

미세 축 · 구멍 가공을 위한 미세방전가공기의 개발

김 규 만* , 최 덕 기** , 주 종 남***

Development of Micro-EDM Machine for Microshaft and Microhole Machining

G.M. Kim* , D.K. Choi** , C.N. Chu***

ABSTRACT

Recently, the needs of machining technologies of very small parts have been increasing with advent of micro-revolution. These technologies have mostly used the method applied to semi-conductor production process such as LIGA, etc. But they have serious difficulties to settle down in terms of workpiece materials, machining thickness, 3-dimensional structure. Therefore, micro-machining technology using EDM(Electrical Discharge Machining) was proposed. It is very difficult to machine the micro-parts (microshaft, microhole) using conventional machining. Micro-machining using EDM can machine the micro-parts easily because it requires little machining force. This MEDM(Micro-EDM) need the capabilities to move a electrode and control a discharge energy precisely, and the gap control strategy to maintain the optimal discharge condition is necessary. Therefore, in this study, the new EDM machine with high precision motion stage and high-performance EDM device was developed. Using this MEDM machine, we have machined microshaft and microhole with various shapes and sizes.

Key Words : Micro-EDM(미세 방전가공기), micro-parts(미세부품), microshaft(미세축), microhole(미세구멍), gap control(간극제어)

1. 서 론

보다 정밀하고 고기능을 가지는 제품에 들어가는 각종 소형부품들의 정밀한 가공을 위해서는 마이크로가공기술의 개발이 우선적으로 필요하게 되었다. 현재 0.3mm이하의 형상치수를 가지는 홈, 구멍, 축 등의 기본 가공공정에 대한 요구는 증가하고 있는 추세이나 범용 기계는 가

공능력의 한계를 보이고 있으므로 특수한 가공기술의 개발이 활발히 이루어졌다. 이들 연구중 대부분은 반도체 제작공정을 응용한 가공이 주류를 이루어 왔다. 그러나 이러한 방법은 미소한 패턴을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있으나 가공 가능한 재료와 두께에 한계를 보였다. 따라서 다양한 3차원적인 구조를 가공하는 데에는 또 다른 가공법을 필요로 하게 되었으며, 미세방전 가공기술은 이를

* 서울대학교 대학원 기계설계학과
 ** 강릉대학교 정밀기계공학과
 *** 서울대학교 기계설계학과

극복하기 위하여 개발된 방법 중의 하나이다.

미세방전가공은 기존의 방전가공기술을 응용하여 단발 방전에너지의 극소화, 정밀화된 위치 결정, 방전주기의 극소화 등을 수행함으로써 형상치수가 수십 μm 에서 수백 μm 에 이르는 3차원 부품을 가공하는 기술로써, 재료의 제한이 적고 비교적 강성이 크고 다양한 형상을 지닌 3차원 구조물을 손쉽게 가공할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

미세방전을 이용한 미소구멍가공에 대한 연구는 일본을 중심으로 활발하게 이루어져 왔다. Masuzawa 등은 와이어 방전연삭(WEDG)을 제안하고, 이를 이용하여 미세 축을 가공하고 이를 다시 전극으로 사용하여 미세 드릴링에 이용하는 방법을 개발하였다.^(1,2,3) Mohri 등은 와이어 방전에 사용되는 와이어 전극을 피에조 액추에이터를 사용하여 직접 이송함으로써 0.1mm에서 0.5mm까지 미세구멍을 드릴링하는 방전가공기를 개발하였다.⁽⁴⁾ Higuchi 등도 역시 피에조 액추에이터를 이용한 충격이송장치(impact drive system)를 개발하여 와이어 전극을 직접 이송시킴으로써 방전 드릴링을 수행하는 장치를 개발하였다.⁽⁵⁾ Mohri와 Higuchi 방법은 가공용 전극으로 와이어방전용 와이어 전극을 사용함으로써 전극 가공에 따른 시간을 줄일 수 있어 실용적이다 하겠으나 와이어 전극의 형상치수 한계 때문에 극미세구멍의 가공에는 한계를 보이고 있다. 본 연구에서는 와이어 방전연삭법을 이용한 미세방전 가공장치를 개발하고 이를 이용하여 미세축, 미세구멍 및 여러 형상의 구멍을 가공하였다.

2. 와이어 방전연삭

방전가공이 진행됨에 따라 가공물뿐만 아니라 전극 또한 역으로 가공되어 전극소모가 발생한다. 전극소모는 가공물의 형상오차에 직접적인 영향을 주며, 특히 가공물의 크기가 작은 경우에는 상대적으로 그 영향은 증가하게 된다. Masuzawa는 이와 같은 전극소모를 없애기 위하여 와이어 방전연삭법(WEDG)을 제안하고, 이를 미세축가공에 적용하였다.⁽¹⁾ Fig.1은 와이어 방전연삭의 원리를 보이고 있다. 방전가공은 와이어 가이드를 따라 일정한 속도로 움직이는 와이어 전극과 가공물 사이에서 발생한다. 가공 중에 와이어 전극은 계속적으로 공급되므로 전극소모의 영향을 무시할 수 있다. 또한 방전영역이 좁으므로 미세가공이 용이하므로 편케이지 등의 미세축 가공에 응용될 수 있다. 본 연구에서는 미세축 및 미세구멍 가공용 전극의 제작을 위하여 와이어 방전연삭법을 사용하였다.

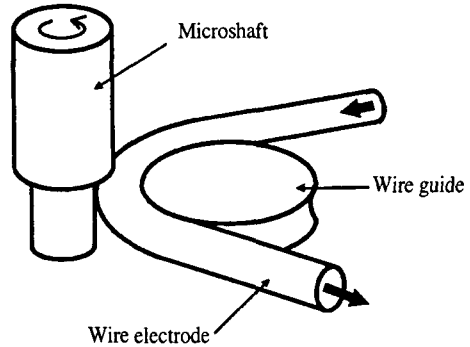


Fig. 1 Principle of WEDG

Fig.2는 본 장치의 구조도를 보이고 있으며, Fig.3은 장치의 본체를 나타내고 있다. 가공기는 와이어 방전연삭(WEDG, Wire Electro Discharge Grinding)과 방전

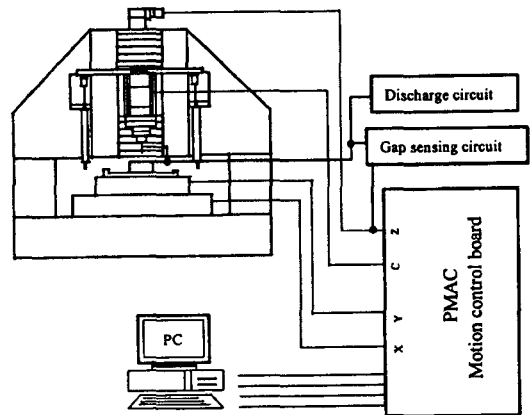


Fig. 2 Schematic Diagram of Machine

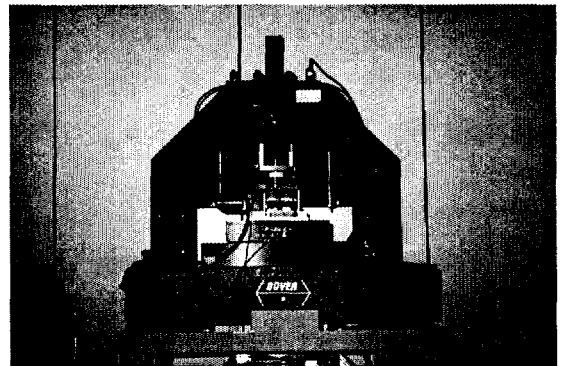


Fig. 3 Micro-EDM Machine

드릴링 등을 수행하기 위하여 X, Y, Z축과 C축(주축 회전축)의 4축을 제어하였으며 제어용 보드로는 Delta tau사의 PMAC 보드를 사용하였다. 이송정밀도를 높이기 위하여 X, Y, Z, C축 모두 정압 공기슬라이드를 채택하였다.

X축, Y축의 구동모터로는 리니어 직류모터(linear DC motor)를 사용하였다. 위치결정 정밀도를 높이기 위하여 리니어 스케일을 사용한 페루프 위치제어를 하고 있다. 두 축의 축분해능(axis resolution)은 모두 $0.02\mu\text{m}/\text{count}$ 이며 최대 스트로크(stroke)는 100mm이다.

Z축은 위치결정을 위한 제어뿐만 아니라 가공중의 방전상태의 제어기능도 포함해야 한다. 따라서 보다 정밀한 이송제어가 필요하므로 $0.01\mu\text{m}/\text{count}$ 성능의 리니어 스케일을 이용하여 페루프 위치제어를 한다. 방전가공상태를 최적으로 유지시키기 위하여 방전회로의 간극전압을 측정하여 Z축 제어신호로 사용하였다. 최대 스트로크는 100mm이고, 구동은 직류서보모터(DC servo motor)와 리드스크류(lead screw)를 사용하여 수행된다.

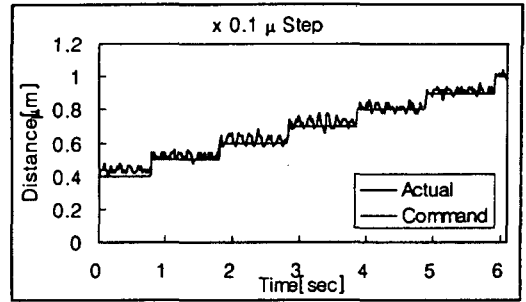
C축은 회전속도와 각도의 설정에 필요하며 로터리 엔코더와 직류서보모터를 사용하여 회전을 제어한다. 각도 분해능은 2048 counter/degree이며 최고회전수는 25000 rpm이다.

3. 주요부의 설계 및 평가

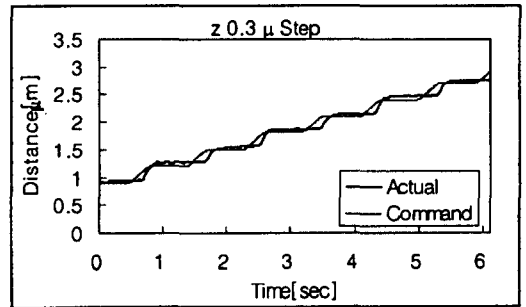
3.1 위치결정 및 이송부

가공기에 사용되는 각 축의 이송정밀도를 테스트하기 위하여 스텝이송시 명령위치와 실제위치를 측정하였다. 스텝의 거리를 $0.5\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$, $0.1\mu\text{m}$, $0.05\mu\text{m}$ 로 변화시키면서 이송속도 $0.1\text{mm}/\text{sec}$, 가속시간 1 msec으로 이송한 후에 1초간 정지상태를 유지하고 다시 이송함을 반복하면서 위치를 측정하였다.

Fig.4는 X축과 Z축의 이송정밀도를 측정한 결과이다. X축의 경우, 스텝이송량 $0.3\mu\text{m}$ 까지는 양호한 명령 추종 특성을 보이다가 스텝 이송량 $0.1\mu\text{m}$ 에서 미소한 떨림이 발생하였다. 그 이하의 스텝 이송량에서는 이러한 떨림은 계속 나타나며 그 폭은 $0.1\mu\text{m}$ 에서의 경우와 같았다. 즉, 이 오차는 외부에서 오는 진동으로 생각할 수 있으며 이송한계는 $0.1\mu\text{m}$ 로 판단할 수 있다. Y축에서도 이와 같은 경향을 보이고 있다. Z축은 $0.3\mu\text{m}$ 까지는 정확한 추종을 보였다. 하중에 의한 영향으로 미소한 정적 위치오차와 지연현상을 보이고 있으나 가공에는 영향이 없을 것으로



a) X axis



b) Z axis

Fig. 4 Result of Step Feeding Test

판단된다. 테스트 결과 이송시스템의 위치결정 및 이송특성은 만족스러운 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

3.2 주축부

전극을 회전시키면 가공하는 동안에 전극성분이 공작물에 부착되는 것을 줄여줄 뿐만 아니라 탄소 및 가공분 등 가공부산물의 배출을 쉽게 함으로써 보다 안정된 방전을 가능하게 한다. 가공시 공작물과 전극간의 간극은 수 μm 이므로 주축부의 회전정밀도는 중요하다. 따라서 본 장치에서는 정압공기주축(static air spindle)을 채택하였다. 회전정밀도는 $0.05\mu\text{m}$ 이내이고 최고회전수는 25000rpm이다.

3.3 와이어 가이드 및 와이어 주행장치

와이어 가이드를 따라 와이어 전극을 안정한 속도로 주행시키는 것은 안정된 방전을 일으키는 데에 중요하다. 와이어 주행장치의 구조도는 Fig.5와 같다. 와이어 전극은 직류유도모터로 구동되어 와이어 송출부 롤러로부터 롤러 가이드와 와이어 가이드를 통하여 주행된다. 주행속

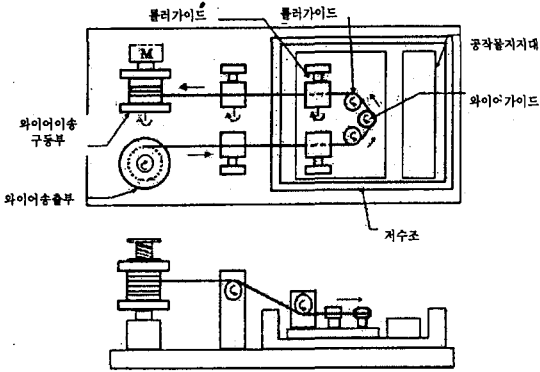


Fig. 5 Wire Electrode Driving Device

Table 1 Machining Conditions and Materials used in Experiment

Material	Electrode	Shaft machining	Hole machining
	Work-piece	Brass wire	WC alloy
Discharge circuit	E	100 V	
	R	1 kΩ	
	C	varies	
Spindle speed		600 rpm	
Feed speed		5 μm/sec	

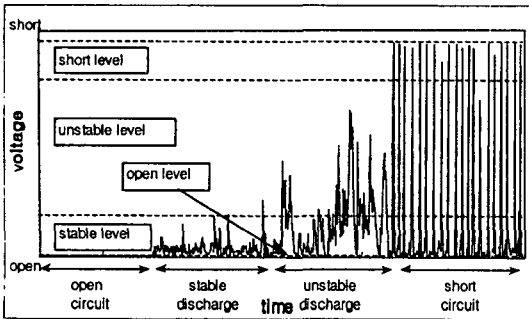


Fig. 6 Variation of Gap Voltage according to Discharge Condition

도는 40mm/min를 유지하였으며 송출부 플러에는 마찰 디스크를 장착하여 일정한 장력을 유지하였다. 와이어 가이드의 재질로는 내마모성이 강한 SKD11을 사용하였다.

3.4 방전회로

미세구조의 방전가공에서는 단발 방전에너지를 최소화하여 단발 방전가공으로 인한 제거량을 작게 하고, 대신 펄스 폭을 작게 하여 주파수를 높임으로써 가공속도를 빠르게 한다. 이러한 이유로 본 장치는 방전 전원회로로 소형가공기에 널리 사용되는 RC회로를 사용하였다. 또한 가공효율을 높이기 위해서는 가공중 최적방전상태를 유지시키는 것이 필요한데 이것은 공작물과 전극간의 간극을 일정하게 유지시킴으로써 이룰 수 있다. 이를 위해서 공작물과 전극간의 간극측정회로를 이용하여 간극전압을 측정하고 이 신호를 Z축에 입력하여 제어함으로써 간극의 단락을 피하고 가공중 일정한 간극을 유지하도록 하였다. 방전가공중에 발생하는 방전상태는 Fig.6에서 보듯이 방전현상이 안정적으로 이루어지는 안정영역(sta-

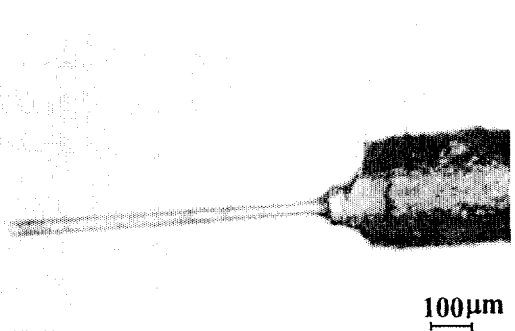


Fig. 7 Example of Machined Microshaft (Diameter 40μm, Length 900μm)



Fig. 8 Example of Machined Microshaft (Diameter 10μm, Length 300μm)

ble charge)외에 불안정영역, 전극과 공작물이 붙는 단락영역(short circuit), 방전이 이루어지지 않는 오픈영역(open circuit)등 4가지로 구별할 수가 있다. 본 시스템은 안정영역에서 지속적인 방전가공이 진행됨으로써 최대가공효율을 얻을 수 있도록 간극을 제어하였다. 즉, 간극의 상태변화에 따른 방전상태를 간극전압 측정회로에서 감지함으로써 신속하게 안정영역을 유지할 수 있도록 간극제어 알고리즘을 개발하였다.

4. 가공 실험

개발된 가공기를 이용하여 미세축의 가공, 미세구멍의 가공 및 여러가지 형상을 갖는 구멍의 가공실험을 수행하였다. 실험에 사용된 재질 및 가공 조건은 Table.1과 같다.

Fig.7은 직경 40 μm , 길이 900 μm 의 미세장축을 가공한 예를 보이고 있다. 우선 직경 100 μm , 길이 1000 μm 의 형상으로 황삭가공을 수행하고, 이를 다시 직경 40 μm , 길이 900 μm 로 정삭 가공하였다. 축전용량은 1000pF(황삭), 100pF(정삭)을 사용하였다.

Fig.8은 직경 10 μm , 길이 300 μm 의 미세축을 가공한 예를 보이고 있다. 우선 직경 100 μm , 길이 500 μm 의 형상으로 황삭가공을 수행하고, 이를 다시 직경 10 μm 로 정삭 가공하였다. 축전용량은 1000pF(황삭), 100pF(정삭)을 사용하였다. 절연액으로 백등유를 사용하였기 때문에 가공 후 절연액에서 분해되어 생긴 탄소가 끝단 부분에 묻어 있는 것을 관찰할 수 있고, 원재료 부분에는 역시 탄소가 심하게 묻어서 응고되어 있다. 가공물의 직진도는 양호함을 알 수 있다.

Fig.9는 직경 20 μm , 깊이 50 μm 의 미세구멍을 가공한 예를 나타내고 있다. 초경합금봉을 가공하고 이를 전극으로 이용하여 스텐레스강(SUS 304)에 가공하였다. 극성은 봉전극을 음, 가공물을 양으로 사용하였다. 축전용량은 50pF를 사용하였다. 작은 축전용량으로 가공하였기 때문에 구멍내부의 표면거칠기는 양호하며 구멍입구 주위에는 가공시 배출된 가공 부산물이 있음을 알 수 있다. 구멍의 경계부분은 깨끗하게 가공된 것을 볼 수 있다.

Fig.10은 황동에 직경 30 μm , 깊이 200 μm , 가공깊이 대 직경비 (aspect ratio) 6의 미세구멍을 가공한 예를 보이고 있다. 극성은 앞의 경우와 같으며, 축전용량은 10pF를 사용하였다.

Fig.11은 두께 100 μm 인 황동판에 사각형과 삼각형 구멍을 관통한 사진이다. 삼각형의 변 길이는 100 μm 이고

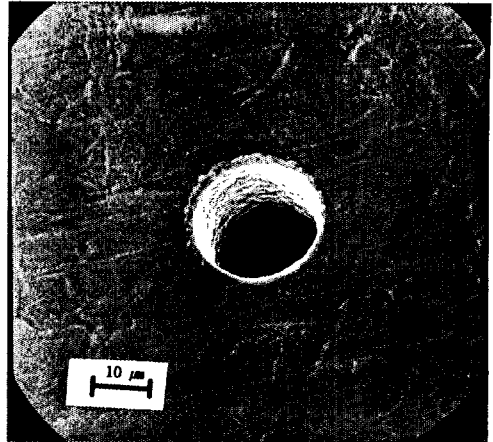


Fig. 9 Machined Microhole
(Diameter 20 μm , Depth 50 μm , SUS304)

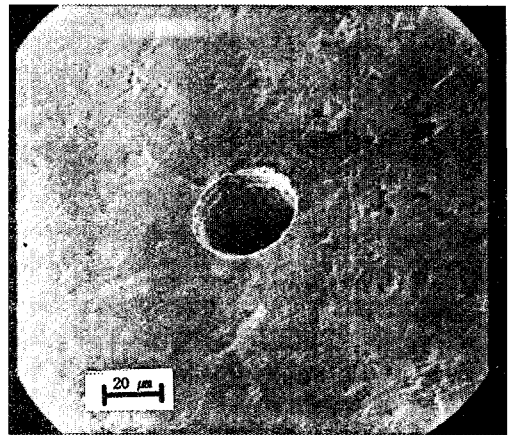


Fig. 10 Machined Microhole
(Diameter 30 μm , Depth 200 μm , Brass)

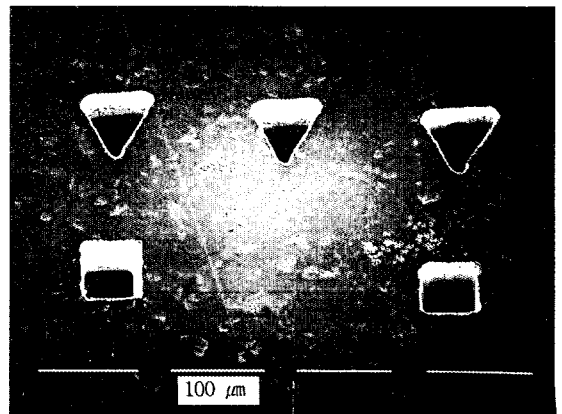


Fig. 11 Machined Micro polygon hole

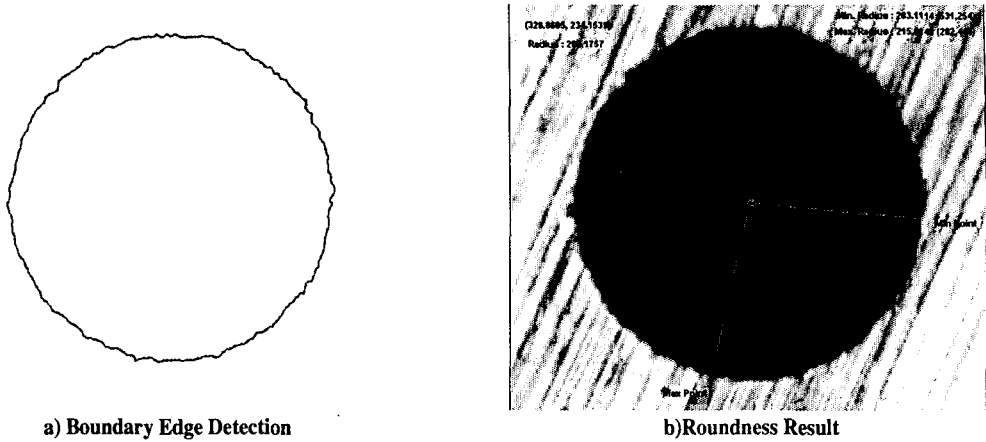


Fig. 12 Example of Roundness Measurement

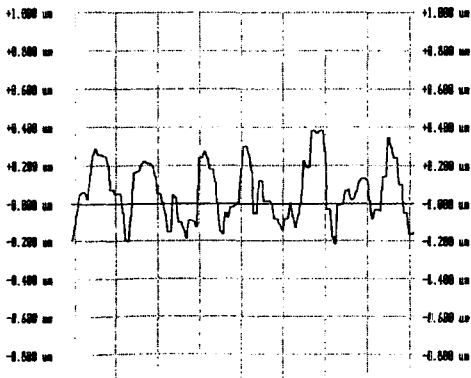


Fig. 13 Surface Roughness Profile

사각형구멍은 140 μm 이다. 전극은 주축을 고정시키고 한 면을 방전가공한 후 주축을 일정한 각도로 회전시키고 가공을 반복한다.

5. 가공정밀도 측정

가공물의 표면거칠기와 진원도를 측정하였다. 미소구멍 안쪽의 형상을 측정할 수 있는 측정기는 아직 없고, 다만 형상측정 방법만이 제안되어 있는 실정이다⁶⁾. 따라서 미소구멍의 경우 입구측의 현미경 사진을 통한 진원도의 간접 측정만이 가능하였다. Fig.12는 직경 100 μm 인 미소구멍의 진원도를 측정한 결과 사진이다. 구멍 입구를 현미경으로 촬영한 후에 가장자리부를 흑백으로 구분하여 측정하였다. 측정 결과 최대 형상오차는 2.8 μm 였다. 구멍 입구 주위에는 용융금속이 배출되면서 응고되거나 가공

중 발생한 탄소가 묻어 있을 수 있는데, 현미경으로 촬영하는 경우 이들이 구멍 내부와 구별이 되지 않아서 마치 구멍 내부로 인식되어 진원도가 실제보다 나쁘게 측정될 수 있다. 따라서 실제 구멍의 진원도는 측정된 값보다 좋을 것으로 추측된다. 가공물의 표면거칠기는 미소구멍의 경우 측정이 불가능하므로 미소측에서 표면거칠기를 측정하였다. Taly Surf를 사용하여 측정한 결과 0.6 μm Rmax였다. Fig.13은 측정된 표면의 프로파일(profile)을 보이고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 형상치수 300 μm 이하의 미소형상물의 가공을 목적으로 미세방전가공을 이용한 가공시스템을 개발하였다.

이를 위하여 지령단위 0.02 μm 의 이송시스템을 부착하고 테스트를 수행한 결과 0.1 μm 이내의 이송정밀도를 확보하였음을 확인하였다. 또한 와이어방전연삭을 이용하여 직경 10 μm 의 극미세축을 가공하였으며 미세장축 및 여러 가지 형상의 미세축 가공을 수행하였다. 미소구멍의 경우 직경 20 μm 의 극미세구멍과 깊이 대 직경비 (aspect ratio) 6, 직경 30 μm 인 미세장공과 그 이외의 여러가지 형상을 갖는 구멍의 가공이 가능함을 실험에 의하여 확인할 수 있었다. 형상정밀도 측정 결과, 직경 100 μm 기준 시 진원도 2.8 μm 이내, 표면거칠기 0.6 μm 이내의 미소측 및 미소구멍의 가공이 가능하였다.

본 연구에서 제시된 가공기술을 사용하면 기존의 가공

으로는 불가능했던 직경 100 μ m 이하의 미세구멍 가공과 미세축 가공분야에 있어서 활발한 응용이 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 통상산업부와 과학기술처 및 정보통신부에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발 결과이다.

Reference

1. T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi, "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining," Annals of the CIRP, Vol. 34, pp. 431-424, 1985.
2. T. Masuzawa, J. Tsukamoto, M. Fujino, "Drilling of deep microholes by EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 195-198, 1989.
3. T. Masaki, T. Masuzawa, "Micro electro discharge machining and its application," IEEE, pp. 21-26, 1990.
4. N. Mohri, H. Morita, N.saito, "Development of an electrical discharge drilling device by using a new method for direct drive of electrode," JSPE, Vol. 58, No. 12, pp. 2063-2068, 1992.
5. T.Higuchi, K. Furutani, et.al, "Development of pencil size electro-discharge machine," JSPE, Vol. 57, No. 5, pp. 910-916, 1991.
6. T. Masujawa, B. J. Kim, C. Bergaud, M. Fujino, "Twin-probe vibroscanning method for dimensional measurement of microholes," Annals of the CIRP Vol. 46, No. 1, pp. 437-440, 1997.