

연마제 워터 제트에 의한 퀴츠의 절단특성

정 남 용^{*1)} · 진 운 호²⁾

송실대학교 기계공학과¹⁾ · 송실대학교 대학원 기계공학과²⁾

Cutting Characteristics of Quartz by Abrasive Waterjet

Namyong Chung^{*1)} · YunHo Jin²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering Graduate School, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 8 October 2004 / Accepted 31 December 2004)

Abstract : Abrasive waterjet (AWJ) cutting is an emerging technology for precision cutting of difficult-to-machining materials with the distinct advantages of no thermal effect, high machinability, high flexibility and small cutting forces. This paper investigated theoretical and experimental cutting characteristics associated with abrasive waterjet cutting of quartz GE214. It is shown that the proper variations of several cutting parameters such as waterjet cutting pressure, cutting speed and cutting depth improve the roughness on workpiece surfaces produced by AWJ cutting. From the experimental results by AWJ cutting of quartz GE214, the optimal cutting conditions to improve the surface roughness and precision were proposed and discussed.

Key words : Abrasive waterjet(연마제 워터 제트), Cutting characteristics(절단특성), Cutting parameter(절단인자), Cutting quantity(절단량), Erosion(부식), Optimal cutting condition(최적 절단조건), Quartz(퀴츠), Surface precision(표면 정밀도), Surface roughness(표면 거칠기)

1. 서 론

고강도, 고경도 및 고기능성 신소재의 응용에 대한 사회적 욕구, 개발과 사용은 이들 재료를 효과적으로 가공하기 위한 새로운 방법의 출현을 동시에 요구한다. 최근 반도체 산업에서 웨이퍼 디스크 및 실리콘 정제 장치 등에 널리 사용되고 있는 퀴츠(quartz)는 고경도와 취성을 갖는 난삭재 중의 하나로서 기존의 가공방법으로는 생산성의 저하와 비용의 증가 등 많은 어려움이 있다. 현재 재료 절단가공에 있어 새로운 유망기술로 기대되는 연마제 워터 제트(abrasive waterjet; AWJ) 절단법은 그 사용이 날

로 증가하는 추세이다.

고압 AWJ 절단법은 Norman C. Franz (1968년)가 최초의 특허를 획득한 후 유리의 절단기술(1983년)에 상업적 시스템이 응용되었고, 오늘날의 워터 제트는 컴퓨터와 접목되어 고강도 및 고경도를 지닌 난삭의 균질재, 이종재료, 복합재료 및 이들에 의한 신소재의 가공에 유효하게 응용되고 있다. 또한, AWJ 절단기술은 현재 많이 사용되고 있는 기존의 레이저 절단(laser cutting), 플라스마 절단(plasma cutting) 및 화염절단(flame cutting) 등의 타 절단방법과 비교하여 가장 최근에 소개된 가공법으로서 성질이 서로 다른 각종 재료를 효과적으로 절단하기 위하여 연마제 입자를 첨가한 고속의 물을 사용하는 것이 특징이다. 물을 사용하기 때문에 AWJ 절단

^{*}To whom correspondence should be addressed.
nychung@hanmail.net

법은 기존의 절단법에 비하여 열 영향이 없고, 양호한 절단표면, 표면 피로성능의 향상, 고경도 및 두꺼운 재료의 절단, 신속한 절단과 동력소비가 적은 장점도 있다.

AWJ 절단에 대한 연구 동향으로는 Hashish,¹⁾ Ramulu 등²⁾의 스테인리스강을 사용한 절단 인자에 의한 표면 마무리, Blickwedel 등³⁾의 연구가 있지만 취성, 연성, 균질재, 또는 다상(multi-phase)의 서로 다른 재료에 대한 상이한 파괴기구를 고려하지 않았다. Zeng 등^{4,5)}의 취성재료에 대한 AWJ 절단공정에 대한 연구와 Arola 등⁶⁾에 의한 Ti 합금의 표면조직 및 미세구조의 연구가 있다. 또한, Vikram 등⁷⁾은 AWJ 절단에 대한 열 영향부(heat affected zone; HAZ)의 무시 가능성을 밝혔고, Gudimelta 등⁸⁾과 Wang 등⁹⁾은 세라믹스에 대한 절단성능을 연구하였고, Hassan 등¹⁰⁾은 절단 깊이의 온라인 모니터링에 대한 모델을 제안하였다.

이와 같이 AWJ 절단 기술에 대한 대부분의 연구는 장치, 응용성 및 운동학과 같은 절단 성능에 국한되어 있고, 절단 정밀도를 가공 공정에 적용한 연구는 보고 되지 않고 있기 때문에 AWJ 절단기술을 산업분야에 응용하기 위해서는 재료 특성 인자의 영향을 고려한 정밀 절단 방법에 대한 연구의 필요성이 시급히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 반도체 산업에 많이 응용되고 있는 쿼츠 GE214를 사용하여 AWJ 절단에 대한 이론과 표면 정밀도에 영향을 주는 인자를 검토하고 이들 인자의 변화에 따른 표면 정밀도 및 절단 특성을 파악하여 이 분야에 대한 자료의 축적은 물론, AWJ 절단에 대한 최적조건을 제시하고자 한다.

2. AWJ 절단 이론

AWJ 절단의 기본 특성은 신속한 냉각과 관련된 새로운 부식(erosion) 방법으로서 절단표면은 워터 제트가 재료에 침투하는 궤적으로 형성된다. 이 특수 궤적은 탄도학(ballistic theory)에 기초하고, 재료 절단은 Bitter의 부식이론에 근거하여 재료에 고속 침투하는 연마제 워터 제트에 의해 얻어진다.

AWJ 절단은 Fig. 1과 같이 연마제를 첨가한 물이 고압·고속으로 노즐을 통과한 후 재료를 부식시켜

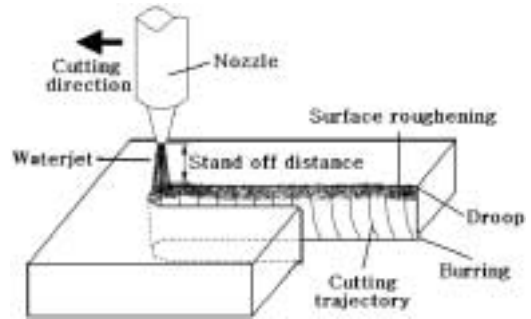
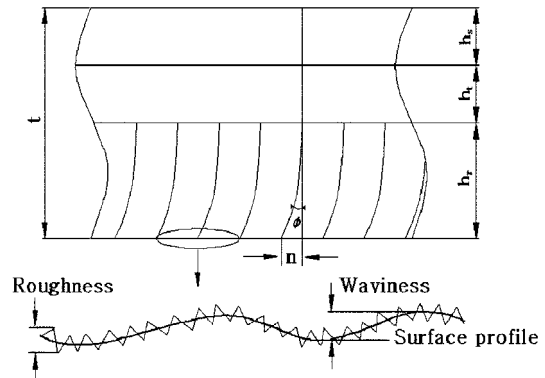


Fig. 1 Characteristics of cut surfaces produced by AWJ cutting



- t : Thickness of work piece
- h_s : Region of smooth
- h_t : Region of transition
- h_r : Region of roughness
- ϕ : Jet diversion
- n : Trailback

Fig. 2 A typical patterns on the inside walls by AWJ cutting

절단 제거된다.

절단 표면은 Fig. 2와 같은 궤적으로 형성되고, 3개의 영역으로 구분된다. 상부영역(h_s)은 절단 마모(cutting wear) 영역이고, 표면은 가장 매끈하며 줄무늬(striation)와 피트(pit)가 발생하지 않는다. 또한, 중간영역(h_t)은 줄무늬가 나타나기 시작하고 피트는 발견되지 않으며, 절단 마모 형태에서 변형 마모(deformation wear) 형태로 바뀌는 영역이다. 하부영역(h_r)은 피트가 존재하고 워터 제트가 위쪽으로 휘어져 큰 충격 각도에서 변형 마모에 의해 재료가 제거된다.

절단 마모 영역은 표면 거칠기에 관계되고, 변형

마모 영역은 파형(waviness)의 영향을 받으며 파형은 절단표면의 밑 부분에서 줄무늬로 나타난다. 절단표면의 거칠기는 AWJ 절단의 미시역학에 관계되고 연마제 입자의 크기가 중요한 인자이다. 파형은 절단공정의 거시역학에 관계되며, 절단 깊이와 유효 제트의 지름 감소는 파형에 밀접한 관계가 있다. 그리고 절단 출구에서 연마제의 충격 작용에 의해 버(burr)가 생성된다.

또한, AWJ에 의한 재료의 절단량은 응력파(stress wave)에 의한 균열망(crack network) 파괴로 제거되는 양과 소성유동에 의한 제거량의 합이 되고, 다음과 같은 방법으로 해석한다.

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.

$$W_c = 2A_c\gamma \quad (1)$$

여기서, $2A_c$ 는 균열망의 전표면적이고, γ 는 단위 면적의 균열 발생에 필요한 파괴 에너지이다. 균열망 모델은 재료의 결정립 크기 a 와 등가인 입방체 입자로 구성되어지고, 식 (1)은 다음 식과 같이 된다.

$$W_c = \frac{6\gamma V_c}{a} \quad (2)$$

여기서, V_c 는 균열망의 체적으로 파괴에 의한 절단량을 의미한다. W_c 는 응력파 에너지에 비례한다고 가정하면, V_c 는 다음 식으로 표시된다.

$$V_c = \frac{f_w a W}{6\gamma} \quad (3)$$

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

또한, 연마제 충격하중은 응력파의 형태로 단성영역으로 전달되고, 충격으로 방출되는 전응력파 에너지(W)는 수직 및 수평방향 힘에 의한 일의 합이며, 다음 식으로 근사된다.¹¹⁾

$$W = \frac{2\beta\sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{E} \quad (4)$$

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 각도이다. β 는 실험값이며, 시험편 재료의 푸아송비 ν 에 관계된다.

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 다음 식이 얻어진다.¹¹⁾

$$V_c = \frac{f_w \beta a \sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{3\gamma E} \quad (5)$$

2.2 소성유동에 의한 절단량

소성유동에 의한 절단량(V_p)은 연마제 입자가 파문하지 않는 경우만 고려하는 Finnie¹²⁾의 수정 모델을 사용하여 평가한다. 단일 충격에 의한 절단량은 다음 식과 같이 표시된다.

$$V_p = \frac{b v^2}{w^2} (\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha) + \frac{15\pi b v^3 \sin^3 \alpha}{4r_p w^3} \quad (6)$$

여기서, w 는 각속도, r_p 는 연마제 입자의 반지름을 나타낸다. 연마제 입자 절단면의 폭 $b = 0.1 r_p$ 에 대해서 식 (6)은 다음 식과 같이 표시된다.¹¹⁾

$$V_p = \frac{m v^2}{4\sigma_f} \left(\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha + 38.12 v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}} \right) \quad (7)$$

여기서, ρ_p 는 연마제 입자의 밀도이다.

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, 다음 식과 같이 표시된다.

$$V = V_c + V_p \quad (8)$$

식 (5)와 식 (7)을 식 (8)에 대입하면 단일 충격에 의한 전절단량은 다음 식과 같이 된다.¹¹⁾

$$V = \frac{f_w \beta a \sigma_f m v^2 \sin^2 \alpha}{3\gamma E} + \frac{m v^2}{4\sigma_f} (\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha + 38.12 v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}}) \quad (9)$$

2.4 AWJ 절단에 대한 부식율

AWJ 절단은 다중 충격 공정이므로 재료의 전절 단량은 입자의 상호충격과 응력파의 상호작용 때문에 각 입자 충격에 의한 재료 제거량의 단순 합과는 차이가 있다. 이들의 편차 때문에 재료특성과 AWJ의 영향인자에 대한 일정한 효율계수, C를 식 (9)에 합체시켜 각 입자에 의한 재료의 평균 제거량을 예측한다. C 값은 실험으로 구하고, 이론적 부식율, R은 다음 식과 같이 표시된다.¹¹⁾

$$R = \frac{C\rho V\dot{m}}{m} = C \left(\frac{f_w 3\sigma_f \rho \dot{m} v^2 \sin^2 \alpha}{3\gamma E} \right) + \frac{\rho \dot{m} v^2}{4\sigma_f} \cdot \left[\sin 2\alpha - 4\sin^2 \alpha + 38.12v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}} \right] \quad (10)$$

여기서 ρ 는 시험편 재료의 밀도, m 은 연마제 입자의 질량이고, \dot{m} 은 연마제 질량 유동률(abrasive mass flow rate)이다.

3. 실험

3.1 시험편 재료

시험편 재료는 반도체 산업 및 실리콘 정제 장치 등에 널리 응용되고 있는 퀴즈GE214를 사용하였다. 퀴즈GE214의 주성분은 SiO₂이고, 세라믹 재료와 비교하면 단일성분으로서 화학적으로 안정되고, 빛의 투과성, 내열성 및 전기절연성이 우수한 재료이다.

퀴즈의 물리적 특성은 유리와 거의 비슷하지만, 선팽창계수는 $5 \times 10^{-7} (cm/cm \cdot ^\circ C)$ 으로 타 재료에 비해서 매우 작으며, 도자기나 경질 유리의 1/6 정도이다. 또한, 퀴즈는 압축에 매우 강하고 압축강도는 1100 MPa 이상이지만, 인장강도는 표면 상태에 큰 영향을 받고 표면 상태가 양호한 용융 퀴즈의 인장강도는 48 MPa 이상이다. 그러나 퀴즈는 형태에 따라 다른 특성을 가지며, 본 실험에 사용된 GE214는 산업표준 공정급 투명 퀴즈로서 낮은 수산기와 엄격한 수치공차를 지니며, 뛰어난 외관 및 기계적 특성을 갖고 있다.

Table 1에 퀴즈GE214에 대한 화학적 조성을 나타내고, Table 2에는 물리적 및 기계적 특성을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of quartz GE214

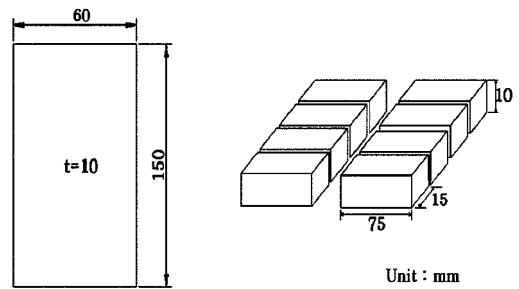
Element	Al	Ti	Zr	Na	K	Li
wt. %	14	1.1	0.8	0.7	0.6	0.6
Element	Ca	Fe	B	P	Mg	OH
wt. %	0.4	0.2	<0.2	<0.2	0.1	10

Table 2 Physical and mechanical properties of quartz GE214

Material properties	Values
Density (g/cm^3)	2.2
Hardness (<i>Mohs</i>)	6.0
Young's modulus (<i>GPa</i>)	72
Poisson's ratio	0.17

3.2 시험편의 제작

실험에 사용된 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다. 시험편의 제작은 우선 퀴즈GE214 판재를 폭 60 mm, 두께 10 mm, 길이 150 mm로 연삭 가공하여 세척하고, 완전히 건조 시킨 후에 청결을 유지하여 기계적 성질이 변하지 않도록 하였다. 가공된 소재는 CNC AWJ 절단기에 고정하고, CNC 프로그램을 이용하여 절단조건을 설정한 후 75 X 15 X 10 mm의 치수로 8개의 시험편을 절단 가공하였다. 각각의 절단조건은 프로그램으로 입력하여 조건의 변화에 따른 오차가 없도록 하였고, 이 결과를 모니터를 통하여 확인하였다.



(a) Before AWJ cutting (b) After AWJ cutting

Fig. 3 Shape and dimension of specimen

3.3 실험 장치 및 방법

Fig. 4는 본 실험에 사용된 CNC AWJ 절단 시스템(미국 FLOW 사제 모델 IFB3018)을 나타낸 것이다. AWJ 절단기는 고압펌프, 연마제 절단 헤드, 연마제 이송 시스템, 노즐 및 운전 시스템, 제어장치, 사용

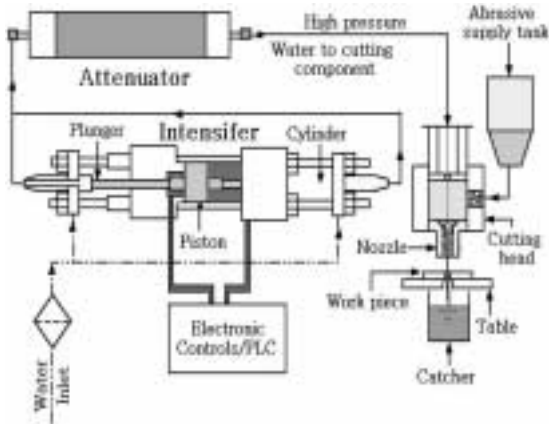


Fig. 4 Schematic diagram of abrasive water jet cutting system

연마제 수거장치 및 안정 탱크로 구성되어 있다.

고압의 물은 다이아몬드 오리피스를 통하여 절단 헤드의 혼합 챔버로 흘러 들어가게 하고, 연마제는 워터제트와 혼합되어 노즐을 통하여 AWJ 절단 부류를 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 207 MPa (30000 psi), 276 MPa (40000 psi), 345 MPa (50000psi), 414 MPa (60000psi)의 4단계로 변화시키고, 절단 속도는 각각 200, 300, 400, 600, 800, 1000 mm/min의 6단계로 변화시켰다. 재료는 지그

Table 3 Experimental conditions for AWJ cutting

Parameters	Unit	Range
Operating pressure (P)	MPa	207~414
Orifice diameter (d_w)	mm	0.33
Abrasive nozzle diameter (d_n)	mm	1.0
Abrasive nozzle length (ℓ_a)	mm	100
Cutting speed (v)	mm/min	200~1000
Cutting depth (h)	mm	2~8
Abrasive flow rate (m_a)	g/s	2.56
Stand off distance (S)	mm	3
Abrasive mesh No.(Garnet #)	—	80

를 사용하여 테이블에 고정시키고, 각 실험의 절단 조건의 설정은 CNC AWJ 시스템에서 사용하는 고유의 프로그램을 사용하여 제어하였다. 절단 가공된 시험편은 광학식 표면조도 측정기(Rodenstock사 제 모델 RM600-S)를 사용하여 각 시험편에 대한 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 따른 표면 정밀도

Fig. 5~Fig. 7은 절단 압력을 각각 207, 276, 345, 414 MPa로 변화시키고, 각 압력에 대한 절단속도가 200, 300, 400, 600, 800, 1000 mm/min일 때 절단표면에 대한 거칠기를 시험편의 절단 두께의 상부에서 부터 각각 2, 4, 6, 8 mm 떨어진 지점에 대해서 측정한 평균값을 나타낸 것이다. Fig. 5는 중심선평균 거칠기(R_a), Fig. 6은 10점평균 거칠기(R_z), Fig. 7은 최대높이(R_{max}) 거칠기로 나타낸 것이다.

Fig. 5에 나타난 중심선평균 거칠기(R_a)는 기준길이 내에서 중심선의 방향으로 측정된 거칠기 곡선의 요철과 그 중심선에 포함된 면적의 합을 측정 길이로 나눈 것으로서 중심선에 대한 산술 평균 편차

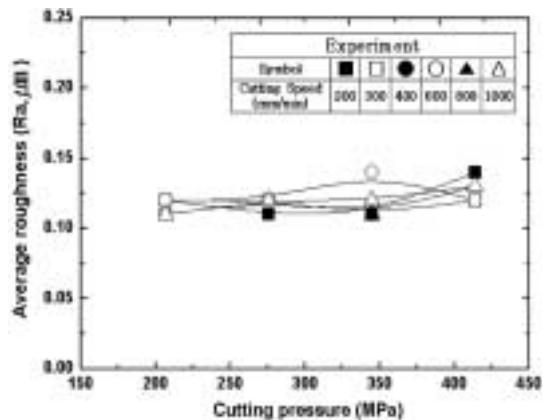


Fig. 5 Surface Roughness (R_a) on Variations of the Cutting Pressure and Cutting Speed

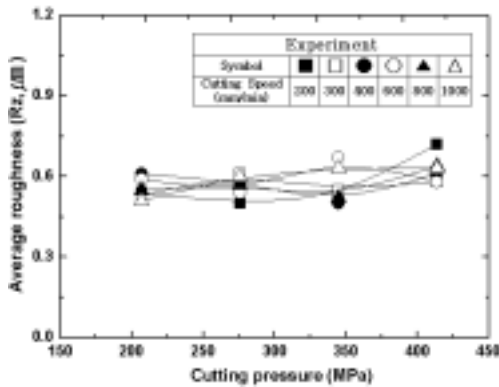


Fig. 6 Surface Roughness (Rz) on Variations of the Cutting Pressure and Cutting Speed

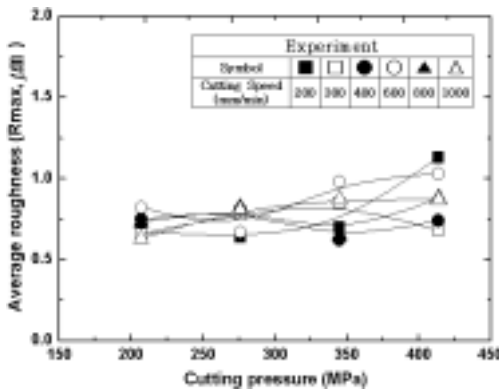


Fig. 7 Surface Roughness (Rmax) on Variations of the Cutting Pressure and Cutting Speed

에 상당한다. Ra는 요철이나 거칠기 곡선의 모양에 대한 정보를 포함하지 않는다. 그림에서 표면 거칠기(Ra)는 절단압력이 207~345 MPa에서 전범위의 절단속도에 대하여 편차가 적은 것으로 나타나지만, 절단압력이 345 MPa에서 절단속도가 600 mm/min일 때는 반대로 표면이 거칠어지는 경향을 보인다. 절단압력 414 MPa에서 절단속도에 대하여 Ra 값은 거의 같거나 약간 증가하지만, 절단속도가 200 mm/min일 경우 급격히 증가한다. 전압력 범위에서 절단속도가 1000 mm/min일 때 표면 거칠기가 가장 적은 편차로 양호한 표면 정밀도를 나타낸다. 따라서 생산성을 고려한 AWJ의 쿼츠 절단은 절단압력을 345~414 MPa, 절단속도는 800~1000 mm/min으로 할 때 가장 양호한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 최적조건으로 판단된다.

Fig. 6에 나타낸 10점평균 거칠기(Rz)는 단면곡선의 평균선에 평행하게 측정된 최고 값으로부터 5번째까지의 최고점과 골을 통과하는 평행선 사이의 거리를 측정하여 표시한 것이다. 특이점이 부품의 기능에 영향을 주지 않는 경우에 사용되고, 이때 절단 표면의 거칠기(Rz) Fig. 5와 동일한 경향으로 Ra보다 큰 값으로 편차가 크게 변화한다.

Fig. 7에 도시한 최대높이(Rmax) 거칠기는 단면곡선에서 기준 길이만큼 측정된 부분의 평균선에 평행한 두 직선으로 측정된 부분을 끼울 때 이 두 직선의 간격을 말한다. 최대 값에서 최소 값을 뺀 값으로 중심선을 결정하지 않고서도 측정할 수 있고, 표면 거칠기가 파상도 파라미터의 영향을 비교적 적게 받는다. 그림에 나타낸 표면 거칠기 Rmax는 절삭속도와 절단압력 변화에 대하여 동일한 경향으로 Ra 및 Rz보다 큰 값으로 편차가 크게 변화한다.

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

4.2 절단 깊이에 따른 표면 정밀도

Fig. 8은 절단압력 207 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기(Ra)를 나타낸 것으로, 상부 절단표면에서 아래쪽으로 내려 갈수록 표면 거칠기 값이 약간 증가하는 경향을 보인다. 그러나 절단 깊이 2 mm에서 표면 거칠기는 절단속도 200 mm/min일 때 보다 절단속도 1000 mm/min일 때 더욱 양호하고, 절단 깊이 4 mm에서는 400~600 mm/min일 때 가장 거칠고, 800 mm/min에서 가장 양호한 것으로 나타났다. 절단 깊이 6~8 mm에서는 절단속도 800 mm/min일 때를 제외하면 비교적 편차가 적고 양호한 표면 정밀도를 얻었고, 절단속도가 1000 mm/min일 때 전범위의 절단 깊이에서 편차가 가장 적은 양호한 표면 거칠기를 나타낸다.

Fig. 9는 절단압력이 276 MPa이고 절단속도의 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 절단 깊이 2 mm에서 표면 거칠기는 절단속도가 600 mm/min일 때 가장 거칠고, 1000 mm/min일 때 가장 양호하고, 절단 깊이 4~8 mm에서는 적은 편

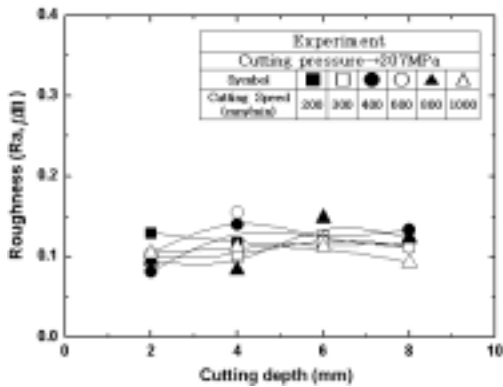


Fig. 8 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 207 MPa

차 범위에서 거의 일정한 값으로 양호한 표면 정밀도를 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력 207~276 MPa일 때 절단 깊이 4 mm에서 연마제가 시험편의 표면에 부딪히는 충격으로 거칠기가 증가하는 현상이 발생하는 것으로 판단되며, 실제 시험편의 성분에는 소량의 연마제가 검출되었다.

또한, 절단속도 변화에 의한 절단 깊이에 따른 거칠기는 절단 깊이 4~6 mm에서 약간의 돌출된 데이터가 있지만 대체적으로 거의 일정한 값을 나타내므로 절단 두께 10 mm 이내의 재료는 절단 깊이가 증가하더라도 표면 정밀도는 거의 변화하지 않는다.

Fig. 10은 절단압력이 345 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸

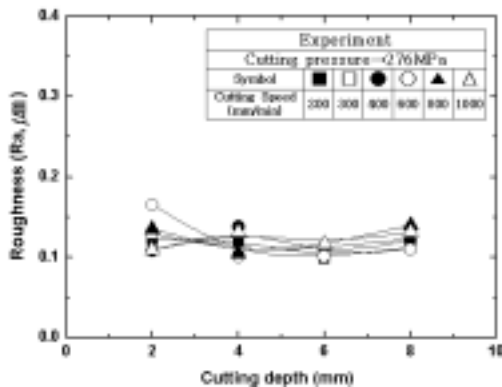


Fig. 9 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 276 MPa

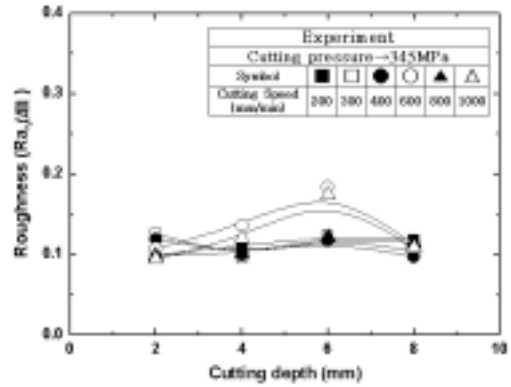


Fig. 10 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 345 MPa

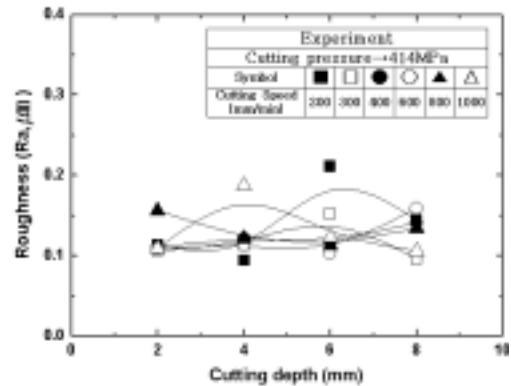


Fig. 11 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 414 MPa

것이다. 절단 깊이 2 mm에서 표면 거칠기는 작지만, 4~6 mm에서는 절단속도 600 mm/min와 1000 mm/min일 때 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 절단 깊이 8 mm에서는 오히려 편차가 적고 거칠기가 가장 양호하게 나타났다. 따라서 절단 깊이에 대한 표면 거칠기는 절단압력 345 MPa에서 절단속도 400 mm/min와 800 mm/min일 때 표면 거칠기의 편차가 적은 양호한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 최적조건으로 판단된다.

Fig. 11은 절단압력이 414 MPa일 때 절단속 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 절단속도 변화에 따른 표면 거칠기의 편차가 매우 크며, 특히 절단 깊이 2 mm에서 절단속도 800

mm/min, 4 mm에서 1000 mm/min, 6 mm에서 200~300 mm/min일 때 표면 거칠기의 편차가 크고 표면도 거칠게 되었다. 따라서 이러한 절단속도를 제외한 속도와 절단 깊이 8 mm에서 절단속도 300 mm/min와 1000 mm/min일 때 표면 정밀도는 매우 양호한 것으로 나타났다. 그러므로 절단압력이 414 MPa로 일정할 때 절단 깊이에 대한 표면 정밀도는 절단속도를 적절히 설정하여 표면 거칠기의 편차가 적은 양호한 표면을 얻는다.

또한, 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력이 207~276 MPa일 때 2 mm, 345~414 MPa일 때 4~6 mm에서 절단 속도에 따라 표면이 거칠어지는 현상이 나타나고, 이러한 현상은 연마제의 고압·고속 분사로 인한 절단 표면의 충격에 의한 영향으로 판단된다. 그리고 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력이 207~276 MPa일 때 전범위의 속도에서 거의 일정한 값을 나타낸다. 또한, 전범위의 절단압력 및 속도에서 절단 깊이 2 mm와 8 mm에서 표면 거칠기의 편차가 적고 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 특히 절단 깊이 8 mm에서는 절단속도를 1000 mm/min의 고속으로 하는 것이 더욱 더욱 편차가 적은 양호한 표면을 얻는다.

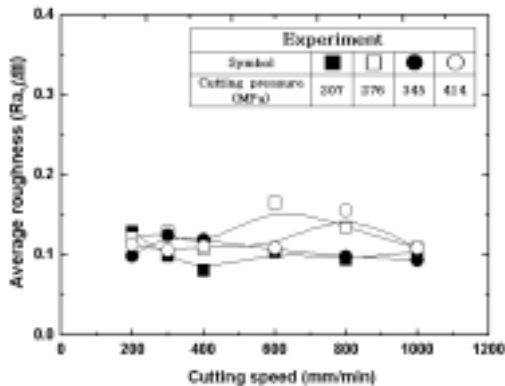


Fig. 12 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Pressure

4.3 절단속도에 따른 표면 정밀도

Fig. 12는 절단속도와 절단압력의 변화에 따른 표면 거칠기를 절단압력에 대하여 나타낸 것이다. 절단속도가 증가할수록 표면 거칠기는 더욱 양호하지만, 절단속도 600 mm/min일 때 절단 압력 276 MPa,

800 mm/min에서 414 MPa의 경우에 표면 거칠기는 매우 크게 나타난다. 또한, 절단속도에 따른 절단압력에 의한 표면 거칠기는 압력에 의한 의존성보다는 절단속도의 영향이 크므로 절단속도 200 mm/min와 1000 mm/min에서 표면 거칠기는 전압력 범위에서 편차가 적고 양호한 표면 정밀도가 얻어지는 것을 알 수 있다.

5. 결론

퀴츠 GE214를 사용하여 절단 인자의 변화에 의한 AWJ 절단 실험을 통하여 표면 정밀도 및 절단 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 절단면의 표면 거칠기는 Ra, Rz 및 Rmax의 어느 경우에서도 절단압력이 207~345 MPa에서 압력이 클수록 양호하고, 전범위의 압력에서 절단속도가 1000 mm/min일 때 표면 거칠기는 적은 편차로 가장 양호한 표면 정밀도를 나타낸다.
- 2) 절단 압력 345 MPa에서 전범위의 절단 깊이를 고려하면 절단속도 400 mm/min와 800 mm/min일 때 표면 거칠기의 편차가 적은 양호한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 최적조건이다.
- 3) 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 연마제의 고압·고속 분사로 인한 절단 표면의 충격에 의한 영향으로 표면이 거칠어지는 현상이 나타난다.
- 4) 절단속도 및 절단압력 변화에 따른 표면 거칠기는 압력에 의한 의존성보다는 절단 속도의 영향을 크게 받기 때문에 전압력 범위에서 절단속도가 200 mm/min와 1000 mm/min일 때 표면 거칠기는 편차가 적고 양호한 표면 정밀도가 얻어진다.
- 5) 생산성을 고려한 AWJ에 의한 퀴츠 절단은 절단 압력 345~414 MPa, 절단속도 800~1000 mm/min일 때 가장 양호한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 최적조건이다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- 1) M. Hashish, "A Model for Abrasive Waterjet

- Machining,” ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.111, pp.154-162, 1989.
- 2) M. Ramulu and K. P. Wong, “Preliminary Investigation of Abrasive Water Piercing Process by Dynamic Photoelasticity,” International Journal of Water Jet Technology, Vol.1, pp.53-63, 1991.
 - 3) H. Blickwedel and N. S. Guo, H. Haferkamp and H. Louis, “Prediction of Abrasive Jet Cutting Performance and Quality,” Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp.163-179, BHRA, England, 1990.
 - 4) J. Zeng, and T. J. Kim, “Development of an Abrasive Waterjet Kerf Model for Brittle Materials,” Jet Cutting Technology, pp.483-501, Kluwer, Dordrecht, 1992.
 - 5) J. Zeng and T. J. Kim, “A Study of Brittle Erosion Mechanism Applied to Abrasive Waterjet Processes,” Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology, Paper B1, BHRA, England, 1990.
 - 6) D. Arola and M. Ramulu, “Abrasive Waterjet Machining of Titanium Alloy,” Proceedings of the 8th American Water Jet Conference, Paper No.27, pp.389-408, Houston, Texas, 1995.
 - 7) G. Vikram and N. Ramesh Babu, “Modeling and Simulation of Abrasive Waterjet Surface Topography,” Proceedings of the 2001 WJTA American Water Jet Conference, Paper No.2, Minneapolis, Minnesota, 2001.
 - 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, pp.123-129, 2002.
 - 9) J. Wang and D. M. Guo, “The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.133, pp.371-377, 2003.
 - 10) A. I. Hassan, C. Chen and R. Kovacevic, “On-line Monitoring of Depth of Cut in AWJ Cutting,” Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol.44, pp.595-605, 2004.
 - 11) J. Zeng and T. J. Kim, “An Erosion Model of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting,” Wear, Vol.193, pp.207-217, 1996.
 - 12) I. Finnie and D. H. McFadden, “On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Materials by Solid Particles at low Angles of Incidence,” Wear, Vol.48, pp.181-190, 1978.