

〈論 文〉

어브레이시브 워터제트를 이용한 알루미나 세라믹스의 가공

최기상* · 최기흥** · 김정수***

(1994년 2월 25일 접수)

Abrasive Water Jet Machining of Alumina Ceramics

Gi Sang Choi, Gi Heung Choi and Jung Soo Kim

Key Words : Abrasive Water Jet Machining(어브레이시브 워터제트 가공), Alumina Ceramics (알루미나 세라믹스), Acoustic Emission(어코스틱 에미션)

Abstract

In this paper, a model of material removal in abrasive water jet machining of brittle material is developed, and experimentally evaluated. Abrasive water jet machining proved to yield better material removal rate than other machining techniques for hard and brittle material (alumina ceramics). It was also found that large scale fracture may develop at the exit of the jet from the material. The fracture size was predicted as a function of water jet pressure and size of the hole. Finally, the feasibility of using acoustic emission signals for in-process monitoring of the abrasive water jet machining process is investigated.

기 호 설 명

A : 재료표면 ($y=0$) 아래의 연마입자 단면적
 A_p : 가공된 구멍의 면적
 a : 가공된 구멍의 반경
 D : 강성도
 E : 영계수
 G_c : 임계 변형에너지 방출률
 H : 경도
 I_a : 연마입자의 질량관성모멘트
 K_c : 파괴인성
 k : 연마입자에 작용하는 평행력과 법선력의 비
 l : 측면균열의 확장폭
 $M_{\theta\theta}$: θ 방향의 굽힘모멘트
 m_a : 연마입자의 질량
 P : 법선방향의 압입력
 p_0 : 워터제트의 압력
 r : 연마입자의 무게중심에서 선단까지의 거리

t : 측면균열의 두께
 t_c : 절삭이 일어나는 총시간
 U : 스트레인에너지
 U_m : 굽힘모멘트에 의한 스트레인에너지
 V : 절삭량(체적)
 v : 연마입자의 속도
 z : 처짐
 α : 연마입자의 입사각
 Λ : 인덴터의 기하학적 지수
 γ : 비례상수
 σ : 항복응력
 ν : 푸아송비
 ψ : 인덴터 특성각의 $\frac{1}{2}$
 ω_θ : θ 방향으로의 회전각

1. 서 론

어브레이시브 워터제트 가공은 다른 가공방법들에 비해 속도가 빠르며, 채터와 열을 발생시키지

*정회원, 서울시립대학교 제어계측공학과

**고등기술연구원

***금성산전연구소

않고, 가공물에 가해지는 응력도 작으며, 가공물의 재질에 의한 영향이 적으며, 노즐이 쉽사리 로봇 매니플레이터에 장착될 수 있어 자동화가 용이하다. 한편 비교적 큰 소음을 내고, 작업환경이 지저분해지기 쉽다는 문제점도 있다. 그러나 최근에는 이러한 문제점들에도 불구하고 어브레이시브 워터제트 가공의 응용범위가 넓어져서 광산이나 건설현장에서 뿐 아니라 항공이나 조선산업에서 재료의 가공에 이용되기에 이르렀다.

어브레이시브 워터제트는 연마입자를 고속의 워터제트로 가속하므로써 형성되며, 이 고속의 연마입자들이 재료에 충격을 가해서 절삭이 일어나게 된다. Finnie⁽¹⁾는 실험을 통하여 충돌각도에 따른 절삭량이 연성재료와 취성재료에 경우에 Fig. 1에서와 같이 상이하게 나타난다고 보고하였고, Hashish⁽²⁾도 연성재료의 경우 연마입자가 작은 각도(15°에서 20°)로 충격을 가할 때 절삭량이 커지고 취성재료의 경우 연마입자가 수직으로 재료에 충격을 가할 때 절삭량이 최대가 됨을 보였다. 이는 연성재료와 취성재료의 절삭메카니즘이 다름을 암시한다. 즉, 연성재료의 경우 연마입자가 재료면을 끌어 나가면서 절삭이 일어나고 취성재료의 경우 균열의 형성과 전파 및 상호작용에 의해 재료가 떨어져 나가게 된다. 본 연구에서는 어브레이시브 워터제트에 의한 취성재료 절삭의 모델을 개발하고, 이 모델을 알루미늄이나 세라믹스 가공에서의 실험 데이터와 비교한다. 또 p_0 와 A_p 가 각각 워터제트의 압력과 가공된 구멍의 단면적일 때 워터제트의 공작물을 관통할 때 생기는 취성파괴의 크기가 $p_0^{1/3}A_p^{2/3}$ 에 비례함을 보인다. 마지막으로 AE가 어

브레이시브 워터제트 가공의 감시에 효과적으로 이용될 수 있음을 보인다.

2. 취성재료의 어브레이시브 워터제트 가공에서의 재료제거

어브레이시브 워터제트 가공에서 연성재료의 거동에 관한 모델은 Benchaita, et al.,⁽³⁾ Hashish et al.^(2,4,5)와 Finnie⁽⁶⁾ 등에 의해 제안된 바 있다. Fig. 2에서처럼 절삭작용을 하는 연마입자와 재료간의 상호작용을 결정하기 위해서는 입자에 작용하는 힘들을 알아야 한다. 연속 직각절삭(continuous orthogonal cutting)과 비슷한 Finnie⁽⁴⁾의 모델에 의하면 이 힘들은 연마입자의 재료로의 침투깊이에 비례한다. 그러나 연마입자가 충격을 가할 때 취성재료의 거동은 연속 직각절삭보다는 압입(indentation)이나 긁기경도테스트(scratch hardness test)와 비슷하다고 할 것이다.⁽⁷⁾ 압입경도테스트에서 압입하중은 손상깊이의 제곱에 비례하며, 긁기경도테스트에서는 수직하중이 수평하중에 비례하는 것으로 알려져 있다.^(8,9) 따라서 입자에 작용하는 법선력과 평행력은 입자가 재료에 미치는 손상깊이의 제곱에 비례한다고 가정할 수 있다. Fig. 2에서와 같이 연마입자의 선단이 재료를 처음으로 건드리는 점을 좌표의 원점으로 하면 m_a , I_a , r , k 가 각각 질량, 관성모멘트, 연마입자의 선단에서 무게중심까지의 거리, 그리고 연마입자에 미치는 평행력과 법선력의 비일 때 연마입자의 운동방정식은 다음과 같이 나타내진다.⁽³⁾

$$\begin{aligned} m_a \ddot{y} + \pi \Lambda H y^2 \tan^2 \psi &= 0 \\ m_a \ddot{x} + k \pi \Lambda H y^2 \tan^2 \psi &= 0 \\ I_a \ddot{\phi} + r k \pi \Lambda H y^2 \tan^2 \psi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 연마입자의 재료로의 압입깊이는 r 에 비해서 작으며, 수직력에 의한 모멘트를 무시할 수 있다고 가정한다면 식(1)의 첫번째 식과 초기조건

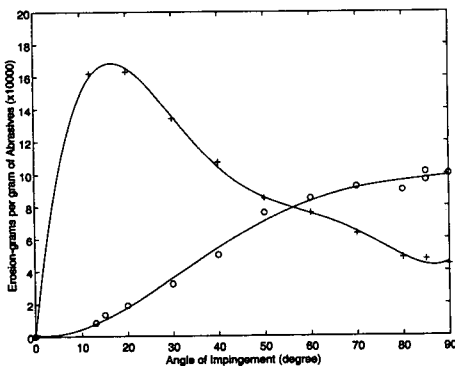


Fig. 1 Erosion characteristics of ductile and brittle materials⁽⁵⁾

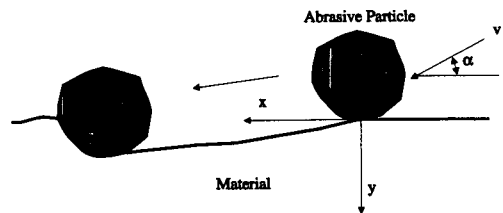


Fig. 2 Model of abrasive striking and material removal⁽⁶⁾

$\dot{y}(t=0) = v \sin \alpha$ 로부터

$$\dot{y} = \pm \left(v^2 \sin^2 \alpha - \frac{2}{3} \frac{\pi \Lambda H \tan^2 \psi}{m_a} y^3 \right)^{1/2} \quad (2)$$

이고 입자가 가장 깊이들어 갔을 때 $\dot{y}=0$ 이므로 최고 압입깊이는

$$y_{\max} = 0.7816 \frac{m_a^{1/3} v^{2/3} \sin^{2/3} \alpha}{\Lambda^{1/3} H^{1/3} \tan^{2/3} \psi} \quad (3)$$

와 같이 예측될 수 있으며 연마입자에 작용하는 법선력이 압입깊이의 제곱에 비례하므로 연마입자와 재료간의 최대 법선력은

$$p_{\max} = \pi \Lambda H y_{\max}^2 \tan \psi \\ \propto \Lambda^{1/3} H^{1/3} m_a^{2/3} v^{4/3} \tan^{2/3} \psi \sin^{4/3} \alpha \quad (4)$$

이다. 연성재료의 경우 절삭물은 연마입자의 선단에 의해 제거되는 체적으로 정의할 수 있으며 절삭은 연마입자의 수평운동이 정지하거나 ($\dot{x}=0$) 연마입자가 재료표면을 떠나면서 끝나게 된다. ($y=0$) 따라서 한개의 연마입자에 의한 재료 절삭량은, $A(y)$ 가 연마입자의 $y=0$ 아래의 단면적이고 t_c 가 절삭이 멈추는 시간일 때

$$V = \int_0^{t_c} A(y) d(x+r\phi) \quad (5)$$

이 된다.

취성재료의 어브레이시브 워터제트 가공에서는 연마입자가 공작물에 가하는 충격량에 따라 2가지의 다른 절삭의 모드가 존재할 수 있다. 만약 충격량이 균열전파의 임계치보다 작다면 연성재료와 마찬가지로 소변형이 중요한 절삭메커니즘이 되고, 충격량이 임계치보다 큰 경우 주로 균열의 전파에 따른 파괴에 의해 재료의 제거가 일어난다.^(7,10) 준정적 압입(quasi-static indentation)은 여러 연구자들에 의해 연구된 바 있는데, Lawn과 Swain^(8,9)에 따르면 취성재료의 압입에서 재료의 거동은 다음과 같다. 첫째로 Fig. 3(a)에서와 같이 날카로운 인덴터가 압입됨에 따라 소성영역이 형성되는데 그 크기는 하중의 증가에 따라 증가해서 정해진 임계치에 도달하면 응력집중이 최고가 되는 접촉점 아래에서 Fig. 3(b)에서와 같이 재료표면에 평행인 방향으로 균열이 시작된다. 이 균열은 중앙균열(median crack)이라 불리며 인덴터의 압력이 증가됨에 따라 중앙균열은 더욱 진전된다. 이 상태에서 인덴터가 빠지면 중앙균열은 닫히고 소성변형된 영역과 그 주위의 응력분포에 따른 잔류응력이

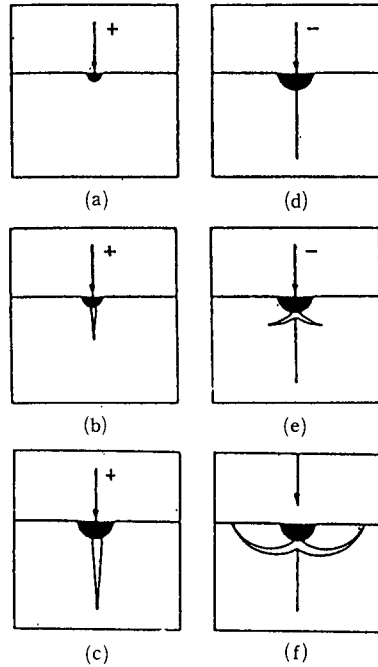


Fig. 3 Schematic of crack formation under point indentation⁽⁸⁾

발생해서 Fig. 3(d)에서와 같이 새로운 균열이 재료표면에 평행한 방향으로 진행한다. 이러한 측면 균열(lateral crack)은 결국 재료의 표면을 향해서 위로 휘어지고 이러한 측면균열이 취성재료의 압입에서 재료제거의 주요인이 된다. 측면균열이 발생하기 위한 임계부하를 Evans^(10,11)는 $\xi = H/\bar{\sigma}$ 일 때 다음과 같이 예측했다.

$$P^* = 14 \frac{\xi^4 \Lambda K_c^4}{H^3} \quad (6)$$

어브레이시브 워터제트 가공의 경우 연마입자가 경사각을 가지고 평평한 재료의 표면에 부딪칠 때 법선 방향과 수평방향으로 접촉력을 미친다. 법선력과 평행력이 동시에 재료의 응력장에 영향을 미치지만 평행력은 응력장을 연마입자의 운동방향으로 회전시키는 역할을 해서 연마입자의 운동방향의 앞쪽에서는 장력을 감소시키고 뒤쪽에서는 증가시키거나 연마입자의 운동방향에 수직인 평면에서는 응력의 큰 변화가 없게 된다. 따라서 측면균열의 크기는 평행력의 크기에 상대적으로 덜 민감하여, 측면균열의 크기는 법선력만으로 예측할 수 있다. 정적인 압입의 경우 다음과 같이 예측될 수 있다.⁽³⁾

$$l = 0.29 \frac{P^{2/3}}{\pi^{2/3} \Lambda^{2/3}} \quad (7)$$

식(6)의 최대 수직력을 식(7)에 대입하면 다음과 같이 최대 측면균열의 크기를 얻을 수 있다.

$$l_{\max} = 0.2461 \frac{7^{2/9} m_a^{4/9} v^{8/9} \tan^{4/9} \psi \sin^{8/9} \alpha}{\Lambda^{4/9} K_c^{2/3}} \quad (8)$$

측면균열은 소성/탄성의 경계에서 시작되고 표면에 평행하게 진행하다가 위쪽으로 휘어지므로⁽¹¹⁾ 손상되는 깊이는 소성영역의 깊이에 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 손상되는 깊이는 다음과 같다.

$$h \propto y \quad (9)$$

또한, 식(3)의 최대 압입깊이를 대입하면 최대 손상깊이는 다음과 같다.

$$h \propto \frac{m_a^{1/3} v^{2/3} \sin^{2/3} \alpha}{\Lambda^{1/3} H^{1/3} \tan^{2/3} \psi} \quad (10)$$

그러면 재료에 충돌하는 한개의 연마입자에 의한 적설량은 다음과 같이 예측될 수 있다.

$$V \propto \frac{m_a^{1/3} v^{2/3} \sin^{2/3} \alpha}{\Lambda^{1/3} H^{1/3} \tan^{2/3} \psi} \quad (10)$$

그러면 재료에 충돌하는 한개의 연마입자에 의한 절삭량은 다음과 같이 예측될 수 있다.

$$V \propto l_{\max}^2 h \propto \frac{H^{1/9} m_a^{11/9} v^{22/9} \tan^{2/9} \psi \sin^{22/9} \alpha}{\Lambda^{11/9} K_c^{2/3}} \quad (11)$$

이 결과는 주로 균열의 전파에 의해 재료가 제거 되는 취성재료의 경우 재료 제거량은 재료의 경도에 큰 영향을 받지 않는다는 것을 의미하고 ($V \propto H^{1/9}$), 이 점이 어브레이시브 워터제트 가공이 경도가 강한 취성재료의 가공에 유효한 이유라고 설명할 수 있을 것이다.

3. 취성재료의 어브레이시브 워터제트 가공에서 발생하는 파괴

어브레이시브 워터제트는 취성재료를 관통할 때 균열이 생겨 대규모의 파괴를 가져올 수 있으며, 이는 취성재료의 정밀가공에서 바람직하지 못하다. 이러한 균열과 파괴는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 이미 상당부분 가공이 진행된 구멍아래 남은 얇은 원형박판 형태의 재료에 과중한 압력이 가해지면서 발생하는 것으로 볼 수 있다. 그리고 이 균열은 대

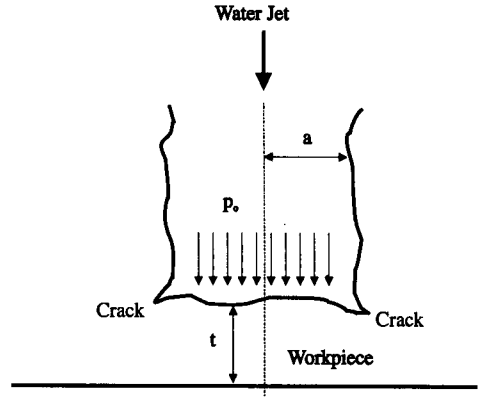


Fig. 4 Model of crack formed as jet exits from material

략 재료의 배면과 평행하게 진행하는 것이 관찰되었다. 이 균열의 크기는 다음과 같이 박판이론(the theory of thin plates)을 적용해 프로세스 파라미터와 재료물성의 함수로 예측할 수 있다.

둘레를 따라서 고정된 원형박판이 균일한 압력 p_0 를 받을 때 탄성학에 따른 변형은 E, v, t 가 각각 영계수, 푸아송비, 판의 두께이며, D 가 다음과 같이 정의된 강성도일 때

$$D = \frac{Et^3}{12(1-v^2)} \quad (12)$$

다음의 편미분방정식과 경계조건에 의해 주어진다.^(12,13)

$$\nabla^2 \nabla^2 z = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \theta^2} \right) = \frac{p_0}{D} \quad (13)$$

$$z(a) = 0$$

$$z_0(a) = -z_r(a) = 0$$

이 식의 해는 다음과 같다.

$$z = \frac{p_0 a^4}{64D \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right)^2}$$

$$M_{\theta\theta} = \frac{p_0 a^2}{16} \left(1 + v - (1 + 3v) \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right) \quad (14)$$

후판의 경우 처짐은 전단응력에 의한 부차적인 효과 때문에 위에서 계산한 것보다 커지게 된다. 그러나 전단력에 의한 변형에너지를 무시하면 이러한 시스템의 변형에너지를

$$U \approx U_m = \frac{1}{2} \int M_{\theta\theta} d\omega_0 = \frac{p_0 a^6}{6144D}$$

$$= 5.2493 \times 10^{-6} \frac{\rho_0 A_p^2}{D} \quad (15)$$

이다. 선형 파괴역학이론에 따라 응력에너지 방출률이 정해진 임계치에 이를 때 균열이 진행하기 시작한다고 볼 수 있고, 균열은 재료의 표면과 평행하게 진행하므로 이 시스템의 응력에너지 방출률은 이 시스템의 변형에너지를 판의 면적에 대해 미분한 것과 같다. 따라서 G_c 가 재료의 임계 변형에너지 방출률일 때 다음과 같은 균열진행의 조건을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial a} = 1.8897 \times 10^{-4} \frac{(1-v^2) \rho_0 A_p^2}{E t^3} = G_c \quad (16)$$

이 식은 t 에 관해 다음과 같이 정리될 수 있으며

$$t = 0.05739 \frac{(1-v^2)^{1/3} \rho_0^{1/3} A_p^{2/3}}{E^{1/3} G_c^{1/3}} \quad (17)$$

재료 가공율(material removal rate)을 결정하는 파괴의 두께가 $\rho_0^{1/3} A_p^{2/3}$ 에 비례함을 보인다.

4. AE와 어브레이시브 워터제트 가공

AE(acoustic emission)는 소성변형, 균열의 발생과 전파, 그리고 상변화등을 겪는 재료에서 발생하는 천이적인 탄성응력파이다. AE신호는 재료의 변형과정에 민감하기 때문에 비파괴검사 뿐 아니라 각종 생산가공의 감시에 응용된 바 있다. 어브레이시브 워터제트 가공에서는 재료에 충돌해 나오는 워터제트가 가공부위 주변에 짙은 안개막을 형성해서 작업자가 직접 작업부위를 관찰할 수 없으며, 충돌해 나오는 워터제트는 위험하기 때문에 작업자가 가까이 갈 수 없으므로 생산현장에서 어브레이시브 워터제트를 이용해 정밀가공을 하기 위해서는 프로세스감시를 위한 센서시스템의 개발이 필요하다.

AE센서는 적절한 전파매질이 있는 경우 작업부위에서 떨어진 곳에 장착되어도 되므로 작업부위에 직접 센서를 장착하기 어려운 어브레이시브 워터제트 가공의 감시에 적합한 것으로 생각된다. 작업부위에서 멀어질수록 신호의 강도는 약해지지만 어브레이시브 워터제트 가공은 격렬한 탄성, 소성변형과 균열의 전파를 수반하며 AE는 재료의 탄성 소성변형, 균열의 발생과 전파 등에 대단히 민감하기 때문에 작업부위에서 떨어져서 감지된 AE신호도 재료의 가공상태에 관한 중요한 정보들을 포함한다고 볼 수 있다.

5. 실험

어브레이시브 워터제트를 이용해서 금속과 취성의 세라믹재료를 가공하기 위한 일련의 실험들이 행하여졌다. Flow Industries사의 어브레이시브 워터제트 머신을 이용하여 ANSI 4030강, Al2024 알루미늄, 그리고 5 mm두께의 AD-94 알루미늄 세라믹판을 가공하였다. 연마입자로는 평균직경 약 0.15~0.25 mm의 garnet이 사용되었으며 워터제트의 압력은 150~350MPa, 연마입자와 물의 무게혼합비는 5%로 유지되었다. Fig. 5는 이러한 어브레이시브 워터제트 가공 시스템과 AE감시 시스템의 다이아그램이다. Dunegan-Endevco D9201A AE센서는 물에 젖지 않도록 또 충돌해 나오는 연마입자와 접촉하지 못하도록 가공부위에서 6 feet 떨어진 테이블 위에 설치되었다. 센서로부터의 약한 신호는 Dunegan-Endevco 1801A-100H 프리앰프와 AET-302A 프리앰프를 통하여 증폭되고 AET 404 RMS앰프를 통하여 시정수 10 ms으로 RMS 값으로 변환되었다. 원래의 AE신호와 RMS AE신호는 동시에 개조된 Sony AV3650 VTR에 의해 아날로그 형태로 저장되어 실험이 끝난 후 HP51180 Wave Form Recorder에 의해 디지털신호로 샘플링되어 GPIB Interface를 통해 PC로 전달되어 해석된다.

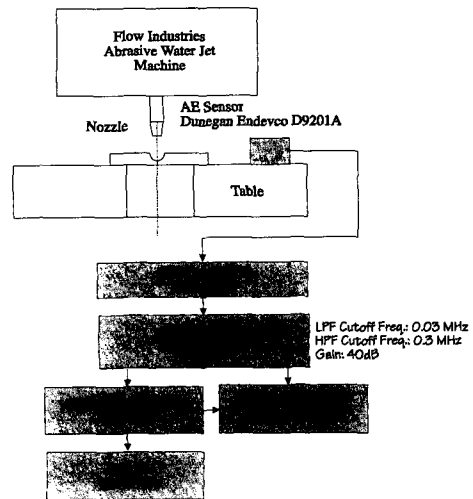


Fig. 5 Schematic of acoustic emission monitoring system

6. 실험결과

여러가지 재료의 어브레이시브 워터제트 가공실험에서 가공률은 정해진 시간동안 가공을 하고 그 시간동안 제거된 가공물의 체적을 측정함으로써 계산되었는데 그 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. AD-94 알루미늄 세라믹스의 가공률이 ANSI 4030 Steel 보다는 훨씬 높고, AL2024 알루미늄에 비해서도 약간 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 다른 절삭가공에서는 경도가 높은 알루미늄 세라믹스의 가공률이 ANSI 4030 Steel이나 A12024 알루미늄에 비해서 현저하게 낮음을 고려할 때 이러한 결과는 어브레이시브 워터제트 가공이 다른 가공법에 의해서는 가공이 어려운 알루미늄 세라믹스같은 경취재료를 가공하는데 특히 유효하다는 것을 보인다. 이는 또한 어브레이시브 워터제트 가공에서 연성재료와 취성재료의 절삭메커니즘이 서로 다름을 보여준다.

Fig. 7은 AD-94 알루미늄 세라믹스를 가공할 때 발생하는 전형적인 RMS AE신호를 보인다. 어브레이시브 워터제트의 압력이 재료에 가해짐에 따라 AE신호가 빠른 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 최초의 피크는 워터제트의 압력에 따른 재료의 변형때문이라고 생각된다. 버스트가 생긴 다음에 신호는 비교적 평탄하게 유지되다가 워터제트 이 공작물을 관통하면서 발생하는 균열과 파괴에 의해 RMS AE신호에 진동이 증가하고 이어서 큰 피크가 생기고 것을 볼 수 있다. 이렇게 워터제트가 공작물을 관통하면서 파괴가 발생하기 직전에 RMS AE신호의 진동이 증가하므로 바람직하지 못한 파괴의 발생은 RMS AE신호의 진동이 증가할 때 가공파라미터를 바꾸어줌으로써 제어할 수 있을 것이다.

AD-94 알루미늄 세라믹스를 가공할 때 발생하는 RMS AE신호 레벨이 노즐로부터 공작물까지의 거리의 함수로 Fig. 8에 나타나 있다. 이 그림에서 노즐로부터 공작물까지의 거리가 짧을수록 또 큰 연마입자를 사용할수록 RMS AE신호의 레벨이 높아짐을 볼 수 있는데 이는 RMS AE신호 레벨의 절삭메커니즘과의 연관성을 고려할 때 가공률이 높아짐을 의미한다. 즉, 노즐로부터 공작물까지의 거리가 짧을수록 또 큰 연마입자를 사용할수록 가공률을 높일 수 있으며, 노즐로부터 공작물까지의 거

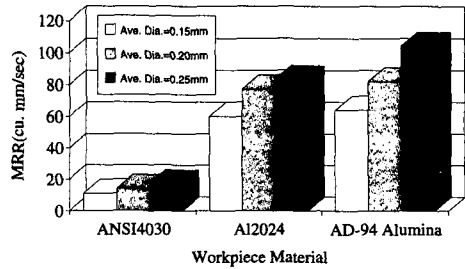


Fig. 6 Material removal rates achieved in the experiment (standoff distance=6 mm, angle of impingement=90 degrees, average diameter of abrasive particles=0.15~0.25 mm)

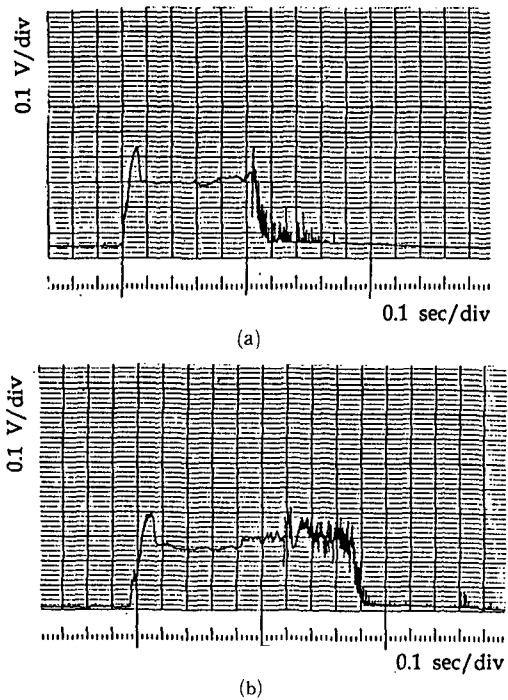


Fig. 7 RMS AE Signal when the abrasive water jet impinges on AD-94 alumina ceramics

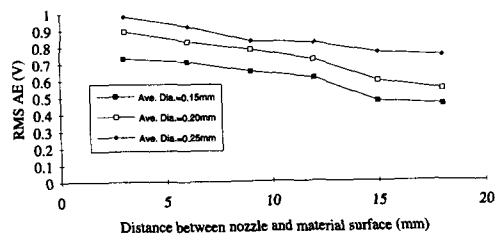


Fig. 8 RMS AE level vs. the distance between nozzle and the material surface when the abrasiv water jet impinges on AD-94 alumina ceramics

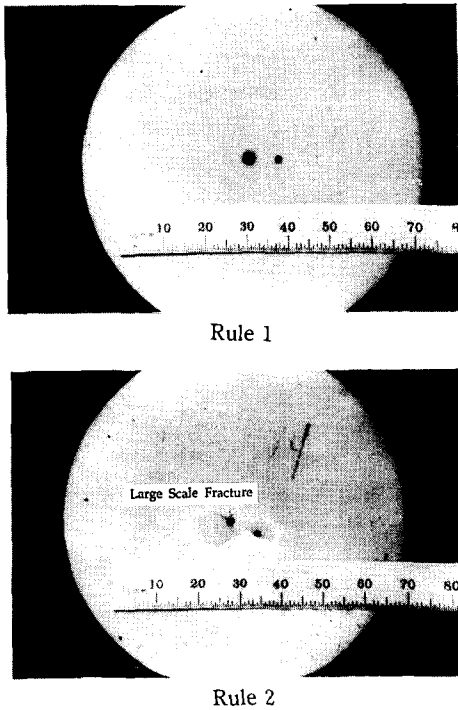


Fig. 9 Front and rear view of AD-94 alumina ceramics machined with abrasive water jet

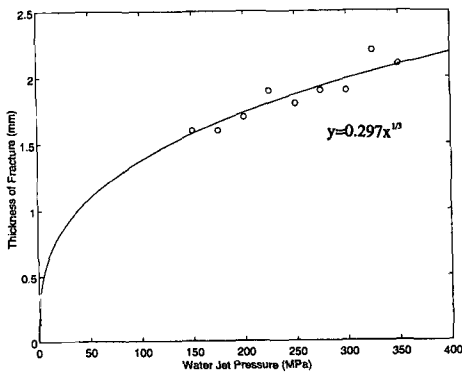


Fig. 10 Size of large scale fracture vs. water jet pressure

리가 길어질 때 확산된 워터제트는 절삭된 구멍의 코너면을 깎아내므로 공작물의 정밀도를 유지하기 위해서도 노즐로부터 공작물까지의 거리가 짧은 것이 바람직하다.

Fig. 9에서는 워터제트의 공작물을 관통할 때 파괴가 생긴 것을 볼 수 있고 이는 RMS AE신호에 Fig. 8에서와 같이 진동의 증가와 큰 피크로 반영된다. 이러한 파괴는 Fig. 4에서처럼 가공된 구멍

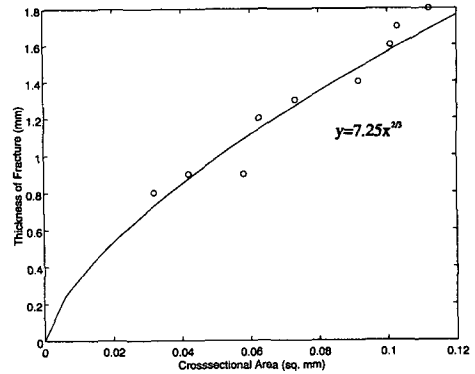


Fig. 11 Size of large scale fracture vs. area of machined hole

밑바닥의 얇은 부위에 워터제트의 높은 압력이 작용함에 따라 생기는 것으로 생각된다. Fig. 10은 수압에 따른 파괴두께의 변화를 보여주고 있는데 앞에서 예측된 바와 같이 파괴된 부위의 두께가 $p^{1/3}$ 에 비례하는 경향을 보임을 알 수 있다. 또, Fig. 11은 가공된 구멍의 단면적과 파괴두께의 상관관계를 나타내는데 역시 예측된 바와 같이 파괴된 부위의 두께가 $A^{2/3}$ 에 비례하는 경향을 보이고 있다.

7. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 어브레이시브 워터제트 가공은 다른 일반적인 가공방법에 비해 세라믹스같은 경취재료의 가공에 적합하다.

(2) 취성재료의 가공에서 워터제트의 재료는 관통할 때 대규모의 파괴가 생길 수 있으며, 그 크기는 $p^{1/3} A^{2/3}$ 에 비례한다.

(3) RMS AE신호는 워터제트와 재료와의 접촉에 민감하며, 취성재료의 가공에서 워터제트의 재료를 관통할 때 생기는 파괴는 RMS AE신호의 큰 버스트에 의해 감지될 수 있다. 또 파괴가 일어나기 직전에 AE신호의 진동이 증가하므로 파괴의 발생은 AE신호의 진동이 증가하는 것이 감지됨에 따라 가공피라미터를 제어함으로써 방지될 수 있다.

(4) 생산공정에서 어브레이시브 워터제트를 이용하기 위하여는 작업부위의 직접적인 관측이 어려워 실시간 감시시스템의 개발이 필수적이며 AE는 어

브레이시브 워터제트 가공의 감시에 적합하다.

후 기

이 연구를 수행하는데 실험장비를 사용할 수 있도록 해주시고, 많은 조언을 주신 University of California, Berkeley의 Hood M.교수께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Finnie, I., Wolak, J. and Kabil, Y., 1967, "Erosion of Metals by Solid Particles," *Journal of Materials*, Vol. 2, No. 3, pp. 682~700
- (2) Hashish M., 1993, "The Effect of Beam Angle in Abrasive-Waterjet Machining," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, No. 1, pp. 51~56.
- (3) Benchaita, M., Griffith, P. and Rabinowitz, E., 1983, "Erosion of Metal Plates by Solid Particles Entrained in a Liquid Jet," *Journal of Engineering for Industry*, 105, pp. 215~222.
- (4) Hashish, M., 1984, "A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets," *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106, pp. 88~100
- (5) Hashish, M., 1986, "Aspects of Abrasive Waterjet Performance Optimization," *Proceedings of the 8th International Symposium on Jet Cutting Technology*, p. 297.
- (6) Finnie, I., 1958, "The Mechanism of Erosion of Ductile Metals," *Proceedings of the 3rd National Congress of Applied Mechanics, ASME*, pp. 527~532.
- (7) Kim, T., Sylvia, J. and Posner, L., 1985, "Piercing and Cutting of Ceramics by Abrasive Water Jet," *Machining of Ceramic Materials and Components, ASME, PED-Vol. 17*, p. 53.
- (8) Lawn, B. and Evans, A., 1977, "A Model for Crack Initiation in Elastic/Plastic Indentation Fields," *Journal of Material Science*, 12, p. 2195.
- (9) Lawn, B. and Swain, M., 1975, "Microfracture beneath Point Indentations in Brittle Solids," *Journal of Material Science*, 10, p. 113.
- (10) Evans, A., 1979, "Abrasive Wear in Ceramics: An Assessment," *The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing 2*, NBS Special Publication, 562, p. 1.
- (11) Evans, A., Gulden, M. and Rosenblatt, M., 1978, "Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-Plastic Response Regime," *Proceedings of the Royal Society of London, A*, 361, pp. 343~365.
- (12) Timoshenko, S., 1925, "Applied Elasticity," 1st Edition, Westing House Technical Night School Press, East Pittsburg, PA, pp. 444~459.
- (13) Wang, C., 1953, *Applied Elasticity*, McGraw-Hill, New York, NY, pp. 291~296.