

〈論 文〉

미세구멍의 방전가공에 관한 연구

윤 재 응* · 양 민 양**

(1990년 5월 28일 접수)

A Study on Micro-Hole Drilling by EDM

Jae Woong Youn and Min Yang Yang

Key Words : Micro-Hole Drilling(미세구멍가공), Ultrasonic-Assisted Chemical Machining(초음파화학가공), Electro-Discharge Machining(방전가공), Electrode(전극봉), Taper(경사도), Electrode Wear(전극마멸), Electro-Chemical Reaction(전기화학적반응)

Abstract

Micro-hole drilling by EDM and production of fine rods for the tool electrode or other purpose have become very important in industry. This paper suggests a new method for production of very fine rods by ultrasonic-assisted chemical machining and describes the machining characteristics of micro-hole drilling by EDM. For fine rods, copper wires of initial diameter of 250 μ m are used and successfully machined into a diameter of less than 30 μ m with good repeatability. The ultrasonic agitation not only accelerated the material removal rate uniformly, but also produced smooth surfaces of fine rods. To drill the micro-hole, kerosene and pure water is used as a dielectric. From the experiment, water is superior to kerosene with respect to surface roughness of inlet and outlet of hole and machined surface as well as electrode wear. However, due to the electrochemical reaction of water, small pits are remained on the workpiece surface.

1. 서 론

미세구멍(micro-hole)은 터빈 엔진의 노즐에 주로 사용하였는데 최근에는 점차 그 사용이 증대되어 프린터의 잉크젯트 노즐, 그래픽 화면 처리를 위한 전자 총, 고속 컴퓨터의 마이크로 연결부, 위성 송신에서의 광학 부품 등에 사용되고 있다. 특히, 내열 니켈 합금과 같은 고강도 재료가 주종을 이루는 항공기 엔진부의 미세 구멍을 가공할 때에는 일반적인 방법의 드릴 가공이 거의 불가능하다. 따라서 이러한 미세 구멍의 가공방법은 주로 특수

가공을 이용하는데 그 중에서도 방전 가공은 가장 많이 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 한편, 방전가공을 이용한 미세 구멍가공에서 가장 중요한 두가지의 문제는 첫째, 전극봉(electrode)의 제작과, 둘째는 방전 가공을 이용하여 100 μ m 이하의 미세한 구멍을 어떻게 가공할 것인가에 대한 문제이다.

기존의 연구에서 전극을 제작했던 방법으로는, 상품화되어 있는 동선(copper wire)을 그대로 사용하거나^(1,2), 혹은 아르곤가스 속에서 열을 가하는 동시에 두꺼운 전극에 인장력을 주어 구리와 텅스텐 전극을 제작하기도 하였다⁽³⁾. 그러나 보통 가장 많이 사용되는 방법으로서 100 μ m이하의 구멍 가공용 전극으로서 뿐만 아니라 잉크젯트 프린터의

*한국과학기술원 생산공학과

**정회원, 한국과학기술원 생산공학과

헤드 부분등과 같이 다른 특수한 용도로 원통형의 봉(rod)이 필요한 경우에는 블록 전극(block electrode)을 이용하여 방전가공 하는 것이다. 그러나 이 방법은 많은 문제점을 가지고 있어 이를 보완한 방법이 Masuzawa⁽⁴⁾ 등에 의해 개발되었는데 이는 WEDG(Wire Electro-Discharge Grinding)를 이용하는 것으로 비교적 정확하고 가는 전극을 제작 하였다.

한편, 미세구멍가공에 관해 연구된 바로는 Kholodnov⁽⁵⁾가 오버컷에 대한 capacitance의 영향을 연구하였고, Jeswani⁽¹⁾는 방전 전압, capacitance, 전극의 지름 그리고 구멍의 깊이에 대한 오버컷의 실험식을 정의하였다. 또한, Kagaya⁽³⁾ 등은 100 μ m 이하의 미세한 구멍을 가공할 때 방전액으로서 물이 좋다고 주장하였다. 끝으로 Sato⁽⁶⁾ 등은 역시 100 μ m 이하의 미세 구멍을 가공할 때 전극을 회전 시킴으로써 가공 속도를 두배 이상 증가시킬 수 있음을 증명하였다.

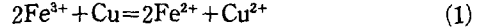
본 연구에서는 초음파 화학 가공(ultrasonic-assisted chemical machining)을 이용하여 100 μ m 이하의 전극봉을 제작하였고 제작한 전극을 이용하여 미세구멍을 방전가공함으로써 가공특성을 파악하고, 방전액을 각각 등유(kerosene)와 물로하여 구멍의 표면을 비교, 분석하였으며 전극의 지름, 가공물의 두께에 대한 오버컷과 경사도(taper) 그리고 전극의 마멸을 조사하였다.

2. 본 론

2.1 전극봉의 초음파 화학가공

미세구멍의 방전가공에서 전극은, 가공조건이나 가공물의 재질에 따라, 주로 텅스텐과 구리가 사용된다⁽²⁾. 본 연구에서는 전극의 재료로서 동선(copper wire)을 사용하였다. 먼저 동선으로 부터 화학 가공을 통해 가는 전극을 얻기 위해 에칭액(etchant)으로서 염화철(ferric chloride, FeCl₃+H₂O)을 사용하였다.

화학에칭과정(chemical etching process)은 금속이 에칭액과 화학반응을 일으켜 용해(dissolution) 되는 것으로서 용해된 입자는 확산에 의해 표면으로부터 외부로 전달된다. 따라서 가공의 전체적인 공정은 화학반응과 확산이 좌우하게 된다. 한편, 구리와 염화철은 다음과 같이 반응한다⁽⁷⁾.



위 식으로 부터 알 수 있듯이 화학 가공은 가공을 하는데 있어서 어떤 역학적인 작용이나 과도한 열 등이 작용하지 않고 물질을 분자 단위로 제거할 수 있을 뿐만 아니라, 초음파를 이용한 에칭액의 미세한 요동(agitation)으로 인하여 화학 반응에 의한 부산물(smut or scum)을 균일하게 제거함으로써 보다 매끄러운 표면을 얻을 수 있다.

확산 경계층 이론(diffusion boundary layer theory)을 이용하여 그 공정을 모델링한 결과는 다음과 같다⁽⁸⁾. D_0 를 동선의 초기 지름이라 하고 D_f 를 임의의 시간 t 가 지난 후의 지름이라 하면 시간의 변화에 대한 동선의 지름 변화식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{8}D_f^2 \log(1+2\delta/D_f) - \frac{1}{8}D_0^2 \log(1+2\delta/D_0) + \frac{\delta}{4}(D_f - D_0) - \frac{\delta^2}{2} \log\left(\frac{D_f+2\delta}{D_0+2\delta}\right) = -K^*t \quad (2)$$

식 (2)는 시간의 경과에 따른 동선의 지름 변화를 나타내는 식으로서, 평판에서의 반응이 시간에 따라 일정하게 일어나는데 비해 원통(cylinder) 형태의 동선은 지름이 시간에 대해 비선형적으로 감소함을 알 수 있다. 여기에서 확산경계층두께(diffusion boundary layer thickness) δ 와, 공정이 진행되는 속도를 나타내는 상수 K^* 가 미지수로 되어 있는데 K^* 는 에칭액의 농도나 온도 그리고 그 밖의 외부 조건에 따라 변하는 상수로서 단위길이당의 MRR(Material Removal Rate)을 의미하며, Habu⁽⁹⁾에 의하면 확산경계층의 두께는 에칭액의 농도에 무관한 상수이다.

2.2 미세 구멍의 제반 특성

방전가공을 이용하여 미세구멍을 가공할 경우에는 일반적인 방전가공의 경우와 같이 방전 에너지, capacitance 그리고 절연액동의 영향을 많이 받게 된다. 방전에 의해 피삭재의 표면에 생긴 크레이터의 크기는 방전의 에너지에 의해 결정되므로 미세구멍 가공 시 구멍의 오버컷, 입출구의 표면 상태 등에 영향을 끼치게 된다. Capacitance를 전원에서의 저장요소로 사용할 때 capacitance의 크기는 미세 구멍가공시 가장 중요한 변수중 하나로서 구멍의 오버컷의 크기를 좌우한다. 끝으로 방전가공 중 절연액은 구멍 입출구의 표면 상태, 구멍의 원

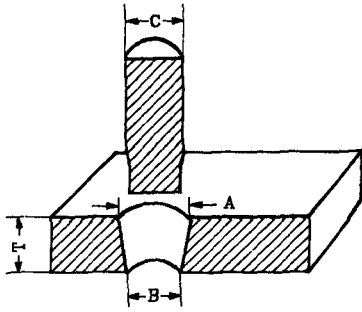


Fig. 1 Schematic diagram for overcut and taper

형성, 가공 시간 그리고 전극의 마모율등에 영향을 준다.

일반적으로 미세구멍의 특성은 다음과 같이 정의하고 그 가공성을 평가한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 방전가공에 의해 생성된 구멍의 형태는 방전 길이 만큼의 오버컷이 발생하고, 구멍의 크기가 입구쪽이 출구쪽보다 더 커져 전체적으로 구멍은 경사지게 된다.

- (1) 오버컷 = $(A - C) / 2$
- (2) 경사도(taper) = $(A - B) / T \times 100(\%)$
- (3) 세장비(depth to diameter ratio) = T / C

미세구멍의 평가 기준으로서 먼저 오버컷이 작아야 하고, 경사도가 작아야 하며, 큰 세장비 그리고 입구와 출구의 원형성 및 매끄러운 표면등이 요구된다.

3. 실험

화학가공을 위한 실험장치는 전극을 제작하기 위한 다른 방법에 비해 간단하여 에칭액의 요동(agitation)을 일으키기 위한 장치만이 별도로 필요할 뿐이다. 화학가공에서는 농도와 온도등의 변수에 대해 부식속도가 매우 크게 변동하므로^(9,10) 본 연구에서는 용액의 농도를, 부식속도와 표면 상태를 감안하여 500g/l로 일정하게 하고 용액의 온도는 상온(20°C)으로 하였다.

한편, 단면이 정확하게 원형이고 길이방향으로 균일한 원통형의 전극봉을 제작하기 위해 미세한 용액의 요동이 필요하였으므로 출력 50W, 40kHz의 주파수로 미세하게 진동하는 초음파 발생기를 사용하였다. 한편, 전극의 재료로서 초기 지름이 250 μ m인 구리 전선을 사용하였으며 전극의 강성

과 클램핑문제를 해결하기 위하여 전극은 몇개의 단(step)이 진 형태로 가공하였다. 전극의 지름은 현미경의 렌즈에 부착된 렌즈 마이크로미터를 이용하여 측정하였고 에칭액의 온도와 농도변화에 대한 가공속도 및 그 특성을 파악하기 위해 농도와 온도를 변화시키며 실험하였다.

미세 구멍 가공에 필요한 전극은 각각 30 μ m, 50 μ m, 100 μ m로 제작하였고 피삭재는 50 μ m와 100 μ m 두께의 SUS304 스테인리스강으로 하였다. 가공에 사용한 극성은 정극성(straight polarity)으로 하였고 전압은 50V, 전류는 50mA, capacitance는 200pF을 사용하였다. 또한, 전류의 주파수는 500kHz로 하였다. 이러한 가공조건은 본 연구에 사용한 방전가공기의 최소 에너지 조건이다. 전극이 휘어지는 것을 막기위해 가공 부위에 절연액을 주사하지는 않았으며, 등유와 이온 교환 수지를 통과시켜 순수하게 만든 물로 하여 가공하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 전극봉의 제작

에칭액의 요동을 주지않고 화학 가공을 하였을 경우 동선은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 그 길이 방향에 대해 지름이 일정하지 않았다. 그 원인은

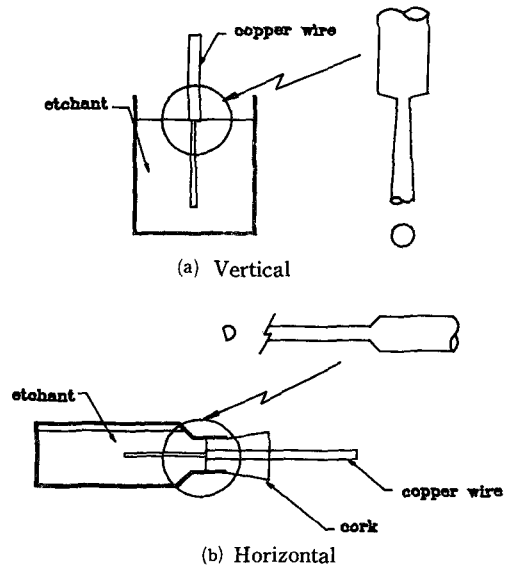


Fig. 2 Results from chemical machining of cylindrical rods without ultrasonic agitation

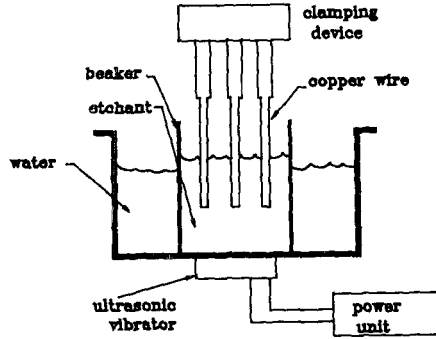
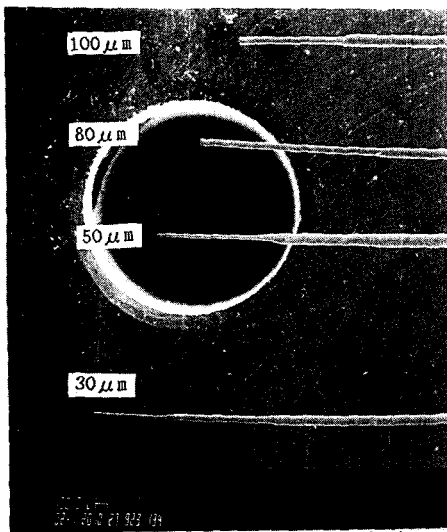
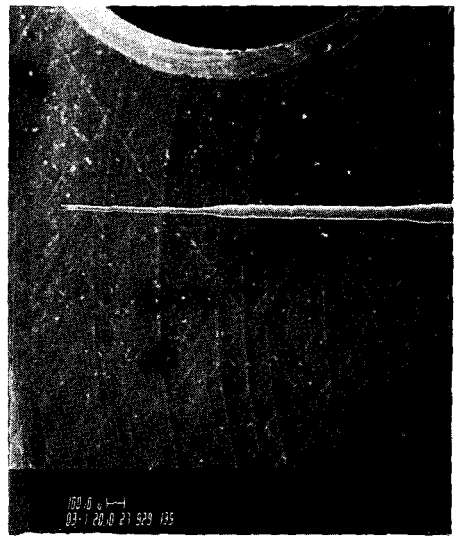


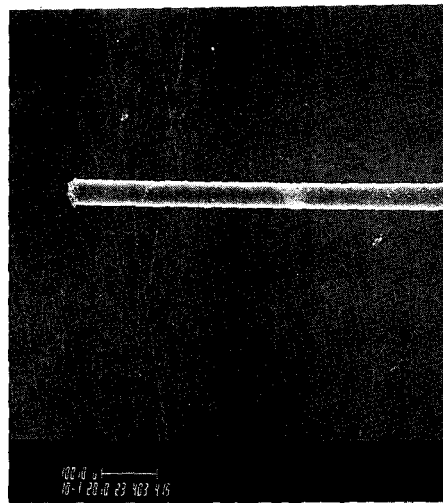
Fig. 3 Experimental set-up for ultrasonic-assisted chemical machining



(a) Machined copper rods of different diameters



(b) Machined copper rod of 30 μm diameter



(c) Machined copper rod of 50 μm diameter

Fig. 4 Results of ultrasonic-assisted chemical machining of fine rods

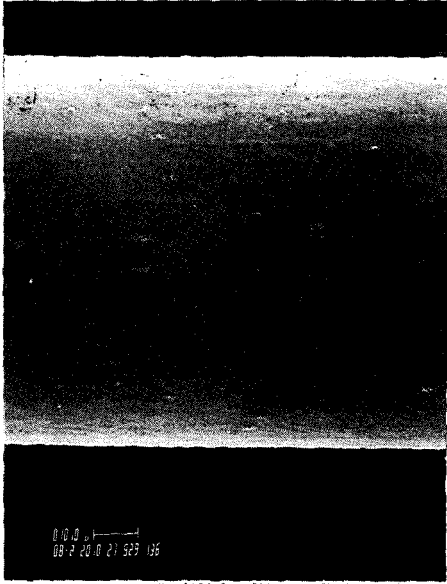


Fig. 5 Surface of 50µm diameter copper rod

Table 1 Results of straightness measurement

Nominal dia. of electrode	Distance from the end (µm)				
	50	150	300	450	600
30µm	30.5	30.0	30.9	30.7	30.7
50µm	49.2	49.0	50.2	49.7	50.2
100µm	100.8	99.7	100.4	100.5	99.9

화학반응에 의해 생성된 부산물이 구리 표면에 존재하여 반응을 방해하기 때문이며 또한, 전해액을 휘저어줄 경우 가는 동선이 쉽게 굽어지기 때문에 바람직한 방법이 되지 못한다. 따라서 이러한 경우에 초음파에 의한 미세한 진동이 가장 이상적이라 할 수 있다. Fig. 3에 그 실험장치를 도시하였다. Fig. 4는 이러한 초음파 진동을 이용하여 지름이 다른 몇개의 전극을 가공한 사진이다. Fig. 5는 화학가공된 전극의 표면을 나타내는 사진으로서, 화학가공이 피삭재를 분자단위로 제거하는 공정이기 때문에 그 표면이 매우 매끄럽고 가공결함 또한 존재하지 않는 모습을 볼 수 있다. Table 1은 가공된 전극으로부터 지름의 균일성을 측정하여 얻은 것으로

Concentration : 500 g/l

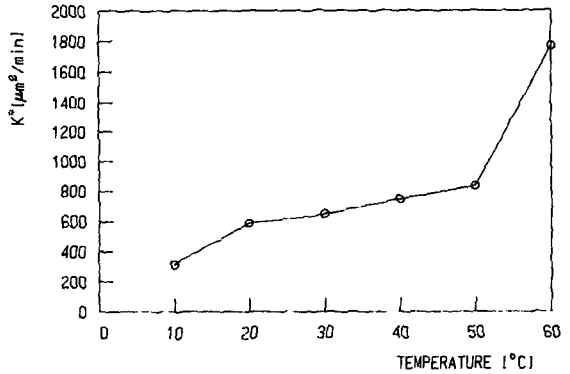


Fig. 7 Material removal rates at various machining temperatures in 500g/l molar solution

Temperature : 20°C

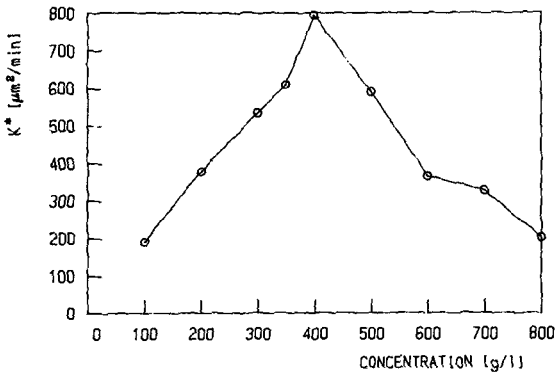


Fig. 6 Material removal rates of various concentration at 20°C

Temperature : 20°C

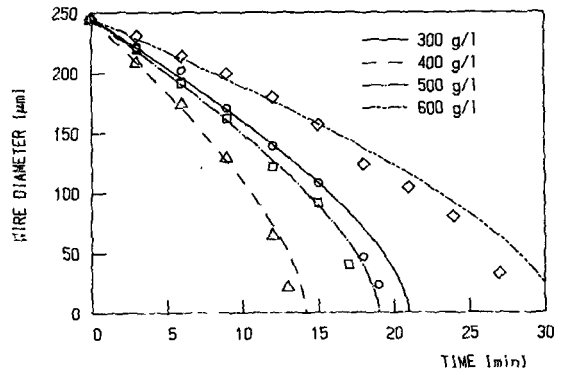


Fig. 8 Comparison of experimental results with theoretical prediction for various concentration at 20°C

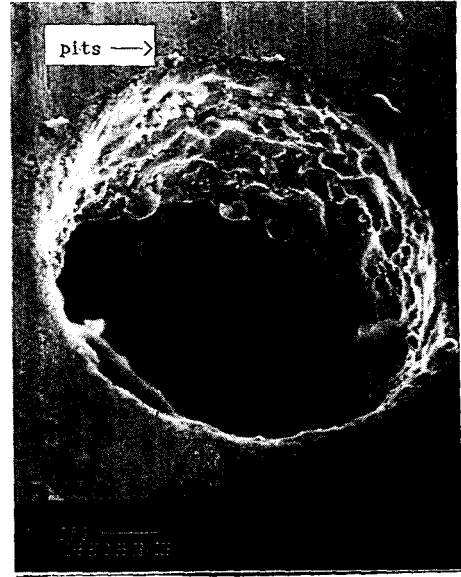
Table 2 Experimental results of overcut, taper and electrode wear

kerosene, workpiece : 50 μ m			
Electrode	Overcut	Taper	Electrode wear
30	22, 5 μ m	10%	127 μ m
50	21, 5 μ m	11%	30, 48 μ m
100	12, 5 μ m	20%	17, 78 μ m
water, workpiece : 50 μ m			
Electrode	Overcut	Taper	Electrode wear
30	25 μ m	3, 2%	72, 5 μ m
50	28, 9 μ m	39, 2%	15, 3 μ m
100	23, 5 μ m	45, 6%	8, 5 μ m
water, workpiece : 100 μ m			
Electrode	Overcut	Taper	Electrode wear
30	36, 5 μ m	11, 5%	230, 8 μ m
50	31, 4 μ m	18, 2%	120, 5 μ m
100	35, 7 μ m	34, 3%	47, 0 μ m

지름의 변화가 1 μ m 이내로 가공되는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 각각 다른 농도에서의 MRR (Material Removal Rate)을 나타내는 것으로서 400g/l에서 그 값이 최대가 된다. Fig. 7은 서로 다른 온도에서 MRR의 변화를 실험한 그림으로서, 화학반응이 고온일수록 활성화되어 온도의 증가에 따라 지수적으로 증가함을 볼 수 있다. 시간의 경과에 따른 동선 지름의 변화를, 모델링한 결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 8에 도시하였다. 그림에서 보듯이 이론적인 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치한다. 화학 가공에 의해 전극을 가공할 경우 다른 방법과 비교해보면, 한번에 무수히 많은 전극을, 특별히 설계된 정밀 구동 시스템 없이, 표면이 매우 좋고 표면에 아무런 잔류응력도 존재하지 않는 전극으로 가공이 가능하다.

4.2 미세 구멍의 가공

미세구멍을 가공한 후 그 결과로서 오버컷, 경사도 전극의 마멸량을 Table 2에 기재해 놓았다. 표에서 볼 수 있듯이 오버컷의 양은 구멍의 크기가 작을수록 크고, 경사도는 구멍의 지름이 클수록 커



hole dia. : 75 μ m
workpiece: SUS 304
thickness : 50 μ m
dielectric : water

Fig. 9 Scanning electron micrograph of pits around the micro-hole

짐을 알 수 있었다. 오버컷이 위의 결과와 같이 큰 이유는 기계의 capacitance가 크기 때문이며, 구멍 입출구의 표면이 깨끗하지 못하고 경사도가 큰 이유는 가공칩(debris)의 배출이 원활하지 못하기 때문인 것으로 예측된다. 또한, 피삭재의 두께가 두꺼워질 수록 오버컷, 경사도, 그리고 전극의 마멸모두가 증가함을 볼 수 있다.

한편, 절연액으로서 물을 사용하면, Fig. 9에서와 같이, 전기 화학적반응(electro-chemical reaction)에 의해 구멍의 표면에 작은 구멍(pit)이 생김을 볼 수 있었다. 이러한 현상은, 물이 어느 정도의 전도성을 가지고 있어서 방전 가공이 일어나는 도중에 전기화학가공(electro-chemical machining)도 발생하기 때문이다. 따라서 전극의 지름이 커다거나 피삭재의 두께가 커져서 가공 시간이 길어질 경우, 이 문제가 심각해져 구멍 입구의 형태는 원형이나 그 경계(edge)가 불분명해지는 경향을 나타낸다. 또한, 물의 경우에 전극의 마멸은 등유의 경우에 비해 감소함을 볼 수 있었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 구멍 입구나 내부 벽면의 표면 거칠기는, 물의 경우가 등유보다 우수하였다.

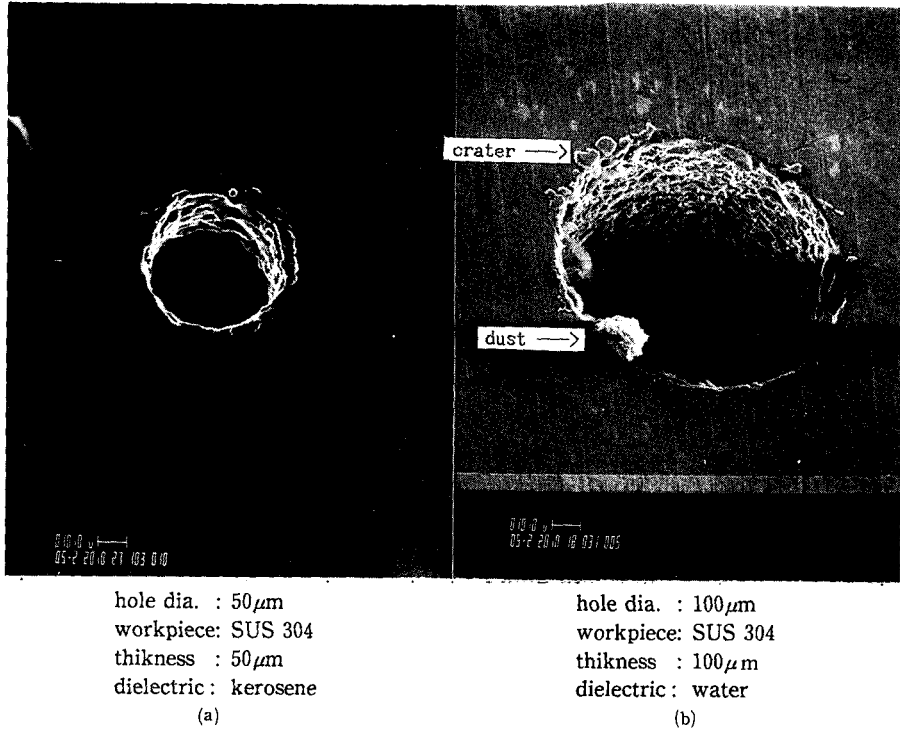


Fig. 10 Scanning electron micrographs showing the craters of inlet and machined surface

위의 결과로부터 알 수 있듯이 세장비가 보다 큰 미세구멍을 가공하기 위해서는, 경사도가 커지는 문제가 가장 심각하게 나타나므로, 이러한 문제를 해결하기 위해서 가공칩의 유동을 원활하게 하여 방전(discharge)이 아크(arc)로 되는 것을 방지하고 또, 추가적인 방전으로 인한 오버컷을 줄이면 세장비가 큰 미세 구멍을 가공할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 100 μ m이하의 미세구멍 가공을 위해, 먼저 초음파화학 가공을 이용하여 미세한 전극봉을 제작하였고, 그 전극을 이용하여 방전가공 하였으며 이러한 실험들을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 초음파 화학가공을 이용하여, 수십 마이크로미터의 단면이 원형이고 지름은 균일하며 그 표면이 매우 깨끗한 방전 가공용 전극을 제작하였는데, 이는 방전 가공용 전극으로서 뿐만아니라 다른 용도로도 사용이 가능할 것으로 기대된다.

(2) 방전가공을 이용하여 미세구멍을 가공할 경우, 절연액으로서 물을 사용할 때가 등유를 사용했을 때 보다 구멍 입출구의 표면이 더 좋음을 알 수 있었고, 가공시간이 길어질 경우에는 물의 전기화학적반응(electro-chemical reaction)을 억제하기 위하여 물의 비 저항을 조절 하여야 함을 알 수 있었다.

(3) 피삭재의 두께가 두꺼워질 수록 경사도가 커지고 가공시간이 매우 길어지는 것 등으로 보아, 세장비가 큰 미세구멍의 가공에 있어서 가공칩의 배출이 중요한 것으로 나타났다. 따라서, 앞으로는 좀더 다양한 가공 조건에서 가공 칩의 배출을 용이하게 하기 위한 방안에 대해서도 연구가 되어져야 할 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- (1) Jeswani, M. J., 1979, "Small Hole Drilling in EDM", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 19, pp. 165 ~169.
- (2) Ebeid, S. J., 1982, "An Investigation into EDM

- Fine Hole Drilling”, The 10th NAMRC, pp. 451~457.
- (3) Kagaya, K., Oishi, Y., and Yada, K., 1986, “Micro-Electrodischarge Machining Using Water as a Working Fluid - I : Micro-Hole Drilling”, Precision Engineering, Vol. 8 No. 3 pp. 157~162.
- (4) Masuzawa, T., 1985, “Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining”, CIRP, Vol. 34/1.
- (5) Kholodnov, E., 1964, “Electrospark Machining of Metals”, Edited by B. R. Lazarenko, Vol. 2 pp. 120~121.
- (6) Sato, T., Mizutani, T., Yonemochi, K., and Kawata, K., 1986, “The Development of an Electrodischarge Machine for Micro-Hole Boring”, Precision Engineering, Vol. 8 No. 3, pp. 163~168.
- (7) Schaffert, R. M., Winkler, J. H., Vaaler, L. E., Deubner, R. L., 1949, “Ferric Chloride Etching of Copper for Photoengravings”, Photo-Engravers Research, Inc., Columbus, OH. p. 10.
- (8) 윤재웅, 1990, “초음파 화학 가공을 이용한 전극봉 제작 및 미세구멍의 방전가공에 관한 연구”, KAIST, 석사학위논문.
- (9) Shin-ichi Habu, 1982, “Studies of Copper Etching in Ferric Chloride Solutions”, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. Vol. 21 pp. 511~514.
- (10) Dae Eun Kim, 1984, “Smoothing of Surface Profile of Metals by Dynamic Chemical Etching”, MIT. Master Thesis.