

초음파 진동을 이용한 세라믹 소재의 마이크로 홀 가공

박성준*, 이봉구⁺, 최헌종⁺⁺

(논문접수일 2003. 9. 22, 심사완료일 2004. 1. 16)

Micro Hole Machining for Ceramics (Al_2O_3) Using Ultrasonic Vibration

Sung-Jun Park*, Bong-Gu Lee⁺, Hon-Zong Choi⁺⁺

Abstract

Ultrasonic machining is a non-thermal, non-chemical, and non-electrical material removal process, and thus results in minimum modifications in mechanical properties of the brittle material during the process. Also, ultrasonic machining is a non-contact process that utilize ultrasonic vibration to impact a brittle material. In this research, characteristics of micro-hole machining for brittle materials by ultrasonic machining(USM) process have been investigated. And, the effect of ultrasonic vibration on the machining conditions is analyzed when machining for non-conductive brittle materials using tungsten carbide tools with a view to improve form and machining accuracy.

Key Words : Ultrasonic Micro-Hole Machining(초음파 미세구멍 가공), Resonant Frequency(공진 주파수), Horn(혼), Abrasive(연마입자), Amplitude(진폭), Machining Pressure(가공압력), Tool Wear(공구 마멸)

1. 서론

최근 각종 기계의 경량화, 고정밀화, 고성능화가 요구되면서 전자 및 통신기기, 반도체 부품, 항공기 및 자동차 분야 등 미래 지향적인 첨단 산업 전반에 걸쳐 고인성, 고내열성, 고강도의 특성을 가진 난삭재 정밀 가공 기술의 필요성이 대두되고 있다.

현재 고부가가치 부품소재로 사용되고 있는 세라믹 소재

는 우수한 특성과 다양한 기능성으로 각광을 받고 있는 신소재이나 고경도, 취성 재질로 인해 난삭재로 분류된다.

현재 세라믹 소재는 제조방법상 소결공정을 필수로 하며 수축현상을 피할 수 없기 때문에 고정밀도의 요소 부품화를 위해서 후가공을 필요로 한다. 또한, 세라믹 소재는 고강성, 고경도를 갖는 재료의 특성 때문에 기존의 절삭공구를 사용하여 칩을 발생시키는 범용절삭 방법으로 가공하기 어려운 재료이다.

* 주저자, 연세대학교 나노과학기술연구원 (sjpark@yonsei.ac.kr)

주소: 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

+ 연세대학교 대학원 기계공학과

++ 한국생산기술연구원

난삭재로 불리는 재료의 가공은 기존의 전통적인 가공방법으로는 가공이 어렵고 만약, 가공이 가능하더라도 원하는 형상이나 표면품위를 얻기 어렵다. 따라서 이들 재료의 가공은 레이저 가공, 이온빔 가공, 방전가공, 워터젯 가공, 화학적 가공 등의 전기적, 화학적 에너지를 이용한 특수 가공법에 의존하고 있다. 그러나 이러한 특수가공법들도 각 공정의 특성에 따라 모든 재료에 적용되지 못하는 제한점과 가공을 위해서 많은 비용과 설비가 필요하다는 문제점을 가지고 있다.

현재, 세라믹소재의 정밀가공은 주로 연삭에 의존하지만 에너지 소비가 크고 소재의 표면결함(surface damage)을 유발한다⁽²⁾. 레이저가공(LBM)은 세라믹 가공의 대안으로 주목받고 있지만 아직까지는 표면품위가 상대적으로 열악하다⁽³⁾. 방전가공(EDM) 또한 다른 대안으로 세라믹 소재들을 성공적으로 가공한 사례가 보고되고 있지만 가공원리상 전기적으로 도체인 재료만을 가공할 수 있는 단점이 있다⁽⁴⁾. 그러나, 세라믹 소재는 일부를 제외하고 대부분이 절연체이므로 3차원적으로 복잡한 형상이나 특수형상의 구멍 및 홈 가공 등에는 초음파 가공이 가장 효과적인 가공법이라 할 수 있다. 또한, 초음파 가공법은 모든 고경도, 취성 재료를 가공할 수 있으며 가공된 표면내부의 열적, 화학적 특성을 변화 시키지 않는다. 이러한 재질 특성의 변화는 방전가공, 전해가공, 레이저 가공 및 전통적인 절삭가공 방식에서는 필연적으로 발생한다.

초음파 가공법은 공구의 상하방향의 진동을 공구와 가공물 사이에 공급되는 연마입자에 초음파 진동에 의해 발생하는 미소치핑을 이용하는 방법으로 연마입자의 1회 충격에 의한 제거량이 미소하기 때문에 다른 재료 제거 공정과 비교하여 세라믹소재 가공에서 상대적으로 우월한 표면 품질을 얻을 수 있으며 대부분의 경우 약 0.5 μm 이하의 표면 거칠기를 가진다고 보고되고 있다.

초음파를 이용한 미세 구멍 가공에 대해 연구동향을 살펴보면 우선 수백 마이크로미터에서 수 밀리미터 크기의 경취성 재료에 대한 구멍가공은 초음파 진동이나 또는 초음파 진동과 다른 공정을 복합하여 가공을 한 예^(5,6)는 발표되고 있지만, 수십 마이크로미터 크기의 미세 구멍가공에 대해서는 공구제작의 어려움 및 공구파괴의 문제점 등으로 인해 거의 보고된 바가 없다. 또한, 초음파 가공은 공구마멸이 크고, 공구마멸에 의해 진폭이 변화하여 가공성능이 저하되므로 공구의 튜닝(tuning)이 필요하다. 또한 공구마멸에 따른 재료제거율이 낮아 적용이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 개발된 초음파 가공기⁽⁷⁻⁹⁾를 이용하여 세

라믹 소재와 같은 비전도성 취성 재료를 가공실험을 통하여 미세치핑에 의해 이루어지는 초음파 가공기구를 이해하고, 취성재료 가공에서 발생하는 공구마멸과 재료 제거율을 실험 결과를 토대로 선정된 최적 가공조건을 바탕으로 지름 30 μm 초경 공구를 사용하여 순도 99.8% Al_2O_3 세라믹 소재를 관통 가공하였다.

2. 초음파 가공 기구 및 장치

2.1 미세 크랙에 의한 초음파 가공기구

초음파 가공은 세라믹 소재와 같은 비전도성 재료의 정밀 가공에 효율적인 가공법으로서 공구와 가공물 사이에 슬러리형태로 존재하는 연마입자가 공구의 진동에 의해 가공물 표면에 충격을 가하여 미세 크랙을 생성하게 되고 이러한 현상이 반복됨으로써 가공이 이루어진다.

초음파 진동에 의해 연마입자가 공작물과 충돌하면서 발생하는 미소치핑(microchipping)으로 인한 가공 기구는 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 연마입자를 공구가 직접 충격하는 hammering과 공구에 의해 가속된 연마입자가 간접적으로 가공물 표면과 충돌하여 발생하는 throwing 현상이 발생하며 공동현상(cavitation) 및 부식(erosion)등도 재료제거의 요인으로 알려져 있다.

공구와 가공물 사이에는 연마입자의 평균 크기에 해당하는 가공 간극(clearance)이 존재하여 공작물과 공구가 직접 접촉하지 않는 특성을 가진다. 따라서, 열 및 버(burr)의 발생이 없고 저에너지의 사용으로 공정이 안전하며, 산화층의 발생이 없는 특징을 가지고 있다. 또한 가공 중에 가공물뿐만 아니라 공구 수직 방향의 마멸, 입자 및 debris의 순환에

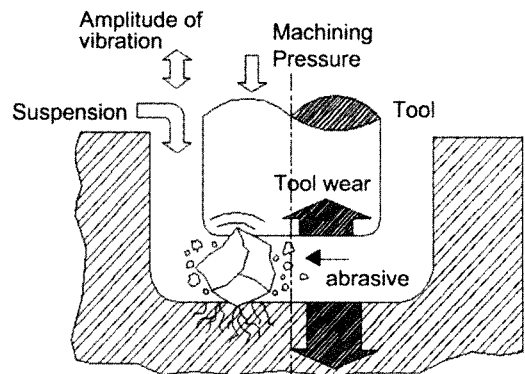


Fig. 1 Material removal mechanism in USM

의한 공구 측면부의 마멸도 발생하기 때문에 정확한 가공 형상을 얻기 위해서는 가공하고자 하는 구멍의 크기에 따른 적절한 입자 크기와 공구 지름의 선정이 중요하며 가공 중 발생하는 공구 마멸을 고려한 최적 가공조건 선정이 요구된다.

2.2 실험 장치

본 실험에 사용된 초음파 가공기는 회전 진동자 및 냉각 장치, 이송 및 제어 장치 등으로 구성된다.

Fig. 2에 제작된 초음파 가공 시스템의 개략적인 구성을 나타내었다. 회전 진동자를 채택하여 단순한 초음파 가공뿐만 아니라 공구의 회전에 의한 복합 가공이 가능하도록 하였으며 제어장치는 PC를 기반으로 하여 3축 제어를 하였다. X축 및 Y축에는 스텝핑 모터(steping motor)를 이용하였다. Z축에는 백래쉬가 없는 볼스크류(리드 5mm)와 하모닉 드라이버를 이용하여 축의 이송을 1 μ m로 정밀 구동이 가능하도록 하였다. 분해능이 0.01g 인 로드셀을 사용하여 일정한 가공압력이 유지되도록 Z축방향의 이송을 제어하면서 가공실험을 실시하였다. 연속 발진시의 진동자의 과열을 방지하기 위해서 진동 후에 냉각공기를 공급하여 작동 중 발생하는 열을 냉각하도록 하였다. 본 실험에 사용된 초음파 진동자는 압전 진동자와 혼이 볼트로 체결된 볼트 랑지 방형 진동자(BLT)이고 공구의 교환시 항상 동일한 조건을 만족할 수 있도록 공구의 착탈이 쉬운 콜릿형의 진동자 혼을 설계, 제작하였다. 회전 진동자의 공진 주파수는 30kHz이고 출력 300Watts인 PZT 진동자를 사용하여 실험하였으며 공구의 재질로는 텅스텐 카바이드를 사용하였다.

2.3 실험 방법

가공물로는 세라믹을 사용하였고 연마입자는 실리콘 카바이드와 다이아몬드를 이용하였다. 실험에 사용한 가공조건은 Table 1에 정리하였다. 가공실험에서 공구의 지름과 가공압력, 연마입자의 종류 및 크기를 변화하였으며, 이러한 변수들이 가공 특성에 어떠한 영향을 미치는지 파악하기 위해 실험에서 얻은 결과들을 비교, 분석하였다. 또한 가공 중 발생하는 재료제거율 및 공구의 마멸 등이 가공물에 미치는 영향을 SEM 사진을 통하여 고찰하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 재료 제거율

이상적인 경우를 고려하면 초음파 가공에서 최적의 가공 성능을 발휘하기 위하여 진동자의 진폭은 연마입자의 평균 크기와 같아야 한다. 이전 연구자들의 보고에 따르면 공진 주파수와 가공압력이 일정한 상태에서 재료 제거율은 진폭에 비례한다고 알려져 있다⁽¹⁰⁾. 하지만, 무한히 증가하는 것이 아니라 재료 제거율이 감소하기 시작하는 임계치도 물론 존재한다.

진동자의 진폭이 일정한 경우의 재료 제거율은 공진주파수에 비례하며 가공압력 또한 재료 제거율과 비례한다. 또한, 입자의 혼합비율 및 입자 크기도 영향을 미친다. 지름 100 μ m의 텅스텐 공구를 사용하여 일정한 가공압력을 유지하여 가공한 경우 연마입자의 크기에 따른 재료 제거율의

Table 1 Experimental conditions

Machine	Stroke:	140×120×100 (mm)
	Feed:	Stepping motor
	Spindle speed:	Max. 300 rpm
Ultrasonic unit	Frequency:	30kHz, 300W
	Amplitude:	1~5 μ m
	Cooling:	Air cooling
Abrasive	SiC #320(40 μ m),#800(14 μ m),#8000(1 μ m) Diamond #3000(4~8 μ m),#8000(1 μ m)	
Workpiece	Alumina ceramics (Al ₂ O ₃): 0.3t HRV 1,500 Kgf/mm ²	
Slurry	50wt % (water : abrasive)	
Machining conditions	Tool diameter: 30,50,100 μ m	

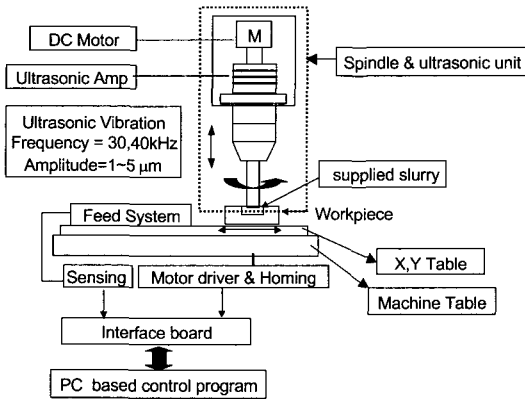


Fig. 2 Schematic diagram of the USM system

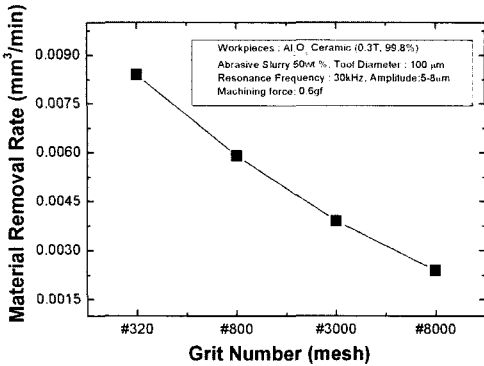


Fig. 3 Relations between grit number and MRR

변화를 Fig. 3에 나타내었다.

실험 결과를 통해 다른 가공조건이 일정하게 유지된 상태에서 연마입자의 지름이 커질수록 재료 제거율이 증가하여 가공속도가 빨라지는 것을 확인하였다. 일반적으로 초음파 가공에서 재료 제거율에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 가공압력, 입자 혼합비율, 연마입자의 종류 및 크기라고 생각할 수 있다.

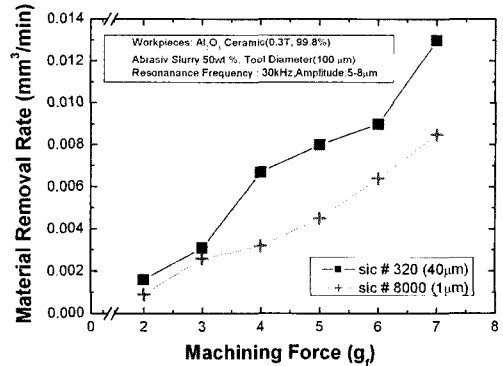
연마입자의 혼합비율을 50 wt%로 일정하게 유지한 상태에서 공구의 지름을 달리하고, 가공압력과 연마입자의 종류 및 크기를 변경하여 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3의 결과와 마찬가지로 연마입자의 크기가 클수록 재료 제거율이 증가했고, 가공압력이 증가함에 따라서 비례적으로 가공속도가 증가하였다. 공구의 지름이 500 μ m인 경우에는 지름 100 μ m인 경우에 비해 가공에 참여하는 입자의 양이 많아지게 되기 때문에 작은 가공압력에도 불구하고 재료 제거율이 비슷한 양상을 보였다.

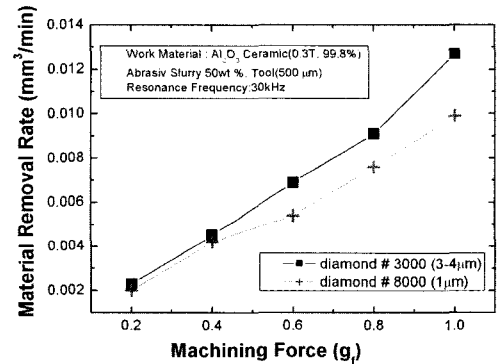
3.2 초음파 가공 특성

초음파 가공 중에 발생하는 미세 크랙으로 인한 가공 표면특성과 재료 제거율을 분석하는 방법으로는 아직까지 정량적인 측정 방법이 개발되지 않아 미세 가공 특성을 파악하는데 어려움이 많이 있다. 미세 구조물이나 가공특성을 파악하기 위해서는 아직도 많은 측정 기술이 요구된다. 현재 일반적으로 사용하는 방법은 SEM을 통해 표면을 측정하는 방법이다.

본 연구에서도 SEM과 화학적 성분분석 방법인 EDS를 이용하여 가공특성과 가공표면을 관찰하였다. Fig. 5는 초음파 가공으로 실리콘 카바이드 #320 (40 μ m)입자를 사용하여 세라믹 소재에 미세 구멍을 가공한 경우 가공단면을 촬



(a) Abrasive : SiC #320(40 μ m), SiC #8000(1 μ m)



(b) Abrasive : Diamond #3000(3~4 μ m), Diamond #8000(1 μ m)

Fig. 4 Relations between machining force and MRR

영한 사진이다. 미세 구멍 내벽에 칩과 연마입자가 묻어 있는 것을 SEM 사진과 EDS 분석을 통하여 확인하였다.

3.3 공구 마멸의 영향

초음파 가공에서 공구마멸은 재료 제거율과 가공 정밀도에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

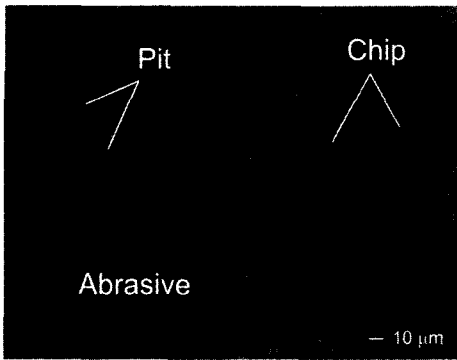
초음파 가공에서의 복잡한 공구마멸의 형태는 크게 길이방향 마멸과 반경방향 마멸로 나눌 수 있다. 공구 마멸에 영향을 미치는 인자는 미세공구 끝단에서의 진폭, 가공압력, 공작물의 경도 및 인성, 가공깊이 등이다.

Fig. 6은 초음파 가공 후의 공구 마멸형상을 나타낸 것으로 길이방향의 마멸을 쉽게 알 수 있다. Fig. 7은 초음파 가공 후의 공구 마멸영향으로 나타난 관통 구멍의 단면형상을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 공구마멸과 연마입자의 순환 및 공구의 횡방향 진동에 의하여 구멍 입구부와

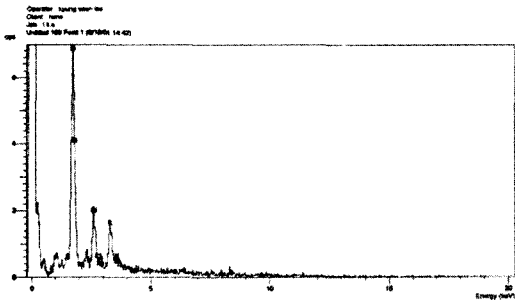
출구부 사이의 지름 차이가 발생하였음을 알 수 있다. 기존 연구에 따르면 세장비가 커지게 되면 입구부의 지름이 출구부에 비해 커지게 된다고 한다⁽¹¹⁾. 이때, 가공압력을 크게 하게 되면 입자가 파쇄되어 공구의 횡방향 진동이 감소되고 따라서 가공된 구멍의 원통도가 향상된다고 보고되고 있다⁽¹²⁾. 또한 공구재질로 텅스텐 카바이드나 스테인레스를 사

용하게 되면 원통도가 향상된다.

연마입자의 크기와 종류에 따른 공구길이방향의 마멸 경향은 Fig. 8에 나타내었다. 연마입자의 크기가 커질수록 공구 마멸이 증가하며 SiC의 연마입자를 사용했을 때 보다

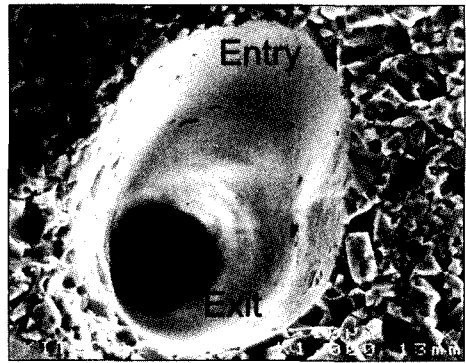


(a) Abrasive particle and micro-chip

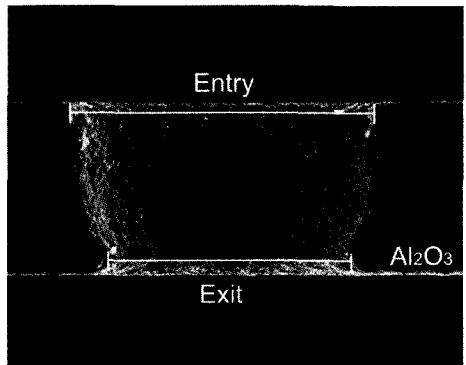


(b) EDS analysis result

Fig. 5 SEM photographs of the abrasive particle and chip



(a) Expansion of micro hole



(b) Cross section view of micro hole

Fig. 7 SEM photographs of machined hole

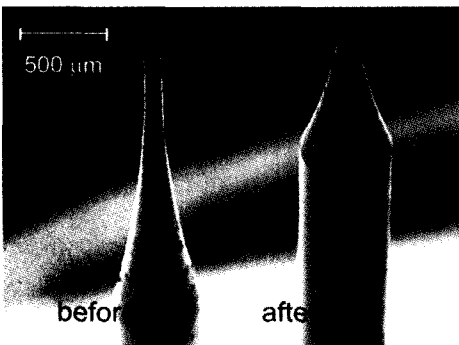


Fig. 6 Micro tool after USM (tungsten carbide 30 μ m)

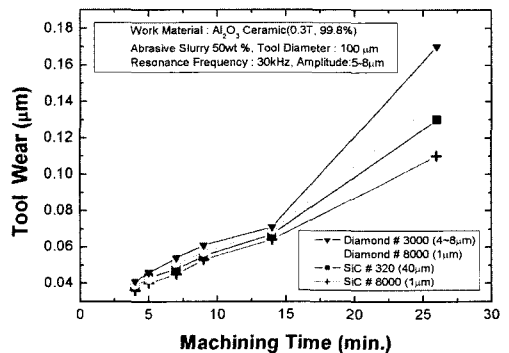


Fig. 8 Influence of abrasive grit size on tool wear

다이아몬드 연마입자를 사용했을 경우 공구 마멸이 더 심한 경향을 보인다. 이것은 연마입자의 경도 차이에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 상대적으로 경한 연마입자를 사용하게 되면 재료 제거율이 증가하는 것과 비례하게 공구마멸도 커진다.

결과에서 나타난 바와 같이 공구 마멸에는 입자의 종류 및 크기가 영향을 미치게 되므로 가공 시 적절한 연마입자의 크기와 종류의 선정이 중요하다. 가공압력을 0.6gf로 일정하게 제어하면서 공구 지름을 달리하여 깊이 300 μm 의 세라믹 소재를 관통 가공할 때 길이방향의 공구 마멸량을 Fig. 9에 나타내었다. 공구의 지름이 감소함에 따라 공구 길이 방향의 마멸이 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 미세 구멍 가공에서 공구 마멸 특성이 가공정밀도와 품질에 직접적으로 주요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

3.4 연마입자에 의한 가공 표면 특성

Fig. 10은 실험결과에서 다이아몬드 연마입자 #3000 (4~8 μm), #8000 (1 μm)을 사용 하였을 때 연마입자 크기에

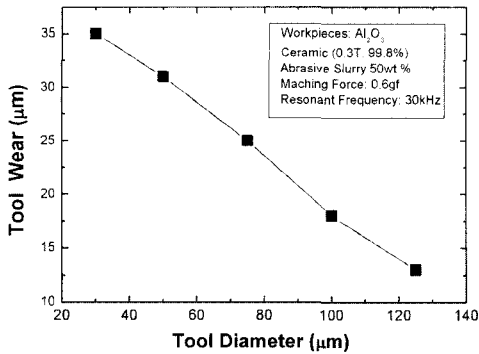


Fig. 9 Longitudinal tool wear



(a) diamond (3~4 μm) (b) diamond (1 μm)

Fig. 10 SEM photographs of the ultrasonic machined inner wall surface with diamond powder

따른 구멍 가공 후의 가공면 내벽을 관찰한 사진이다. 실험 결과를 통해서 알 수 있듯이 연마입자의 평균 지름이 커짐에 따라 가공표면의 거칠기가 나빠짐을 알 수 있다. 사진에 검게 나타나 있는 흔적은 연마입자에 의해 가공면에 흠이 발생한 것이다.

3.5 가공 끝단의 취성 파괴 현상

취성 재료의 관통 가공시 가공 끝면 부위에서의 취성 파괴현상이 나타나는데 이러한 현상은 초음파 가공이 진동충격력에 의해 가공이 이루어지기 때문에 발생하는 것이다. 공작물의 취성파괴 현상을 방지하기 위해서 Fig. 11과 같이 공작물과 고정판과 밀착을 위한 지그를 설계하여 초음파 가공실험을 하였다. Fig. 11에서 처럼 공작물이 테이블위에 유리판과 공작물의 밀착을 글루건과 크리스탈 왁스를 사용하여 고정시킨 후 실험한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

실험 결과에 의하면 아교를 사용하여 공작물을 밀착 시킨 경우 보다 크리스탈 왁스로 고정시킨 시편이 취성 파괴 현상이 적게 나타났다. 크리스탈 왁스로 고정시킨 경우가 밀판과 시편사이의 공간이 없이 단단하게 고정되었고 가공물

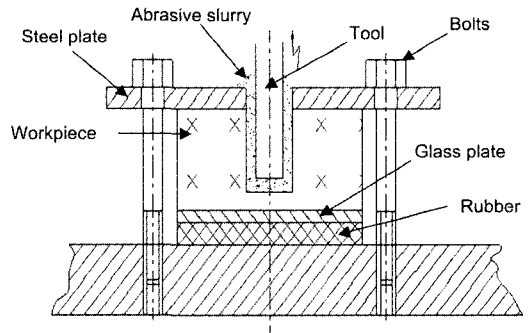
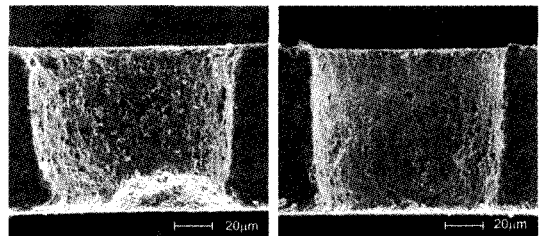


Fig. 11 Design of jig for fixing the workpiece



(a) glue (b) crystal wax

Fig. 12 Photographs of machined holes

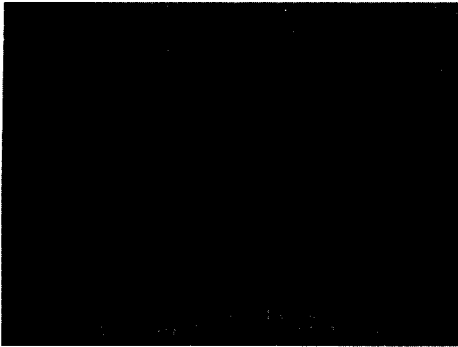


Fig. 13 Micro-hole in Al₂O₃ plate (Diamond #8000, 50wt%, depth: 300µm, aspect ratio: 10)

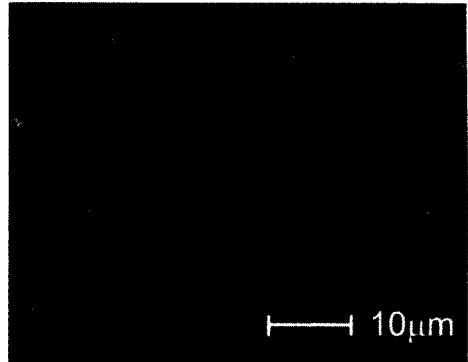


Fig. 14 Micro-hole in Al₂O₃ plate(SiC #8000, 50wt%, depth: 300µm, aspect ratio: 10)

아래에 설치한 고무판이 초기 충격력의 의한 취성 파괴의 발생을 줄일 수 있었기 때문이다.

3.6 마이크로 홀 가공

새롭게 제안한 방법에 의하여 가공 끝면의 취성 파괴 현상과 공구의 파손을 줄임으로써 가공 정밀도를 향상시키고 가공결함을 줄일 수 있다. 실험을 통해서 축적된 초음파 가공기술을 이용하여 지름 30µm의 텅스텐 공구를 사용하여 두께 300µm의 알루미늄 세라믹 소재 박판에 미세 구멍을 관통하여 가공하였다. 일반적으로 초음파 가공의 경우 세장비(aspect ratio)가 5 이상이 되면 연마입자와 debris의 순환이 원활하지 못하여 가공속도가 현저히 떨어지고 공구의 마멸이 심하게 발생하게 된다.

실험의 결과에서 알 수 있듯이 공구 마멸에 대한 영향은 연마입자의 종류와 크기, 가공압력에 따라 영향을 받게 되므로 초음파 가공시 적절한 연마입자의 선정과 적절한 가공압력 제어가 중요하다.

Fig. 13, Fig. 14 및 Fig. 15에 지름 30µm의 미세 공구를 사용하여 가공한 결과를 나타내었다. 깊은 구멍 가공 및 관통 가공 시 연마 슬러리의 원활한 유동성이 점차 둔화되어 지기 때문에 일정 임계 깊이에 이르게 되면 가공영역으로 새로운 입자들이 공급되지 못하고 슬러리와 debris의 순환이 불가능하게 되어지는 현상이 발생한다.

본 연구에서는 이러한 영향을 줄이기 위하여 회전형 진동자를 채택하여 공구가 회전함으로써 슬러리들의 순환 및 칩 배출 성능이 향상되도록 하였다.

가공속도를 향상시키고 공구 마멸을 줄이기 위해서는 가공 영역으로 슬러리 및 가공 칩의 순환이 원활하여야 하므로 깊은 구멍 가공 시에는 순환을 위하여 일정한 깊이를 가

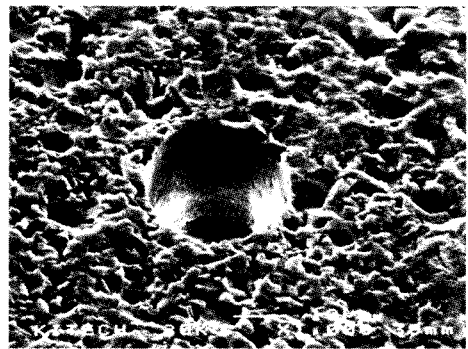


Fig. 15 Micro-hole in Al₂O₃ plate (Diamond #8000, 50wt%, depth: 300µm, aspect ratio: 10)

공한 후 공구를 후퇴하여 요동 시킨다. 이렇게 함으로써 공구와 가공면 사이의 간극을 통하여 가공된 칩들이 배출되고 새로운 연마입자들이 가공영역으로 원활하게 공급될 수 있도록 할 수 있다.

4. 결론

초음파를 이용한 미세 구멍 가공 기술개발을 위하여 고정도, 취성 재료인 세라믹 소재에 대한 가공기술 및 가공특성, 가공 시 고려해야 할 점에 대하여 고찰하였다. 본 실험적 연구를 통해서 취성 재료인 세라믹 소재의 마이크로 홀 가공을 위한 초음파 가공기 제작과 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 회전형 진동자 방식의 미세 공구를 사용하여 슬러리의 순환 및 debris의 배출 성능을 향상시킬 수 있다.

- (2) 취성 재료인 세라믹 소재 (두께 0.3mm)의 관통 가공 시 가공 끝단에서 취성 파괴 현상이 나타나는데 이러한 현상은 가공물과 지지 하판과의 밀착을 위한 장치를 설치하여 파괴현상을 줄일 수 있다.
- (3) 최적 가공조건을 선정하고 가공압력을 일정하게 제어하여 지름 30 μ m의 미세 공구로 알루미나 세라믹 소재를 관통 가공(세장비:10)하여 33 μ m 크기의 마이크로 홀을 제작하였다.

참 고 문 헌

- (1) Rajurkar, K. P., Wang, Z. Y., and Kuppattan, A., 1999, "Micro Removal of Ceramic Material (Al_2O_3) in the Precision Ultrasonic Machining", *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 73~78.
- (2) Malkin, S., and Ritter, J. E., 1989, "Grinding Mechanism and Strength Degradation for Ceramics", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 211~218.
- (3) Copley, S. M., 1985, *Handbook of High Speed Machining Technology*, Chapman and Hall, pp. 1771~1775.
- (4) Koenig, W., Dauw, D.F., Levy, G., and Panten, U., 1998, "EDM-future Steps towards the Machining of Ceramics", *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1 pp. 623~631.
- (5) Ishikawa, K., Suwabe, H., Nishide, T., and Uneda, M., 1998, "A Study on Combined Vibration Drilling by Ultrasonic and Low-frequency Vibrations for Hard and Brittle Materials", *Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 196~205.
- (6) Yan, B. H., Wang, A. C., Huang, C. Y., and Huang, F. Y., 2002, "Study of Precision micro-holes in Borosilicate Glass using Micro EDM Combined with Micro Ultrasonic Vibration Machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, pp. 1105~1112.
- (7) Kim, J. K., and Seo, Y. W., 2000, "A Study on the Fabrication of Prototype Ultrasonic Machine Tool and It's Experimental Machining", *Proceedings of the KSPE*, pp. 930~933.
- (8) Lee, S. W., Choi, H. Z., and Lee, B. G., 2001, "A Study on Micro Ultrasonic Machining for Brittle Material using Ultrasonic Vibration", *Proceedings of the KSPE*, pp. 969~972.
- (9) Lee, S. W., Choi, H. Z., Lee, B. G., and Choi, Y. J., 2002, "A Study on Micro Hole Machining Technology using Ultrasonic Vibration", *Proceedings of the KSPE*, pp. 231~234.
- (10) Thoe, T. B., Aspinwall, D. K., and Wise, M. L. H., 1998, "Review on Ultrasonic Machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 4 pp. 239~255.
- (11) McGoeough, J. A., 1988, *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, pp. 170~198.
- (12) Lehman, R. L., 1995, "Primer on Engineering Ceramics", *Journal of Advanced Materials and Processes*, Vol. 146, No. 6, pp. 1992.