

초음파 초정밀 가공 및 측정시스템에 대한 연구

주종남*, 한동철*, 박희재*, 박상신**, 제성욱*

A Study on the Ultrasonic Micro-machining and Measurement System

Chong Nam Chu*, Dong Chul Han*, Heiu Jae Pahk*, Sang Sin Park** and Sung Uk Je*

ABSTRACT

Ultrasonic Machining (USM) is widely used in cutting of non-conductive, brittle workpiece materials such as engineering ceramics. However, USM has a limitation in its application to micro machining because problems are occurred in attaching micro tools to the machine and maintaining high precision. Therefore Micro Ultrasonic Machining (MUSM) with WEDM is proposed in this research. The experiments are produced as the change of shaft diameter and abrasive size.

Key Words : WEDM(와이어방전가공), MUSM(미세초음파가공), Wear ratio(마모비, 공구마모길이/가공깊이), Taper angle(경사각)

1. 서론

자동차, 전자제품, 항공기계, 의료기기 등 거의 모든 첨단 산업분야에서 제품의 고집적화와 다기능화가 추구됨에 따라 보다 정밀하고 소형의 부품을 가공해야 할 필요성이 높아져 왔다. 이러한 요구는 기존의 제품에 적용해왔던 가공방법으로는 만족시키기가 어려우므로, 새로운 가공방법을 개발하거나 기존 가공방법의 정밀도를 향상시키려는 연구가 부단히 수행되어져 왔다.

이제까지 제안된 미세 가공기술로는 방전가공, 레이저 가공, 마이크로 드릴링 등이 있으나, 방전가공의 경우 전도성이 있는 재료만 가공할 수 있으며, 레이저 가공의 경우 열에 의한 가공이기 때문에 가공된 표면의 열에 의한 변형을 피할 수 없다. 또한, 마이크로 드릴링은 원하는 크기의 공구

제작이 용이하지 않고 공구보다 경도가 높은 재료는 가공이 불가능하다.

본 논문에서 수행한 초음파를 사용한 미세 가공의 경우에는, 가공입자에 의한 미세 크랙 발생을 원리로 가공을 수행하기 때문에 전기가 통하지 않는 경취재료의 가공이 가능할 뿐만 아니라 기계적인 가공을 수행하기 때문에 열에 의한 변형이 전혀 일어나지 않으므로 다른 마이크로 가공법에 비하여 깨끗한 표면형상을 얻을 수 있다.

지금까지 범용 초음파 가공의 연구는 많은 성과를 얻어왔다. 초음파 가공 기구에 관한 연구는 가공입자의 직접적인 해머링(hammering) 작용에 의해서 주로 이루어진다고 알려져 있다.^[1] 가공성능의 면에서는 가공공구의 재질과 시편의 재질의 영향이 크다고 밝혀져 있다.^[2,3] 가공률을 수식으로 정의한 Kainth 등은 가공 정압력, 가공입자 크기,

☞ 2001년 12월 12일 접수
* 서울대학교 기계항공공학부
** 영남대학교 기계공학부

진폭 등은 가공률과 비례관계가 성립하지만 실험을 통해서 가공률이 최대가 되게 하는 최적의 값이 존재한다는 것을 밝혔다.^[4] 이러한 범용 초음파 가공을 미세 초음파 가공에 적용한 Masuzawa 의 논문에서는 가공공구를 가공기에서 직접 제작하는 방법을 제시하였다.^[5,6] 또한 Komaraiah 등은 공구에 초음파 진동을 주면서 동시에 공구를 회전시키면 종래의 초음파가공의 1/3 수준으로 진원도 오차를 줄일 수 있다고 했다.^[7]

위의 연구를 바탕으로 본 논문은 미세 초음파 가공에 해한 가공 특성을 실험을 통해서 살펴보고자 한다. 가공변수로 가공입자의 크기와 가공공구 직경으로 나누어서 각각에 대해서 가공특성을 분석하였다, 그리고, 가공입자 크기에 따른 가공시간과 가공된 구멍의 품질을 실험적으로 규명하고 미세가공 실패를 나타내었다.

2. 와이어 방전 가공에 의한 공구 제작

초음파 가공은 가공물에 공구 형상이 전사되고 공구와 가공된 형상사이에는 사용된 가공입자의 크기에 따라 오차가 발생하게 된다. 이를 고려해서 가공하고자 하는 형상보다 더 작은 공구가 필요하게 된다. 또한 종래의 범용 초음파 가공기에서는 제작된 마이크로 공구를 가공기에 편심되지 않고 부착하는 것이 매우 어려웠기 때문에, 직경 200 μm 보다 작은 구멍의 가공은 불가능하였다.

따라서 본 연구에 사용된 초음파 가공기에서는 먼저 공구재료를 가공기에 부착한 후 가공기 상에서 직접 미세 공구를 제작하였다. 이를 위하여 종래의 초음파 가공기와는 달리 공구가 회전 가능한 구조로 되어 있으며, 공구를 원하는 크기로 가공하기 위한 와이어 방전가공(WEDM) 장치를 부착하였다.^[8]

이로 해서, 공구를 제작하기 위한 WEDM 공정과 실제로 가공물을 가공하기 위한 초음파 가공공정이 같은 이송 기구를 사용하는 것이 되므로 마이크로 공구는 가공 이송축에 대하여 편심과 기울어짐 없이 부착되어 있게 된다. 또한 공구가 회전되면서 가공되므로 공구재료 부착 시에 생기는 회전 런아웃(run-out)이 WEDM 에 의해서 공구 가공시에 제거되는 효과를 얻을 수 있다.

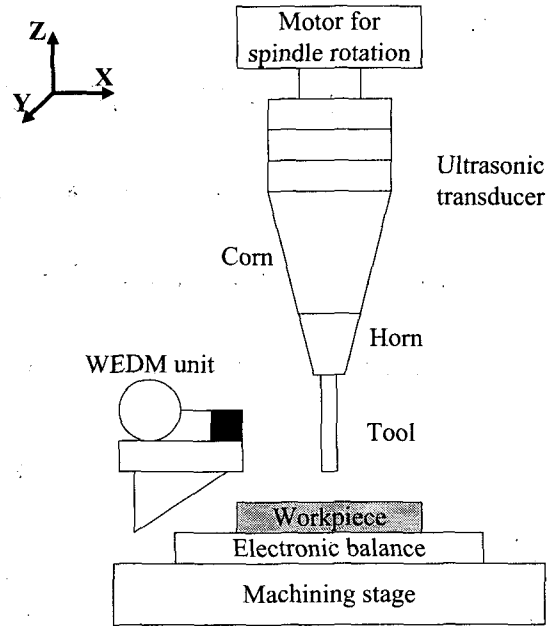


Fig. 1 MUSM with WEDM unit

3. 마이크로 초음파 가공 알고리즘

미세 초음파 가공의 알고리즘은 가공상태를 세가지로 구분하여 각각에 따라 공구의 이송이 이루어지도록 하였다. 가공상태의 판단은 초음파 가공시 시편과 공구 사이에서 발생하는 가공력을 피드백 받아서 수행하였으며, 이를 Fig. 2 에 나타내었다.

첫 번째 가공상태는 피드백 받은 가공력이 설정된 값보다 작은 경우이다. 가공이 정상적으로 이루어지는 상태로서, 가공루프가 한번 실행될 때마다 공구는 일정한 거리를 전진하게 된다. 공구 이동속도는 진행되는 단위 이송량의 2 배로 설정하였다. 이때 단위 이송은 0.8 μm 이다. 가공상태를 판단하기 위한 기준 가공력은 기초 실험을 통하여 구하였으며, 3gf 를 사용하였다.

두 번째 가공상태는 피드백 받은 가공력이 설정된 기준 가공력보다 크고 1.4 배 이하일 경우이다. 절삭된 가공물이 원활하게 제거되지 못하였거나 가공입자가 파쇄되어 가공효율이 저하된 상태로서 공구를 이송시키지 않고 그 위치에서 가공력이 설

정된 기준 가공력 이하로 될 때까지 가공을 수행한다. 0.5 초 동안 공구를 이송시키지 않는 상태로 가공한 후 다시 피드백 받은 가공력과 기준 가공력을 비교한다.

세 번째 가공상태는 피드백 받은 가공력이 설정된 기준 가공력보다 큰 경우이다. 가공이 전혀 이루어지지않는 상태로서, 가공량에 비해 공구의 이송이 과다함에 따라 가공에 필요한 힘 이상의 부하가 발생하는 경우이다. 따라서, 공구는 단위 이송량만큼 후퇴하도록 하였다.

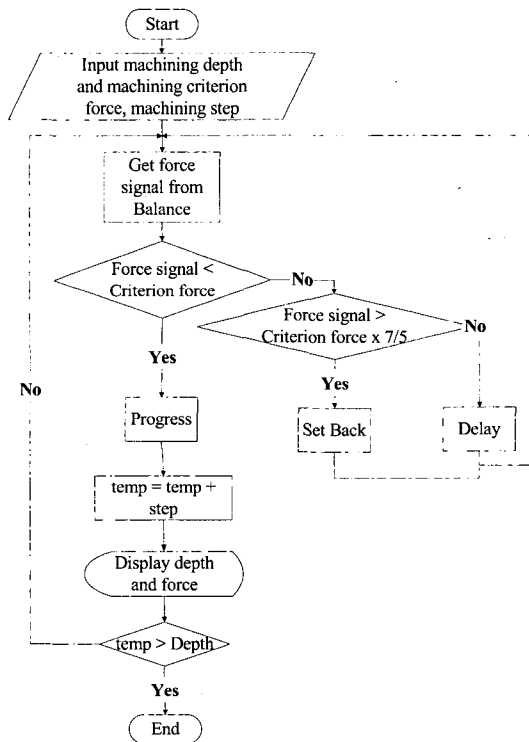


Fig. 2 Machining flow chart

이러한 가공 상태들을 기준으로 하여 가공이 진행되는 도중, 실시간으로 가공력을 받아서 가공 단계를 결정하고 입력된 가공 깊이만큼 가공된 후에는 가공이 중지되도록 하였다. 즉, 가공력 측정장치를 가공물 고정장치에 부착하고 신호처리장치를 통하여 이를 획득함으로써 가공상태에서 실시간 제어가 가능하도록 하였으며, 동시에 이들 신호를 저장장치에 저장함으로써 위치에 따른 가공

력과 가공 경과 시간을 측정하여 마이크로 초음파 가공특성을 해석할 수 있도록 하였다. 이러한 가공 Flow chart.를 Fig. 2 에 나타내었다.

4. 실험 장치

4.1 와이어 방전 가공장치(WEDM)

일반적인 방전가공은 공작물과 전극사이의 방전을 이용하여 전극의 형상을 전사시키는 형태로 공작물을 가공하는 방법이기 때문에 공작물을 가공하는 동시에 전극 또한 상대적으로 적은 양이지만 마모가 된다. 따라서 가공량이 많아지면 전극 마모로 인한 치수 오차가 있게 된다.^[8]

하지만 와이어 방전 가공은 전극대신 지속적으로 방전 전극의 역할을 하는 와이어를 공급하므로 전극 소모에 의한 가공 오차를 줄일 수 있다. 따라서 와이어 방전가공은 세밀한 가공량 제어가 가능하여 미세 축 가공에 적합한 방법이다. 이 실험에서는 지름 200 μ m 의 구리와이어를 사용하였다.

와이어 방전가공으로 마이크로 공구 가공 과정을 Fig. 3 에 나타내었다. 후에 마이크로 공구의 소재가 되는 공구재료를 붙이고, 공구 회전기구에 의해 공구재료를 초음파 진동자, 콘, 혼과 일체가 되게 하여 회전시키고, WEDM 에 의해 마이크로 공구를 제작한다.

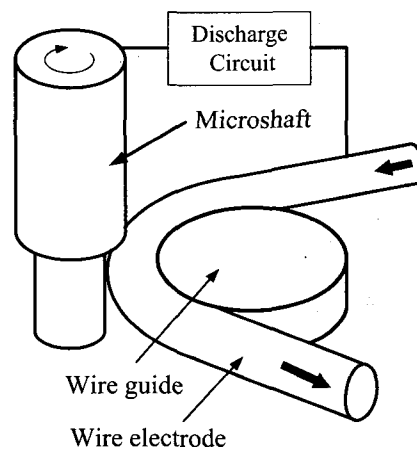


Fig. 3 WEDM process

4.2 마이크로 초음파 가공 주축

초음파 공구 회전부는 크게 공구 회전 주축부와 모터부로 나뉜다. 공구 회전부는 Z 축 테이블에 설치되어 있으며, 모터와 주축부는 커플링에 의해 연결되어 있다. 공구 회전 주축부와 내부 진동자는 절연되어 있다.

Fig. 4 에서 전원 연결부(Electrode ring)의 상단부는 공구와 연결되어 있고 하단부는 진동자의 음극과 연결되어 있다. 따라서 WEDM 가공 때에 상단부는 방전전원의 양극(+)으로서 역할을 하고, 초음파 가공 때에는 진동자의 양극에 연결되어 있다. 플라스틱 재질의 진동자 고정장치(Vibration adapter)는 진동자와 주축부를 절연시키는 역할을 하고, 동시에 주축부에 대한 진동자의 기울어짐을 수정하기 위한 screw bolt 구멍이 있다.

가공용 진동자는 일본 Fuji 사의 주파수 40kHz 를 사용하였고 진폭의 측정방법은 공구를 장착한 상태에서 진동자를 발진시켜서 가공물에 접촉시킬 때의 위치와 발진을 주지 않고 가공물에 접촉시킬 때의 위치 차이의 2 배를 진폭으로 생각하였다. 이 때 공구와 가공물의 접촉은 0.5 μ m 씩 Z 축을 이송 시 피드백된 가공력이 발생하는 위치로 하였다. 이 방법으로 측정한 공구 선단의 진폭은 7 μ m 이었다.

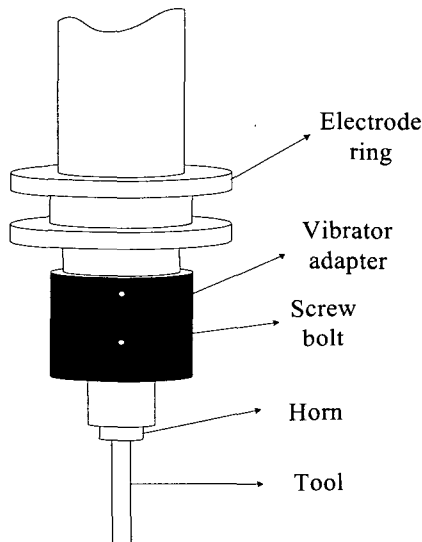


Fig. 4 Main rotating spindle

4.3 가공 이송 장치와 피드백

본 마이크로 초음파 가공기는 해상도 0.2 μ m 를 가지고 있는 ANORAD 사의 LW10 정밀테이블을 MEI(Motion Engineering Inc.)사의 모션 콘트롤 보드를 사용하여 3 축 이송 자유도를 갖도록 구성하였다. Z 축에는 초음파 진동자를 포함하고 있는 회전 스피ndl과 구동 모터를 장착했다. XY 이송 평면상에 미세 공구를 제작하기 위한 미세 와이어 방전 장치와 초음파 가공 시 사용하는 가공조 및 가공력 측정장치를 장착하였다. 이렇게 함으로써 WEDM 으로 미세공구 제작 시 공구의 길이를 Z 축, 공구의 직경은 X,Y 축을 사용하여 원하는 형상으로 가공하고, 초음파 가공 시 가공깊이는 Z 축,가공물 상의 가공위치는 X,Y 축을 사용하여 제어할 수 있도록 실험 장치를 구성하였다. 가공 장치의 개략도를 Fig. 5 에 나타내었고 가공력 피드백은 해상도 0.01gf 를 가지고 있는 Shimadzu 사의 Libor EB-220HU 를 사용하였다.

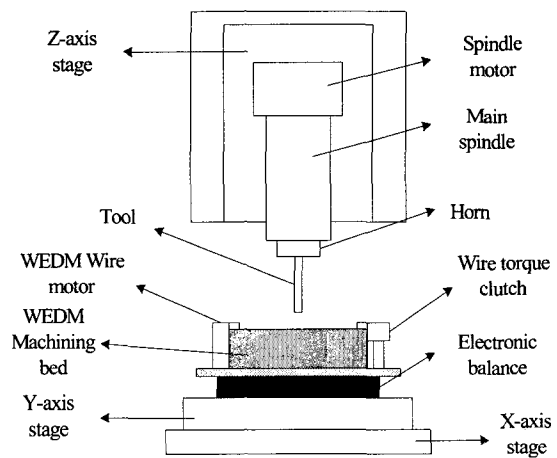


Fig. 5 Schematic diagram of MUSM

5. 마이크로 초음파 가공 특성 실험

5.1 가공 입자 크기 변화에 따른 가공 특성

가공 입자 크기에 따른 가공 특성을 살펴보기 위해서 5 가지 크기의 diamond 입자를 사용하였다. 그리고 가공공구는 WC 를 사용하였고 공구의 물성치와 실험조건은 Table 1 과 Table 2 에 각각 나타

내었다.

Table 1 Mechanical properties of tool

Element	WC (텅스텐카바이드)
Density (g/cm ³)	12.3
Hardness (HRA)	87.5
Young's modulus (KN/mm ²)	610

Table 2 Machining condition (1)

Workpiece material	Al ₂ O ₃ , thickness: 200 μm
Step feed	0.8 μm
Force criterion	3 gf
Slurry size	0~0.25 μm, 0~0.5 μm, 0~2 μm, 2~4 μm, 4~8 μm
Tool diameter	200 μm
Spindle rotation	Yes
Vibration frequency	40 kHz

각각의 구멍 가공을 하기 전에 와이어 방전 가공으로 공구를 동일한 크기로 재가공하였고 Fig. 6의 마모비는 가공한 깊이(시편의 두께)에 대한 공구의 길이 방향으로 줄어든 양이다.

길이 방향 마모는 가공조에 고정되어 있는 도체판과 공구가 통전되는 Z 축상의 절대 좌표를 가공 전과 가공 후 측정하여 그 차이로 하였다.

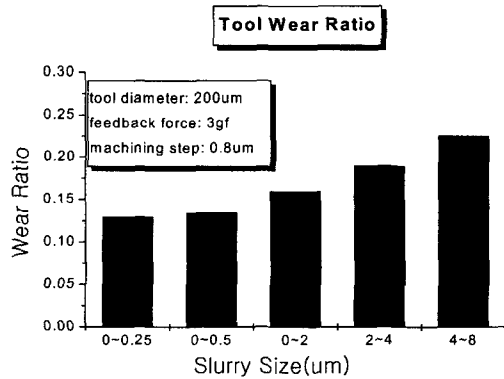


Fig. 6 Longitudinal tool wear ratio according to abrasive slurry

Fig. 6 에서 가공 마모율은 0~0.25μm 가공입자에서 가장 작고, 가공입자의 크기가 증가할수록

점진적으로 증가하고 있으며, 0~0.25μm 의 분포를 가지는 다이아몬드 입자를 사용하여 가공한 경우의 공구 마모율이 4~8μm 의 입자를 사용한 경우의 50%보다 적은 것으로 나타났다. 즉, 공구의 마모는 가공 입자의 크기에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이는 가공 입자가 공작물과 동시에 공구도 같이 마모시키기 때문이다.

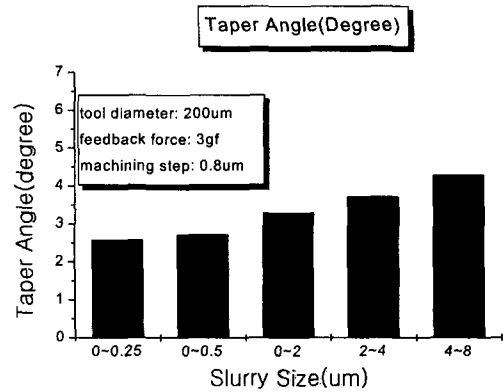


Fig. 7 Taper angle according to abrasive slurry

또한 가공된 구멍의 형상품질을 평가하기 위해 구멍의 입구측과 출구측 반지름 차이를 시편의 두께로 나눈 값의 tan⁻¹ 을 구멍의 테이퍼 각으로 정의하고 가공입자에 따라 측정하였다. 그 결과 가공입자의 크기가 증가할수록 테이퍼 각은 점점 커지고 0~0.25μm 크기에서 가장 작은 테이퍼 각을 가지게 된다.

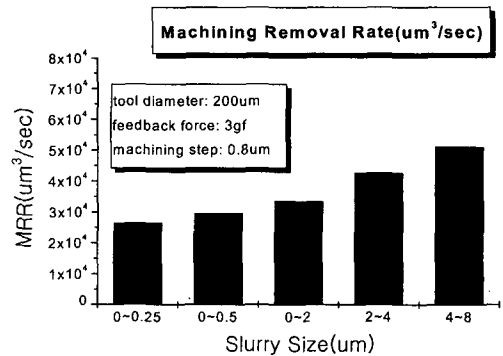


Fig. 8 Material removal rate according to abrasive slurry

필연적으로 구멍 가공시 공구는 길이 방향과 반경 방향 마모가 동시에 일어나게 되는데 가공입

자의 크기에 비례하여 각각의 마모량이 증가하게 된다. 하지만, Fig. 8 을 살펴보면 가공 입자가 커질수록 가공시간은 줄어들고 절삭률은 증가한다. 즉, 큰 가공입자를 선택하면 가공된 구멍의 형상 품질은 나빠지지만 가공시간과 절삭률에서 좋은 결과를 보인다.

5.2 축직경 변화에 따른 가공 특성

축의 직경이 변함에 따라서 초음파 가공의 특성중 길이 방향 공구 마모율이 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해서 5.1 의 실험에서 사용된 가공입자 크기 중에서 4~8 μm 를 사용하고 WC 공구의 직경을 변화시켜서 실험을 하였다. 사용된 조건은 Table 3 과 같다.

Table 3 Machining condition (2)

Workpiece material	Al ₂ O ₃ , thickness: 200 μm
Step feed	0.8 μm
Force criterion	3 gf
Slurry size	4~8 μm
Spindle rotation	Yes
Vibration frequency	40 kHz

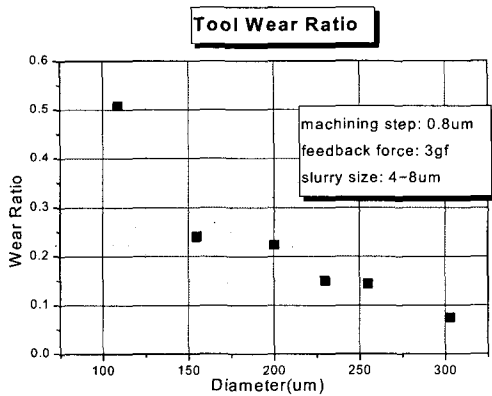


Fig. 9 Longitudinal tool wear ratio according to tool diameter

축 직경은 303 μm , 255 μm , 230 μm , 201 μm , 155 μm , 109 μm 인 공구로 실험을 하였고 그 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이때, y 축은 길이 방향 공구마모율로서 가공깊이에 대한 마모된 공구 길이 비이다. Fig. 9 에서 길이 방향 마모율은 공구의 직경이 줄어들수록 급격하게 증가하는 추이를 보인다. 일반

적으로 마이크로 구멍 가공시 공구에는 길이 방향 마모와 반경 방향 마모가 함께 생기는데, 반경 방향 마모는 공구와 가공물 사이에 위치한 가공 입자의 문지름 효과에 의해 발생하게 된다. 따라서 반경 방향 마모는 공구의 크기에 관계없이 가공입자의 크기에 따라 일정한 값을 가지게 되어서 공구의 직경이 작을수록 공구의 반경에 대한 반경 방향 마모량의 비는 커지게 된다. 그 결과 직경이 줄어든 공구는 가공면의 단위 면적 당 압력의 증가로 공구의 길이 방향 마모량이 증가하게 되며, 사용되는 공구의 직경이 작을수록 가공깊이 당 마모되는 공구량은 증가하게 된다.

5.3 가공 표면 고찰

가공 입자의 크기 별로 가공 표면의 대략적인 관찰을 하기 위해서 가공 시편 들을 붙인 다음, 두 시편의 중간 지점에 가공을 하였다. 공구의 직경이 커짐에 따라서 기준 가공력은 5 gf 로, 단위 이송량은 1 μm 로 설정하였다. 실험의 조건은 아래 Table 4 와 같다.

Table 4 Machining condition (3)

Workpiece material	Al ₂ O ₃ , thickness: 500 μm
Step feed	1 μm
Force criterion	5 gf
Slurry size	0~0.25 μm , 4~8 μm , 40~50 μm
Tool diameter	500 μm
Spindle rotation	No
Vibration frequency	40 kHz

다이아몬드 가공입자 크기 40~50 μm , 4~8 μm , 0~0.25 μm 로 가공된 구멍의 SEM 사진은 다음 Fig.10 (1)(2)(3)에 제시되어 있다.

이 사진들을 살펴보면 가공입자의 크기가 증가할수록 가공 표면은 거칠어짐을 알 수 있다. 이는 가공입자가 커질수록 단위 가공입자에 의해서 깨져 나가는 가공물체의 압입량이 증가하기 때문이다. 가공물의 표면이 깨어져 나가는 정도는 가공입자와 가공물의 경도에 따라 달라질 뿐만 아니라 가공압력에 의해 가공입자가 공작물에 압입되는 양에 따라 결정된다.

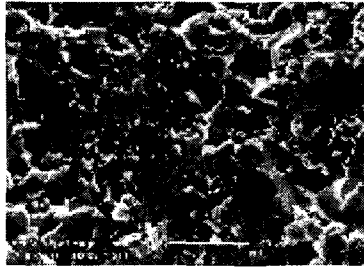


Fig. 10 (1) Machined surface with 40~50 μ m slurry

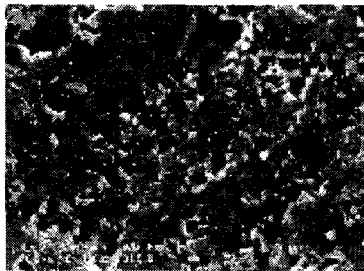


Fig. 10 (2) Machined surface with 4~8 μ m slurry



Fig. 10 (3) Machined surface with slurry less than 0.25 μ m

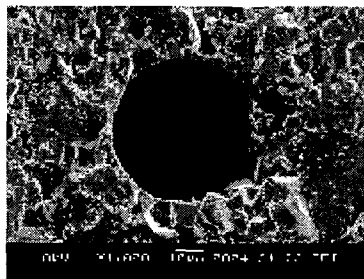


Fig. 11 Machining example

5.4 미세 구멍 가공 실례

본 연구에서 제안된 마이크로 초음파 가공기를 사용하여 가공된 미세 구멍 가공의 실례는 Fig. 11 에 나타내었다. 가공된 구멍의 직경은 45 μ m 이며 사용된 WC 미세 공구의 직경은 40 μ m 이었다. 이때 사용된 가공입자의 크기는 4~8 μ m 이고, 가공물은 알루미늄나 세라믹(Al_2O_3)으로 두께는 200 μ m 이다.

6. 결론

본 논문에서는 초음파 가공기를 구성하고 이를 사용하여 가공입자의 크기와 공구의 직경에 따른 초음파 미세 구멍 가공의 가공특성을 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

가공입자의 크기가 증가하면 축 방향 마모율과 구멍의 테이퍼 각이 증가하지만 가공 시간은 감소하고 절삭률은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 보다 작은 크기의 미세 구멍을 가공하기 위하여, 작은 직경의 미세 공구축을 사용하는 경우에는 공구의 직경이 감소함에 따라서 길이방향 마모율이 현저하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 초음파를 이용하여 미세 구멍 가공시 공구의 길이 방향 마모율을 줄이는 연구가 수행되어야 한다.

후 기

이 논문은 1998 년도 “한국학술진흥재단”의 지원에 의하여 연구되었음(KRE-98-018-E00131).

참고문헌

1. V.Soundrarajan, V.Radhakrishnan “An Experimental Investigation on The Basic Mechanisms Involved in USM,” Int.J.Mach.Tool Des.Res., Vol. 26, No. 3, pp. 307-321, 1986.
2. M.Komarariah, P. Narasimha Reddy “Relative Performance of Tool Material in Ultrasonic Machining,” Wear, pp. 1-10,1993.
3. M.Komarariah, “A Study on The Influence of Workpiece Properties in Ultrasonic Machining,” Int.J.Mach.Tools Manufact.,Vol. 33, No.3, pp. 495-505, 1993.
4. G..S.Kainth, Amitav Nandy, Kuldeep Singh, “On

- The Mechanics of Material Removal in USM,” Int. J. Mach. Tools Des. Res. Vol. 19, pp. 33-41,1979.
5. Xi-Qing Sun, T. Masuzawa, “Micro Ultrasonic machining and Self-Aligned Multilayer Machining/Assembly Technologies for 3D Micromachines,” University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106, Japan
 6. Kai Egashira, T.Masuzawa, “Application of Ultrasonic machining to Micromachining,” Seisan-Kenkyu, Vol. 49, No. 9
 7. M.Komaraia, M.A.Manan, “Investigation of surface roughness and accuracy in Ultrasonic Machining,” Precision Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 59-65, 1988.
 8. 주종남, 김규만, 박상신, 김성윤, “미세방전가공 기술개발에 관한 연구,” 산업기술 기반과제 최종보고서, 1998.