

연마제 워터 제트에 의한 퀴츠의 절단특성

진윤호[†], 정남용^{*}, 김경훈^{**}

Cutting Characteristics of Quartz by Abrasive Waterjet

Yun-Ho Jin, Nam-Yong Chung and Kyung-Hoon Kim

Key Words: Abrasive Waterjet(연마제 워터 제트), Cutting Characteristics(절단 특성), Cutting Parameter(절단인자), Erosion(부식), Optimal Cutting Condition(최적 절단조건), Quartz(퀴츠), Surface Precision(표면 정밀도), Surface Roughness(표면 거칠기)

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 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 were proposed and discussed.

1. 서 론

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 워터제트(abrasive waterjet; AWJ) 절단법은 그 사용이 날로 증가하는 추세이다.

고압 AWJ 절단법은 고강도 및 고경도를 지닌 난삭의 균질재, 이종재료, 복합재료 및 이들 신소재의 가공에 유효하게 응용되고 있다. 또한, AWJ

절단기술은 현재 많이 사용되고 있는 기존의 레이저 절단(laser cutting) 및 플라즈마 절단(plasma cutting) 등과 비교하여 가장 최근에 소개된 가공법으로서 각종 재료를 효과적으로 절단하기 위하여 연마제 입자를 첨가한 고속의 물을 사용하는 것이 특징이다. 물을 사용하기 때문에 AWJ 절단법은 기존의 절단법에 비하여 열 영향이 없고, 양호한 절단표면, 표면 피로성능의 향상, 고경도 및 두꺼운 재료의 절단, 신속한 절단 등의 장점도 있다.

AWJ 절단에 대한 연구로는 Hashish⁽¹⁾, Ramulu 등⁽²⁾, Blickwedel 등⁽³⁾의 연구와 Zeng 등^(4,5), Gudimelta 등⁽⁶⁾과 Wang 등⁽⁷⁾의 연구가 있지만, 이들 연구의 대부분은 AWJ에 의한 절단 성능에 국한되어 있고, 절단 정밀도를 가공 공정에 적용한 연구는 보고 되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 퀴츠 GE214를 사용하여 AWJ 절단 이론과 표면 정밀도에 영향을 주는 인자를 검토하고, 이들 인자의 변화에 따른 표면

[†] 숭실대학교 대학원 기계공학과 (청주기능대학)

E-mail : yhj@kopo.or.kr

TEL : (043)279-7412 FAX : (043)279-7464

* 숭실대학교 기계공학과

** 숭실대학교 대학원 기계공학과

정밀도 및 절단특성을 파악하여 이 분야의 자료 축적은 물론, AWJ 절단에 대한 최적조건을 제시하고자 한다.

2. AWJ 절단 이론

AWJ 절단의 기본 특성은 신속한 냉각과 관련된 새로운 부식(erosion) 방법이라 할 수 있고, 절단면은 워터 제트가 재료에 침투하는 궤적으로 생성된다. 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 절단하고, 절단된 표면은 그림과 같은 궤적이 형성된다. 또한, AWJ에 의한 재료의 절단량은 응력파에 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 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.

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

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

또한, 연마제 충격하중은 응력파의 형태로 탄성영역으로 전달되고, 충격으로 방출되는 전응력

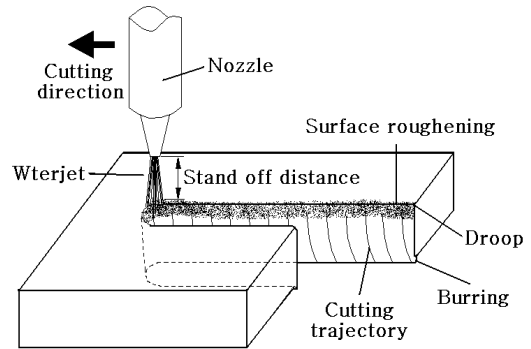


Fig. 1 Characteristics of cut surfaces produced by AWJ cutting

파 에너지(W)는 수직 및 수평방향 힘에 의한 일의 합이며, 다음 식으로 근사된다.

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

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 충격각도이고, β 는 실험 값이다.

식(3)을 식(2)에 대입하면 다음 식이 얻어진다⁽⁸⁾.

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

2.2 소성유동에 의한 절단량

소성유동에 의한 절단량(V_p)은 연마제 입자가 파묻히지 않는 경우만을 고려하는 Finnie의 수정 모델을 사용하여 평가하고, 단일 충격에 의한 절단량은 다음 식과 같이 표시된다.

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

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 합이 된다. 식(4)와 식(5)에서 단일 충격에 의한 전절단량은 다음 식과 같이 된다⁽⁸⁾.

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

2.4 AWJ 절단에 대한 부식율

AWJ 절단은 다중 충격 공정이므로 재료의 전 절단량은 입자 충격과 응력과의 작용 때문에 각 입자 충격에 의한 제거량은 일정한 효율계수, C 를 식(6)에 합체시켜 각 입자의 평균 제거량을 예측한다. C 는 실험 값이며, 이론적 부식율, R 은 다음 식과 같이 표시된다⁽⁸⁾.

$$R = \frac{C \rho V \dot{m}}{m} = C \left[\left(\frac{f_w \beta \alpha \sigma_f \rho m v^2 \sin^2 \alpha}{3 \gamma E} \right) + \frac{\rho m v^2}{4 \sigma_f} \cdot \left(\sin 2\alpha - 4 \sin^2 \alpha + 38.12 v \sin^3 \alpha \sqrt{\frac{\rho_p}{\sigma_f}} \right) \right] \quad (7)$$

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 퀴츠 GE214를 사용하였다. Table 1에 퀴츠 GE214의 물리적 및 기계적 특성을 나타낸다.

3.2 시험편의 제작

본 실험에 사용된 시험편의 제작은 우선 퀴츠 GE214 판재를 폭 60 mm, 두께 10 mm, 길이 150 mm로 연삭 가공하여 세척하고, 완전히 건조시킨 후 CNC AWJ 절단기에 완전히 고정하고, CNC 프로그램을 이용하여 절단조건을 설정한 후 75X15X10 mm의 치수로 8개의 시험편을 절단 가공하였다. 각각의 절단조건을 프로그램으로 입력하여 절단조건에 따른 오차가 없도록 하였고, 이 결과를 모니터를 통하여 확인하였다.

3.3 실험방법

Fig. 2는 본 실험에 사용된 AWJ 절단 시스템

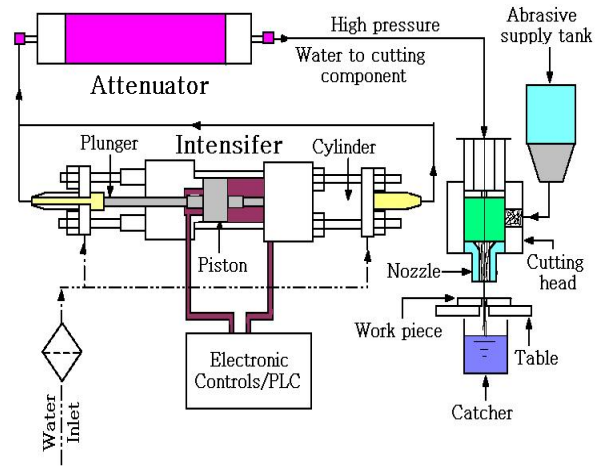


Fig. 2 Schematic diagram of abrasive water jet cutting system

Table 1 Physical and mechanical properties of quartz GE214

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

(미국 FLOW사제 모델 IFB3018)을 나타낸 것이다. 연마제는 Garnet #80을 사용하고, 노즐의 지름은 $\phi 1.0$ mm이며, 재료와 노즐과의 거리(stand off distance)는 3 mm로 설정하였다.

AWJ 절단실험에 사용된 각 절단 압력은 207, 276, 345, 414 MPa의 4 단계로 변화시키고, 절단 속도는 각각 200, 300, 400, 600, 800, 1000 mm/min의 6 단계로 변화시켰다. 재료는 지그를 사용하여 테이블에 고정시키고, 각 실험의 절단 조건의 설정은 CNC AWJ 시스템에서 고유의 프로그램을 사용하여 제어하였다. 절단 가공된 시험편은 광학 표면조도 측정기(Rodenstock사제 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 평균값으로 나타내었다.

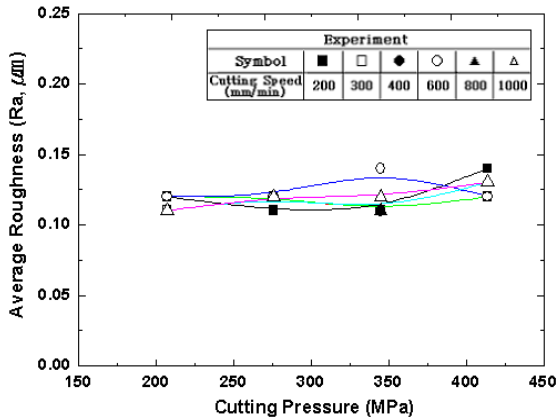


Fig. 3 Surface Roughness (Ra) on Variations of the Cutting Pressure and Cutting Speed

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 압력 변화에 따른 표면 정밀도

Fig. 3은 절단 압력을 각각 207, 276, 345, 414 MPa로 변화시키고, 각 압력에 대한 절단속도가 200, 300, 400, 600, 800, 1000 mm/min일 때 절단 표면에 대한 거칠기를 시험편의 절단 방향에 따라 각각 2, 4, 6, 8 mm 지점에 대해서 측정된 평균값을 중심선 거칠기(Ra)로 나타낸 것이다.

Fig. 3에서 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 AWJ에 의한 쿼츠 절단은 절단압력을 345~414 MPa, 절단속도는 800~1000 mm/min으로 할 때 가장 양호한 표면 정밀도가 얻어지는 최적조건으로 판단된다.

4.2 절단 깊이에 따른 표면 정밀도

Fig. 4는 절단압력 207 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것으로, 상부 절단표면에서 아래쪽으로 내려갈수록 표면 거칠기 값이 약간 증가하는 경향을 보인다. 그러나 절단 깊이 2 mm에서 표면 거칠

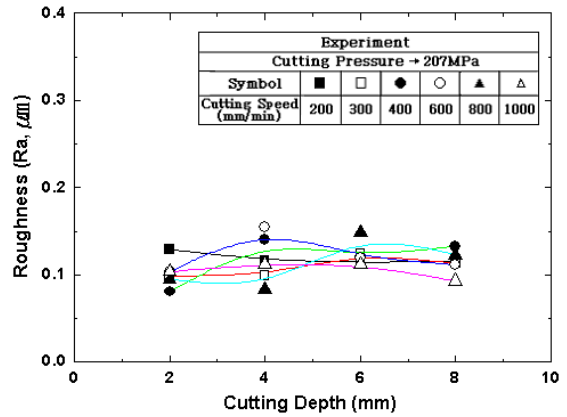


Fig. 4 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 207 MPa

기는 절단속도 200 mm/min일 때 보다 1000 mm/min일 때 더욱 양호하고, 절단 깊이 4 mm에서는 절단속도 400~600 mm/min일 때 가장 거칠고, 800 mm/min에서 가장 양호하다. 절단 깊이 6~8 mm에서는 절단속도 800 mm/min일 때를 제외하면 비교적 편차가 적고 양호한 표면 정밀도가 얻어지고, 절단속도가 1000 mm/min일 때 전범위의 절단 깊이에서 편차가 가장 적은 양호한 표면 정밀도를 나타낸다. 그림에서 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력 207 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. 5는 절단압력이 345 MPa일 때 절단속도 변화에 따른 절단 깊이에 대한 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 절단 깊이 2 mm에서 표면 거칠기는 작지만, 4~6 mm에서는 절단 속도 600 mm/min와 1000 mm/min일 때 큰 폭으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 절단 깊이 8 mm에서는 오히려 편차가 적고 표면이 가장 양호하다. 따라서 절단 깊이에 대한 표면 거칠기는 절단압력 345 MPa에서 절단속도 400 mm/min와 800

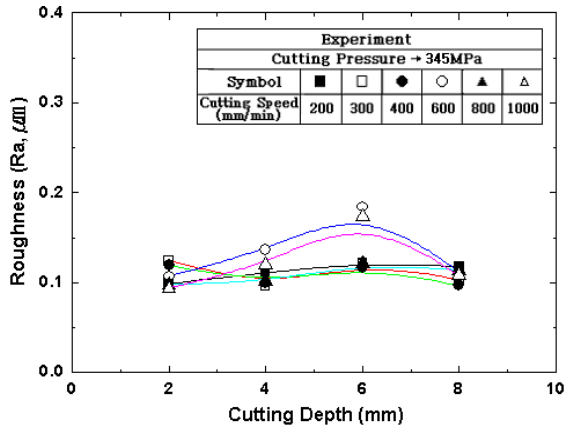


Fig. 5 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 345 MPa

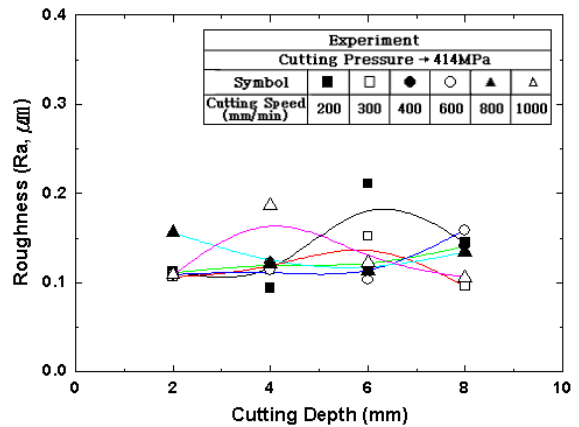


Fig. 6 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Depth at Cutting Pressure of 414 MPa

mm/min일 때 표면 거칠기의 편차가 적은 양호한 표면 정밀도가 얻어지는 최적조건으로 판단된다.

Fig. 6은 절단압력이 414 MPa일 때 절단속도 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 나타났다. 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 얻을 수 있다.

또한, 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단압력이 207~276 MPa일 2 mm, 345~414 MPa일 때 4~6 mm에서 절단속도에 따라 표면이 거칠어지는 현상이 나타나고, 이러한 현상은 연마제의 분사로 인한 절단 표면의 충격에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 전범위의 절단압력 및 속도에서 거의 일정한 값을 나타내고, 절단압력과 속도가 클 때 더욱 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 그리고 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력이 207~276 MPa일 때 전범위의 속도에서 거의 일정한 값을 나타낸다. 또한, 전범위의 절단압력 및 속도에서 절단 깊이가 2 mm와 8 mm에서 표면 거칠기의 편차가

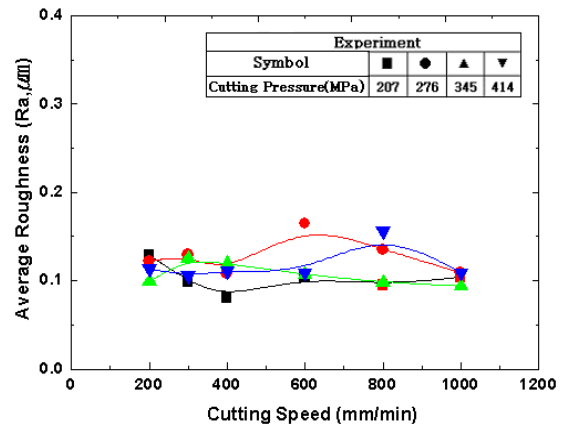


Fig. 7 Surface Roughness on Variations of the Cutting Speed and Cutting Pressure

적고 정밀한 표면을 얻을 수 있다. 특히, 절단 깊이가 8 mm에서는 절단속도를 1000 mm/min의 고속으로 하는 것이 편차가 더욱 적은 양호한 표면을 얻을 수 있다.

4.3 절단속도에 따른 표면 정밀도

Fig. 7은 절단속도와 절단압력의 변화에 따른 표면 거칠기를 절단압력에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 절단 속도가 증가할수록 표면 거칠기는 더욱 양호하게 되지만, 절단속도가 600 mm/min일 때 절단 압력은 276 MPa, 800 mm/min에서 414 MPa의 경우에 표면 거칠기는 매우 크게 나타난다. 또한, 절단속도에 따른 절단압력에 의한 표면 거칠기는 압력에 의한 의존성보다는 절단속도의 영향을 크게 받기 때문에 절단속도

200 mm/min와 1000 mm/min에서 표면 거칠기는 전압력 범위에서 편차가 적고 양호한 표면 정밀도가 얻어진다.

5. 결론

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

- 1) 표면 거칠기는 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/min 일 때 표면 거칠기의 편차가 적은 양호한 표면 정밀도를 얻을 수 있는 최적조건이다.
- 3) 절단 깊이에 따른 표면 거칠기는 절단 압력이 207~276 MPa일 때 4 mm, 345~414 MPa일 때 4~6 mm에서 표면이 거칠어지는 현상이 나타나고, 이러한 현상은 연마제의 고압·고속 분사로 인한 절단 표면의 충격에 의한 영향으로 판단된다.
- 4) 절단속도 및 절단압력의 변화에 따른 표면 거칠기는 압력에 의한 의존성보다는 절단속도의 영향이 크기 때문에 전압력 범위에서 절단속도가 200 mm/min와 1000 mm/min일 때 표면 거칠기는 편차가 적고 양호한 표면 정밀도가 얻어진다.
- 5) 생산성을 고려한 AWJ 퀴츠 절단은 절단압력 345~414 MPa, 절단속도 800~1000 mm/min 일 때 가장 양호한 표면 정밀도가 얻어지는 최적조건이다.

참고문헌

- (1) Hashish, M., 1989, "A Model for Abrasive Waterjet Machining," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111, pp. 154~162.
- (2) Ramulu, M., and Wong, K. P., 1991, "Preliminary Investigation of Abrasive Water Piercing Process by Dynamic Photoelasticity," International Journal of Water Jet Technology, Vol. 1, pp. 53~63.
- (3) Blickwedel, H., Guo, N. S., Haferkamp, H. and Louis, H., 1990, "Prediction of Abrasive Jet Cutting Performance and Quality," Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp. 163~179, BHRA, England.
- (4) Zeng, J., and Kim, T. J., 1992, "Development of an Abrasive Waterjet Kerf Model for Brittle Materials," Jet Cutting Technology, pp. 483~501, Kluwer Academic Publishers, Hingham.
- (5) Zeng, J., and Kim, T. J., 1990, "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.
- (6) Gudimelta, P., Wang, J., and Wong, W., 2002, "Kerf Formation Analysis in the Abrasive Waterjet Cutting of Industrial Ceramics," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 128, pp. 123~129.
- (7) Wang, J. and Guo, D. M., 2003, "The Cutting Performance in Multipass abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 133, pp. 371~377.
- (8) Zeng, J., and Kim, T. J., 1996, "An Erosion Model of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting," Wear, Vol. 193, pp. 207~217.