, 테이퍼, 버, 거칠기 및 파형으로 나타난다. 라운딩은 워터 제트의 퍼짐에 의하고, 테이퍼는 제트의 에너지 손실, 또는 절단중의 팽창 때문에 발생한다. 커프의 생성으로 인한 표면 거칠기는 편차가 크고, 커프 간격은 중요한 공

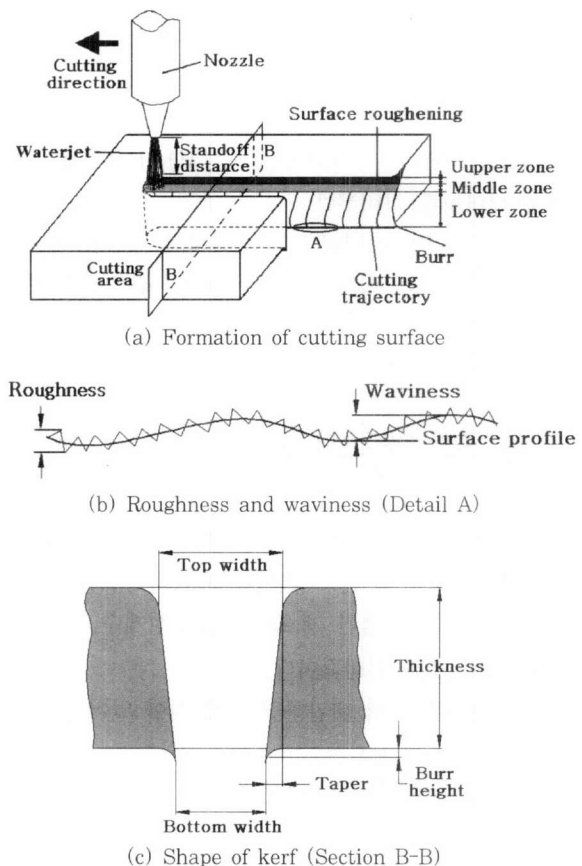


Fig. 1 Characteristics of cut surfaces produced by AWJ cutting

정 인자이므로 이 거리를 최적화하는 것은 에너지를 절약할 수 있고, 생성된 표면 품질을 개선할 수 있다.

AWJ 표면 거칠기에 대한 지식은 절단가공의 자동화에 중요한 인자이며, 표면 거칠기와 줄무늬 특성은 AWJ 절단 표면의 정밀도를 평가하는 기준이 된다.

2.2 AWJ 절단량

2.2.1 균열 파괴에 의한 절단량

단일 충격파괴에 의한 절단량 (V_c)은 균열망 모델을 사용하여 평가 가능하고, 균열망 형성에 필요한 파괴 에너지 (W_c)는 다음 식과 같이 된다.

$$W_c = 2A_c \gamma \tag{1}$$

여기서, $2A_c$ 는 균열망의 전표면적, γ 는 단위 면적의 균열 발생에 필요한 파괴 에너지이고, W_c 는 응력파(stress wave) 에너지에 비례한다. 균열망은 재료의 결정립 크기 a 와 등가인 입방체 입자로 구성되고, 균열망 체적 파괴에 의한 절단량 (V_c)은 다음 식으로 계산된다.

$$V_c = \frac{f_w a W}{6\gamma} \tag{2}$$

여기서, f_w 는 비례계수 (W_c/W)이고, W 는 전응력과 에너지를 의미한다.

또한, 연마제 충격하중은 응력파의 형태로 탄성영역으로 전달되고, 충격으로 방출되는 전응력과 에너지 (W)는 수직 및 수평방향 힘에 의한 일의 합이며, 다음 식으로 근사된다.

$$W = \frac{2\beta\sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{E} \tag{3}$$

여기서, m 은 연마제 입자의 질량, v 는 연마제 입자의 충격속도, σ_f 는 시험편 재료의 유동응력(flow stress), E 는 시험편 재료의 세로탄성계수, α 는 충격 각도이고, β 는 실험값이다.

식(3)을 식(2)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.

$$V_c = \frac{f_w \beta \alpha \sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{3\gamma E} \tag{4}$$

2.2.2 소성유동에 의한 절단량

소성유동에 의한 절단량 (V_p)은 연마제 입자가 파

문하지 않는 경우만을 고려하는 수정 Finnie의 모델을 사용하여 평가하고, 단일 충격에 의한 절단량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$V_p = \frac{m v^2}{4\sigma_f} (\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha + 38.12v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}}) \tag{5}$$

여기서, ρ_p 는 연마제 입자의 밀도이다.

2.2.3 단일 충격에 의한 전절단량

재료의 전절단량 (V)은 응력파에 의한 균열망 때문에 발생하는 절단량 (V_c)과 소성유동에 의한 절단량 (V_p)의 합으로 되고, 식(4)와 식(5)을 이용하면 단일 충격에 의한 전절단량은 다음 식과 같이 된다.

$$V = \frac{f_w \beta \alpha \sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{3\gamma E} + \frac{m v^2}{4\sigma_f} (\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha + 38.12v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}}) \tag{6}$$

3. 실험

3.1 시험편 재료

시험편 재료는 우주항공, 가스터빈 및 생체 재료로서 널리 응용되고 있는 티타늄 합금을 사용하였다. 본 실험에 사용된 티타늄 합금 Gr2는 내식성이 우수하고, 구조물 제작시 변형이 적기 때문에 파이프의 제작에 널리 사용되고 있다.

Table 1은 티타늄 합금 Gr2에 대한 화학적 조성을 나타내고, Table 2에는 물리적 및 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of titanium alloy Gr2

Element	Ti	N	C	H	Fe	O	Others
wt. %	98.91	0.03	0.10	0.01	0.30	0.25	0.4

Table 2 Physical and mechanical properties of titanium alloy Gr2

Material properties	Values
Density (g/cm ³)	4.51
Hardness (HB)	72
Young's modulus (GPa)	108.5
Poisson's ratio	0.34
Tensile strength (MPa)	235
Yield strength (MPa)	140

3.2 시험편의 제작

시험편의 제작은 우선 티타늄 합금 Gr2 판재를 폭 60 mm, 두께 10 mm, 길이 150 mm로 연삭 가공하여 세척하고, 완전히 건조시킨 후 판재를 CNC AWJ 절단기에 고정한다. CNC 프로그램을 이용하여 절단조건을 설정한 후 75×15×10 mm의 치수로 8개의 시험편을 절단 가공하였다. 각각의 절단조건을 CNC 프로그램으로 입력하여 조건의 변화에 따른 오차가 없도록 하고, 이 결과를 모니터를 통하여 확인하였다.

3.3 실험 장치 및 방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 CNC AWJ 절단 시스템(미국 FLOW사제 모델 IFB3018)을 나타낸 것이다. AWJ 절단기는 고압펌프, 연마제 절단 헤드, 연마제 이송 시스템, 노즐 및 운전 시스템, 제어장치, 사용 연마제 수거장치 및 안정 탱크로 구성되어 있다. 고압의 물은 다이아몬드 오리피스를 통하여 절단 헤드의 혼합 챔버로 흘러 들어가게 하고, 연마제는 워터 제트와 혼합되어 노즐을 통하여 AWJ 절단 분류를 형성한다.

연마제는 Garnet #80을 사용하고, 노즐의 지름은 $\phi 1.0$ mm이며, 재료와 노즐과의 거리(stand off distance)는 3 mm로 설정하였다. AWJ 절단실험에 사용된 각 절단조건을 Table 3에 나타낸다.

사용 압력은 310 MPa (45000 psi), 345 MPa (50000 psi), 379 MPa (55000 psi), 414 MPa (60000 psi)의 4단계로 변화시키고, 절단 속도는 각각 150, 200, 250, 300, 350 mm/min의 5단계로 변화시켰다. 시험편 지그를 사용하여 테이블에 고정시키고, 각 실험에 대한 절단조건 설정은 CNC AWJ 시스템에서 사용하는 고유의 프로그램을 이용하여 제어하였다. 절단 가공된 시험편은 광학식 표면 측정기

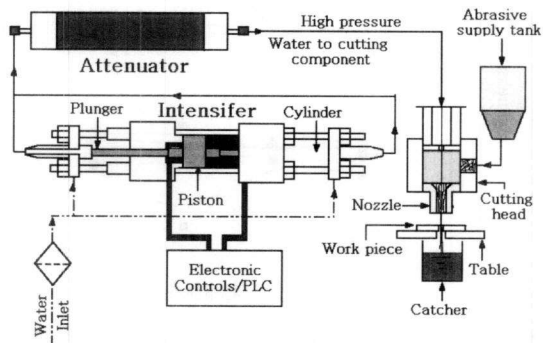


Fig. 2 Schematic diagram of abrasive waterjet cutting system

Table 3 Experimental conditions for AWJ cutting

Parameters	Unit	Range
Operating pressure (P)	MPa	310-414
Orifice diameter (d_w)		0.33
Abrasive nozzle diameter (d_n)	mm	1.0
Abrasive nozzle length (ℓ_a)	mm	100
Cutting speed (v)	mm/min	150-350
Cutting depth (h)	mm	10
Abrasive flow rate (m_a)	g/s	2.56
Stand off distance (S)	mm	3
Abrasive mesh No.(Garnet #)	—	80

(Rodenstock사제 모델 RM600-S)를 사용하여 각 시험편의 표면 거칠기를 측정하였다.

실험결과는 동일 절단 조건에서 실험한 3개의 시험편에 대해서 표면조도 측정기를 사용하여 절단 두께의 상부에서 아래쪽으로 2 mm, 4 mm, 6 mm, 그리고 8 mm 떨어진 지점을 각각 3회씩 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 압력 변화에 대한 절단특성

Fig. 3~Fig. 5는 절단 압력을 각각 310, 345, 379, 414 MPa로 변화시키고, 각 압력에 대한 절단속도가 150, 200, 250, 300, 350 mm/min일 때의 절단표면에 대한 거칠기를 시험편의 절단 두께의 상부에서 서부터 각각 2, 4, 6, 8 mm 떨어진 지점에 대해서 측정한 평균값을 나타낸 것이다. Fig. 3은 중심선평균 거칠기(Ra), Fig. 4는 10점평균 거칠기(Rz), 그리고 Fig. 5

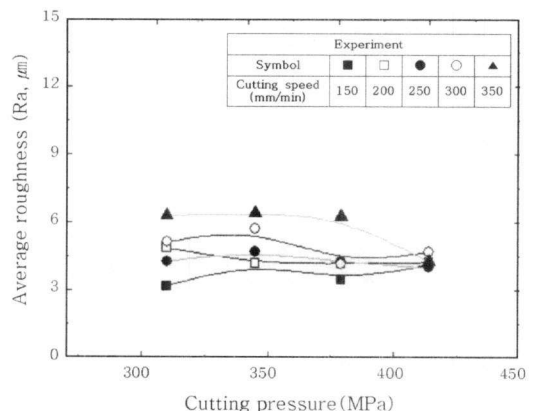


Fig. 3 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed

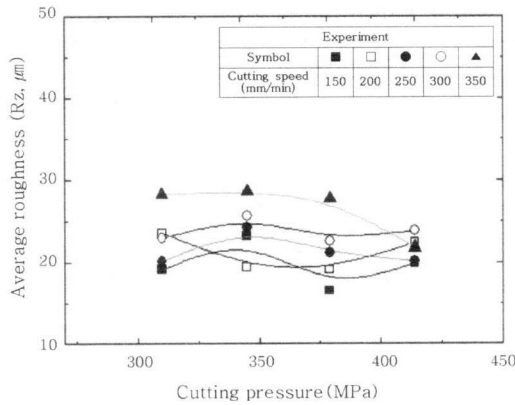


Fig. 4 Variation of surface roughness (Rz) as a function of the cutting pressure and cutting speed

는 최대높이(Rmax) 거칠기로 나타내었다.

Fig. 3의 중심선평균 거칠기(Ra)는 가장 많이 사용되며, 기준길이 내에서의 중심선의 방향으로 측정된 거칠기 곡선의 요철과 그 중심선에 포함된 면적의 합을 측정 길이로 나눈 것으로 중심선에 대한 산술 평균 편차에 상당한다. Ra는 요철이나 거칠기 곡선의 모양에 대한 정보를 포함하지 않는다. 그림의 Fig. 3에서 중심선평균 거칠기(Ra)는 절단압력 414 MPa에서 전범위의 절단속도에 대하여 편차가 적은 것으로 나타난다.

그러나 절단압력 310 MPa에서 절단속도 150 mm/min 일 때 가장 좋은 표면을 얻을 수 있고, 절단압력 및 속도가 증가할수록 표면은 더욱 거칠어진다. 절단압력이 310~414 MPa로 증가하여도 절단속도 200~250 mm/min에서는 약간의 편차가 있지만 일정한 값을 나타낸다. 그러나 절단속도 300~350 mm/min에서 압력이 증가하면 표면 정밀도는 더욱 향상되는 현상이 발생한다. 따라서 절단압력 310 MPa일 때 절단속도

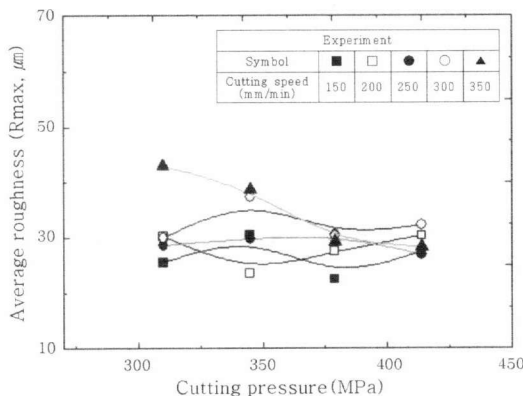


Fig. 5 Variation of surface roughness (Rmax) as a function of the cutting pressure and cutting speed

150 mm/min, 절단압력 414 MPa에서 350 mm/min 일 때 가장 양호한 표면이 형성되었다. 그러므로 절단압력의 상승에 따라 절단속도도 증가시켜야 양호한 절단표면이 얻어진다. Fig. 4에 나타난 10점평균 거칠기 (Rz)에 의한 실험결과와 Fig. 5의 최대높이(Rmax)에 의한 실험결과는 Fig. 4와 유사한 경향으로 Ra보다 큰 값으로 편차가 크게 변화한다.

따라서 본 연구에서는 이상의 결과를 고려하여 AWJ 절단에 의한 표면 정밀도를 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 중심선평균 거칠기(Ra)로 표시하여 평가한다.

본 실험에서 얻어진 Fig. 4의 결과로부터 절단압력에 대한 절단표면 특성은 절단압력이 낮을수록 절단속도에 대한 절단충격으로 인하여 표면 거칠기의 편차가 크다. 또한 절단속도가 가장 저속일 때 절단 정밀도가 양호하다. AWJ 절단에서 이러한 현상이 나타나는 것은 연마제 입자의 다중 충격에 의해 재료가 누적 침식되기 때문에 식(6)에서 절단압력과 절단속도의 상호작용으로 균열파괴와 소성유동에 의한 절단량에 영향을 미친다. 따라서 절단압력이 저압일수록 절단속도는 저속으로 하는 것이 침식 시간의 증가로 양호한 표면이 얻어지고, 고압일수록 속도변화에 영향을 별로 받지 않는 표면 거칠기를 형성하는 것을 알 수 있다. 또한, 식(6)에서 연마제의 충격각도가 직각일 때 재료의 절단량이 가장 큰 것을 알 수 있고, 본 실험에서는 노즐의 충격각도를 90° 로 제한하였다.

4.2 절단 깊이 변화에 대한 절단특성

Fig. 6은 절단압력 310 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면거칠기(Ra)를 나타낸 것이다. 절단속도 150 mm/min일 때 전절단 깊이에서 가

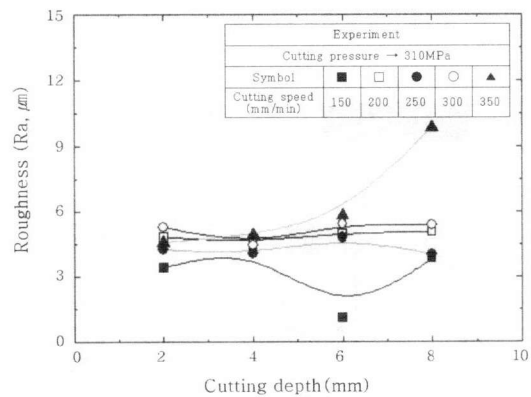


Fig. 6 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed and cutting depth at the cutting pressure of 310 MPa

장 양호한 표면이 얻어지고, 특히 절단 깊이 6 mm에서는 표면 거칠기가 급격히 작아지는 돌출된 데이터가 나타났는데 추후 검토가 필요하다. 절단속도가 350 mm/min인 경우는 절단 깊이가 커질수록 표면 거칠기도 급격하게 증가하는 현상이 나타난다. 그러나 그 외 실험결과는 절단 깊이의 변화에 상관없이 거의 일정한 범위의 값들을 나타낸다. 따라서 절단 두께 10 mm의 재료에서 표면 거칠기는 절단압력을 310 MPa로 가공할 때 절단속도는 150~300 mm/min으로 하면 양호한 절단 표면이 얻어진다.

Fig 7은 절단압력 345 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 그림에서 절단 깊이 2 mm에서는 약간의 편차가 있지만 절단속도가 작을수록 양호한 표면을 얻을 수 있고, 24 mm에서는 편차가 거의 없다. 그러나 절단 깊이 68 mm에서는 절단속도 300~350 mm/min일 때 절단 표면의 정밀도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 절단 두께 10 mm의 재료에서 표면 거칠기는 절단압력 345 MPa일 때 절단속도를 150~250 mm/min으로 하면 양호한 절단 표면을 얻을 수 있다.

Fig. 8는 절단압력이 379 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이변화에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 표면 거칠기는 절단 깊이 2 mm에서 절단속도가 150 mm/min일 때 매우 작고, 절단 깊이 8 mm에서 절단속도 350 mm/min일 때 매우 거친 표면이 얻어진다. 그림에서 절단 깊이 2 mm에서는 절단속도가 증가할수록 표면은 약간 거칠어지지만, 48 mm에서는 이러한 현상이 나타나지 않고, 절삭속도에 무관하게 일정한 편차를 갖는다. 또한, 절단 깊이 2 mm에서는 매우 정밀한 표면이 얻어지고, 절단 두께 10 mm의 재료에서 절단압력 379 MPa일 때 절단속도 150~300

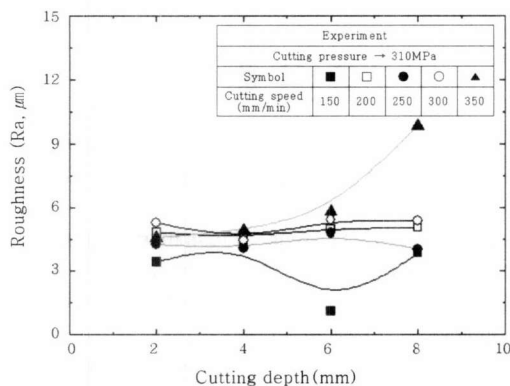


Fig. 7 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed and cutting depth at the cutting pressure of 345 MPa

mm/min으로 하면 양호한 절단 표면을 얻을 수 있다.

Fig. 9는 절단압력이 414 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 표면 거칠기는 절단 깊이 46 mm에서 편차가 없는 양호한 표면을 형성하고, 2 mm와 8 mm에서 약간의 편차가 있지만 표면 정밀도에는 별 영향을 미치지 않았다.

따라서 절단 두께 10 mm의 재료는 절단압력이 310 MPa일 때 절단속도를 150~300 mm/min, 345 MPa일 때 150~250 mm/min, 379 MPa일 때 150~300 mm/min, 그리고 414 MPa일 때 절단속도 150~350 mm/min의 범위에서 양호한 절단 표면을 얻을 수 있다. 그러므로 전압력 범위에서 정밀한 절단 표면을 얻으려면 절단속도를 150~250 mm/min으로 설정하는 것이 최적조건으로 판단된다.

Fig. 7~Fig. 9에서 알 수 있듯이 절단압력이 310 MPa과 345 MPa에서는 절단 깊이 6 mm까지의 범위에서 379 MPa에서는 4 mm까지, 414 MPa에서는 8

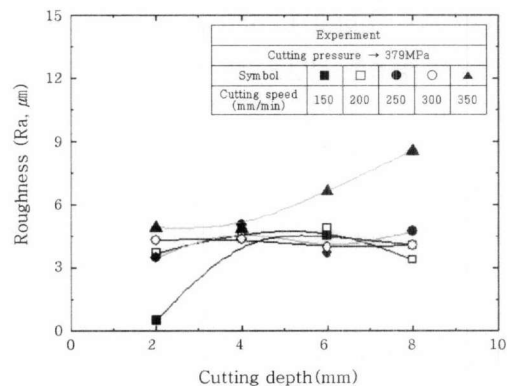


Fig. 8 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed and cutting depth at the cutting pressure of 379 MPa

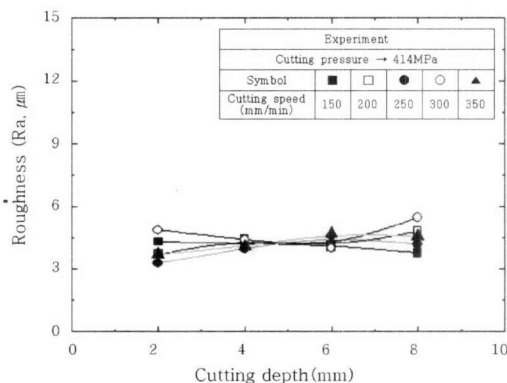


Fig. 9 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed and cutting depth at the cutting pressure of 414 MPa

mm까지 절단속도의 영향을 거의 받지 않는 양호한 절단 표면을 나타낸다. 이러한 현상이 나타나는 것은 이 부분이 절단 마모영역으로서 줄무늬와 피트가 없는 가장 매끈한 영역으로 판단된다. 또한, 이러한 절단 깊이가상이 되면 절단마모 형태에서 변형마모 형태로 바뀌고 워터 제트가 휘어지며 줄무늬나 피트가 형성되어 표면 거칠기는 증가한다. 그러나 본 실험에 사용한 티타늄 합금의 경우 육안으로 파악할 수 있는 줄무늬나 피트는 발견되지 않았지만, Fig. 7과 Fig. 8에서 고속일 경우 표면 거칠기가 급격히 증가하는 것은 줄무늬의 영향으로 추측되어 향후 두께를 증가시킨 시험편에 대한 절단면의 미세기구의 해석이 요망된다.

4.3 절단 속도변화에 대한 절단특성

Fig. 10은 Fig. 3의 결과를 절단속도에 대한 표면 거칠기로 도시한 것으로서 4.1절의 압력변화에 의한 절단표면 특성을 나타내며, 연마제의 침식으로 절단이 되기 때문에 압력변화에 대한 절단속도가 150 mm/min의 저속일 때는 저압에서, 350 mm/min의 고속일 때는 고압에서 양호한 절단표면을 얻을 수 있다. 절단압력 414 MPa를 제외한 동일 압력에서 절단속도가 증가할수록 표면은 거칠어지고, 절단속도 300 mm/min 일 때 절단압력 414 MPa에서 약간 거칠게 나타나고, 절단속도 150 mm/min에서 절단압력 379 MPa일 때 표면 거칠기가 매우 작은 정밀한 표면이 얻어진다.

그러나 생산성을 고려한 정밀한 절단 가공을 하려면 절단압력은 414 MPa에서 절단속도 350 mm/min으로 절단조건을 설정하는 것이 최적조건으로 판단된다.

이상의 결과에서 일반적으로 난삭재로 알려진 티타늄 합금을 AWJ로 절단할 경우 최적절단조건을 설정하면 표면 거칠기(Ra)는 3 μm 정도를 얻을 수 있다. 이러

한 표면 정밀도는 재료의 차이로 인해 직접적인 비교는 곤란하지만, 터빈 블레이드의 에어 포일 부위를 글래스 볼로 블라스팅한 경우와 같은 우수한 표면 정밀도를 얻을 수 있다. 따라서 타 절단법에 비하여 정밀한 절단표면이 얻어지므로 별도의 마무리 가공을 줄일 수 있고, 더욱 정밀한 표면 정밀도를 얻기 위해 연마를 필요로 하더라도 타 절단법에 비하여 연마시간 및 경비를 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

티타늄 합금 Gr2를 사용하여 주요 절단인자의 변화에 의한 AWJ 절단 실험을 통하여 절단 표면특성 및 절단 정밀도를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절단압력 310 MPa일 때 절단속도 150 mm/min, 절단압력 414 MPa에서 350 mm/min일 때 가장 양호한 표면이 얻어지고, 절단압력의 상승에 따라 절단속도도 증가시켜야 양호한 절단표면을 얻는다.

(2) 절단 두께 10 mm일 때 전압력 범위에서 정밀한 절단 표면을 얻으려면 절단속도를 150~250 mm/min으로 설정하는 것이 최적조건으로 판단된다.

(3) 절단압력 414 MPa를 제외한 동일 압력에서 절단속도가 증가할수록 표면은 거칠어지고, 절단속도 150 mm/min일 때 압력 379 MPa에서 가장 정밀한 절단 표면이 얻어진다.

(4) 생산성을 고려한 티타늄 합금 Gr2의 AWJ 절단은 절단압력 414 MPa에서 절단속도 350 mm/min으로 설정하는 것이 최적절단조건이다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

1. M. Hashish : A Model for Abrasive Water Jet Machining, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, **111** (1989), 154-162
2. M. Ramulu and K. P. Wong : Preliminary Investigation of Abrasive Water Piercing Process by Dynamic Photoelasticity, International Journal of Water Jet Technology, **1** (1991), 53-63
3. J. Zeng and T. J. Kim : Development of an Abrasive Water Jet Kerf Model for Brittle Materials, Jet Cutting Technology, Kluwer, Dordrecht, 1992, 483-501
4. J. Zeng and T. J. Kim : A Study of Brittle Erosion Mechanism Applied to Abrasive Waterjet Processes, Proceedings of the 10th International Symposium on

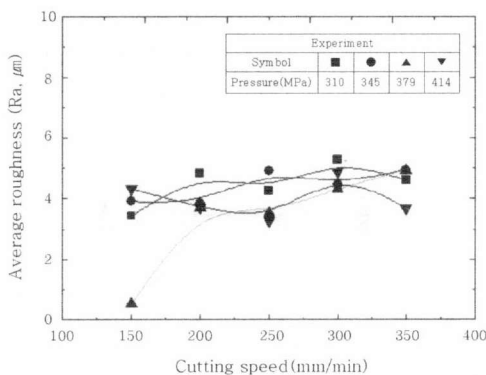


Fig. 10 Variation of surface roughness (Ra) as a function of the cutting pressure and cutting speed

- Jet Cutting Technology, England, 1990, Paper B1
5. D. Arola and M. Ramulu : Abrasive Water Jet Machining of Titanium Alloy, Proceedings of the 8th American Water Jet Conference, Houston, Texas, Paper No. 27 1995, 389-408
 6. G. Vikram and N. Ramesh Babu : Modeling and Simulation of Abrasive Waterjet Surface Topography, Proceedings of the 2001 WJTA American Water Jet Conference, Minneapolis, Minnesota, 2001, Paper No. 2
 7. L. Chen, E. Soares and W. C. K. Wong : Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Materials, Int. J. Machine Tools & Manufacture, **36** (1996), 1201-1206
 8. P. Gudimelta, J. Wang, and W. Wong : Kerf Formation Analysis in the Abrasive Waterjet Cutting of Industrial Ceramics, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 128, (2002), 123-129
 9. J. Wang and W. C. K. Wong : A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels, Int. J. Machine Tools & Manufacture, **39** (1999), 855-870
 10. J. Wang : A Machinability Study of Polymer Composites using Abrasive Waterjet Technology, Journal of Materials Processing Technology, **94** (1999), 30-35
 11. J. Wang and D. M. Guo : The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics, Journal of Materials Processing Technology, **133** (2003), 371-377
 12. A. I. Hassan, C. Chen and R. Kovacevic : On-line Monitoring of Depth of Cut in AWJ Cutting, Int. J. Machine Tools & Manufacture, **44** (2004), 595-605
 13. J. Zeng and T. J. Kim : An Erosion Model of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting, Wear, 193 (1996), 207-217