

미세 내부 형상 가공을 위한 디스크 전극 이용 전해 가공

조찬희*, 김보현#, 주종남*

Electrochemical Machining Using a Disk Electrode for Micro Internal Features

Chan Hee Jo*, Bo Hyun Kim# and Chong Nam Chu*

ABSTRACT

Micro electrochemical machining was investigated to machine micro internal features. This method uses a micro disk tool electrode and can easily machine micro features inside of a micro hole, which are very difficult to make by the conventional processes. In order to limit the machining area and localize the electrochemical dissolution, ultra short pulses were used as power source and a micro disk electrode with insulating layer on its surface was used as a tool electrode. By electrochemical process, internal features, such as groove array, were fabricated on the stainless steel plate.

Key Words : Micro electrochemical machining (미세 전해 가공), Micro groove (미세 홈), Tool insulation (전극 절연), Disk electrode (디스크 전극), Micro hole (미세 구멍)

1. 서론

최근 미세 가공물에 대한 요구가 급격히 증가하고 있고, 이로 인해 다양한 미세 가공물 제작 기술에 대한 요구 역시 증대되고 있다.¹ 다양한 미세 가공 기술 중에서도 기존에 가공된 형상 내부에 또 다른 형상을 가공해야 하는 경우 가공 방법과 공구의 선택이 매우 제한적이다. 특히, Fig. 1 과 같이 이미 가공된 구멍 형상 내부에 특정 형상을 추가적으로 가공해야 되는 경우, 기존 범용 선반 가공에서는 Fig. 1(a)와 같이 비 대칭적 공구를 구멍에 삽입하여 가공할 수 있지만, 전체적인 크기가 매우 작은 미세 형상의 경우, 공구의 제작 자체가 매우 어렵고, 공구의 강성 등의 문제도 발생한다.

이를 해결하기 위하여 미세 방전 가공을 이용하여 구멍의 내부를 가공하는 방법이 제안되었지만, 방전 가공의 특성상, 공구가 쉽게 마모되는 문제가 있다.²

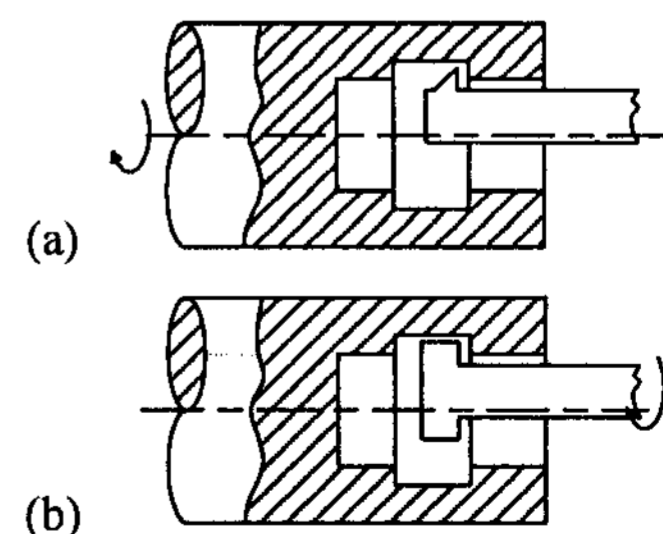


Fig. 1 Schematics of boring: (a) conventional machining, (b) ECM

접수일: 2007 년 11 월 28 일; 게재승인일: 2008 년 4 월 7 일
 * 서울대학교 기계항공공학부
 # 교신저자: 안동대학교 기계공학부
 E-mail: kimbh@andong.ac.kr Tel. (054) 820-6301

이러한 문제를 해결하기 위해 또 다른 비 접촉 가공법인 전해 가공을 고려할 수 있다.

전해 가공에서는 공구 전극과 가공물을 각각 음극과 양극에 연결 한 후, 전압을 인가하면 가공물에서는 산화 반응을 통해 금속이 이온으로 용출되는 전해 현상이 일어나고, 가공물의 상대 전극인 공구 전극의 표면 근처에서 환원 반응이 일어나 가공이 진행된다. 범용 전해 가공의 경우 일반적으로 직류 전원을 사용한다. 하지만 가공량을 정밀하게 제어하기 힘들기 때문에 최대 가공 정밀도는 0.1 mm 정도 수준으로 미세 가공에 적합하지 않다.³ 그러나 전원으로 초단 펄스(ultra short pulse) 전압을 이용하면 가공 영역을 정밀하게 제어할 수 있어, 미세 형상 제조, 미세 금형 제작, 미세 금속 부품 등의 제작에 응용 할 수 있다.

전해 가공은 가공 중 전극의 소모가 없고, 버(burr)가 생기지 않으며, 강성에 관계없이 금속을 가공할 수 있는 장점이 있다. 특히 가공 중 전극의 소모가 없는 것은 미세 전해 가공이 다른 금속 가공법이 가지지 못하는 큰 장점이다. 따라서 Fig. 1(b) 와 같이 공구의 형상을 반복적으로 가공물에 전사할 수 있으므로 복잡한 형상도 쉽게 가공할 수 있다.

본 연구에서는 미세 공구 전극과 전해 가공을 이용하여 미세 구멍 내부에 홈을 가공함으로써 미세 가공물 내부에 복잡한 형상을 가공할 수 있는 방법에 대해 연구하였다. 또한 보다 정밀한 가공을 위해 전극 형상 개선과 전극 절연 등의 방법에 대해서도 연구하였다.

2. 전극 제작 및 기초 형상 가공

2.1 실험 장치

Fig. 2 와 같이 실험에서 사용된 시스템에는 공구 전극을 제작하기 위한 방전 가공부와 미세 형상 가공을 위한 전해 가공부가 3 축 이송 기구 위에 설치되어 있다. 공구 전극은 와이어 방전 가공(WEDG)를 이용하여 제작하였으며⁴, 전극 재료로는 텅스텐 카바이드를 사용하였다. 전해 가공부는 전극에 전위를 인가하기 위한 초단 펄스 발생기, 펄스 측정을 위한 오실로스코프 등으로 구성되어 있다. 가공물 재료는 304 스테인리스 강(STS 304, Cr 18%, Ni 8%)을 사용하였으며 전해액으로는 0.1M 황산 수용액을 사용하였다.⁵ 전해 가공 중 시편에

산화막이 발생하지 않도록 일정 전극 전위($\Phi_{work} = 0.4 V_{pt}$)를 유지하였으며 가공 국부화를 위하여 펄스의 주기가 1 μs , 펄스 온-타임(pulse on-time)이 수 십 ns 인 초단 펄스를 이용하였다.³ 펄스 온-타임은 가공 조건에 따라 다르게 사용하였다.

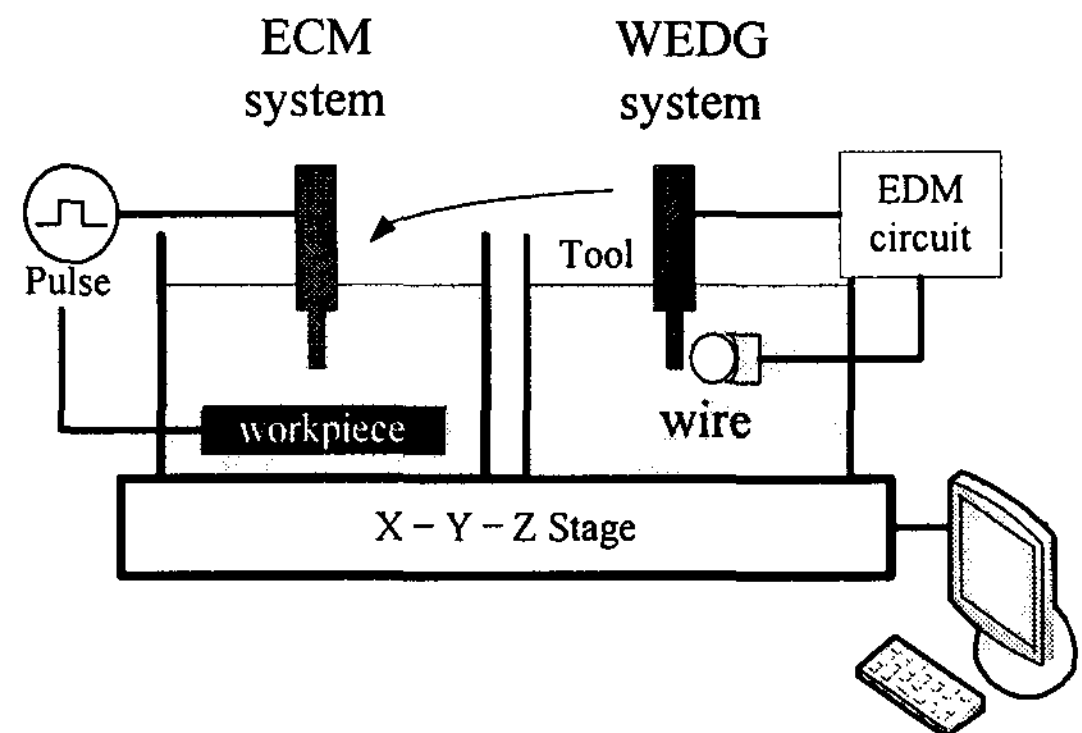


Fig. 2 Schematics of system for micro ECM and WEDG

2.2 디스크 전극 제작

구멍 내부의 형상 가공을 위해 디스크 형태의 미세 전극을 제작하였다. 디스크 전극은 먼저 Fig. 3(a)와 같이 방전가공을 이용하여 원형 전극을 가공한 후 Fig. 3(b)와 같이 사각형 판 전극을 이용하여 디스크 부분을 가공하였다.^{4,6} 그러나 방전 가공 중의 전극 마모 때문에 디스크의 단면의 모양이 Fig. 4(a)의 하단과 같은 라운드(round)형상이 생기게 된다. 이러한 라운드 형상은 가공 시 공구가 깊이 방향으로 이송할 수 있는 양을 제한하게 된다. 이에 기존 디스크 전극 가공 후에, 디스크의 목 부분에 홈 형상을 추가 가공을 함으로 라운드형상에 의한 문제를 해결하였다.

즉, Fig. 4(a)의 방법으로 제작된 디스크 전극과 판 전극의 전압 극성을 바꾼 뒤, Fig. 4(b)와 같이 디스크 전극을 z 방향으로 이송시키면 판 전극이 가공되며 판 전극의 모서리 부분에 그림과 같은 돌출 형상을 제작할 수 있다. 얻어진 돌출 형상 전극을 Fig. 4(c)와 같이 라운드 형상이 있는 디스크 전극으로 이송한 뒤, 목의 두께보다 수 μm 깊게 이송하여 가공하면 Fig. 4(d)와 같은 디스크 형상을 얻을 수 있다. 이러한 전극을 통해서 전해 가공 시 가공할 수 있는 홈의 깊이를 증대시킬 수 있는 장점을 얻을 수 있다.

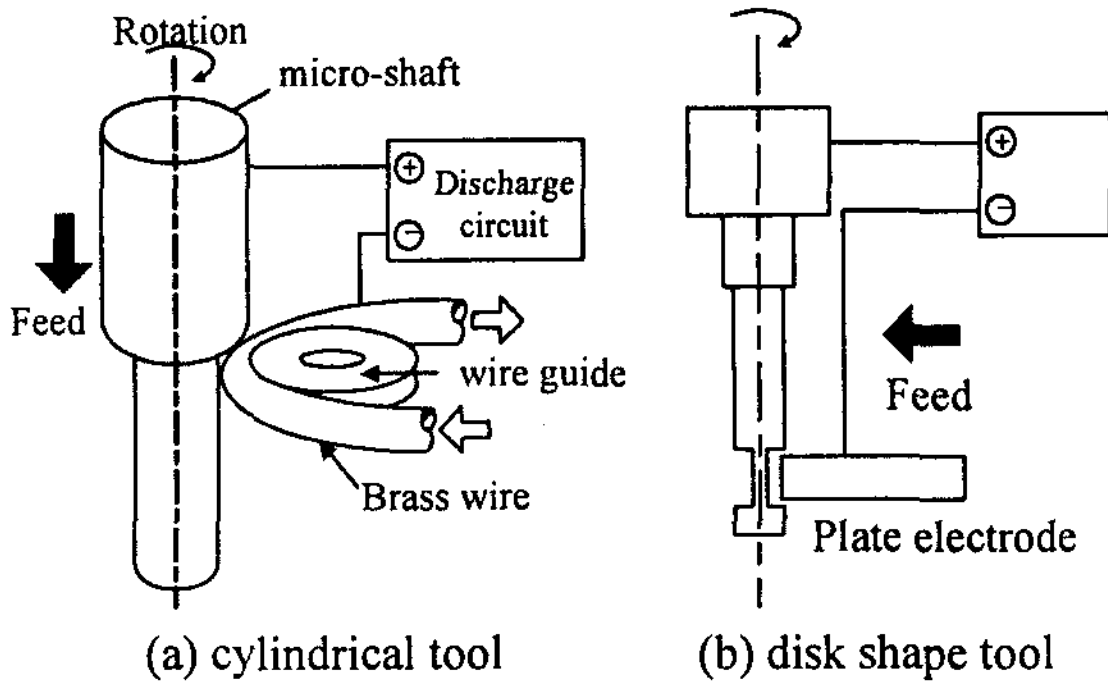
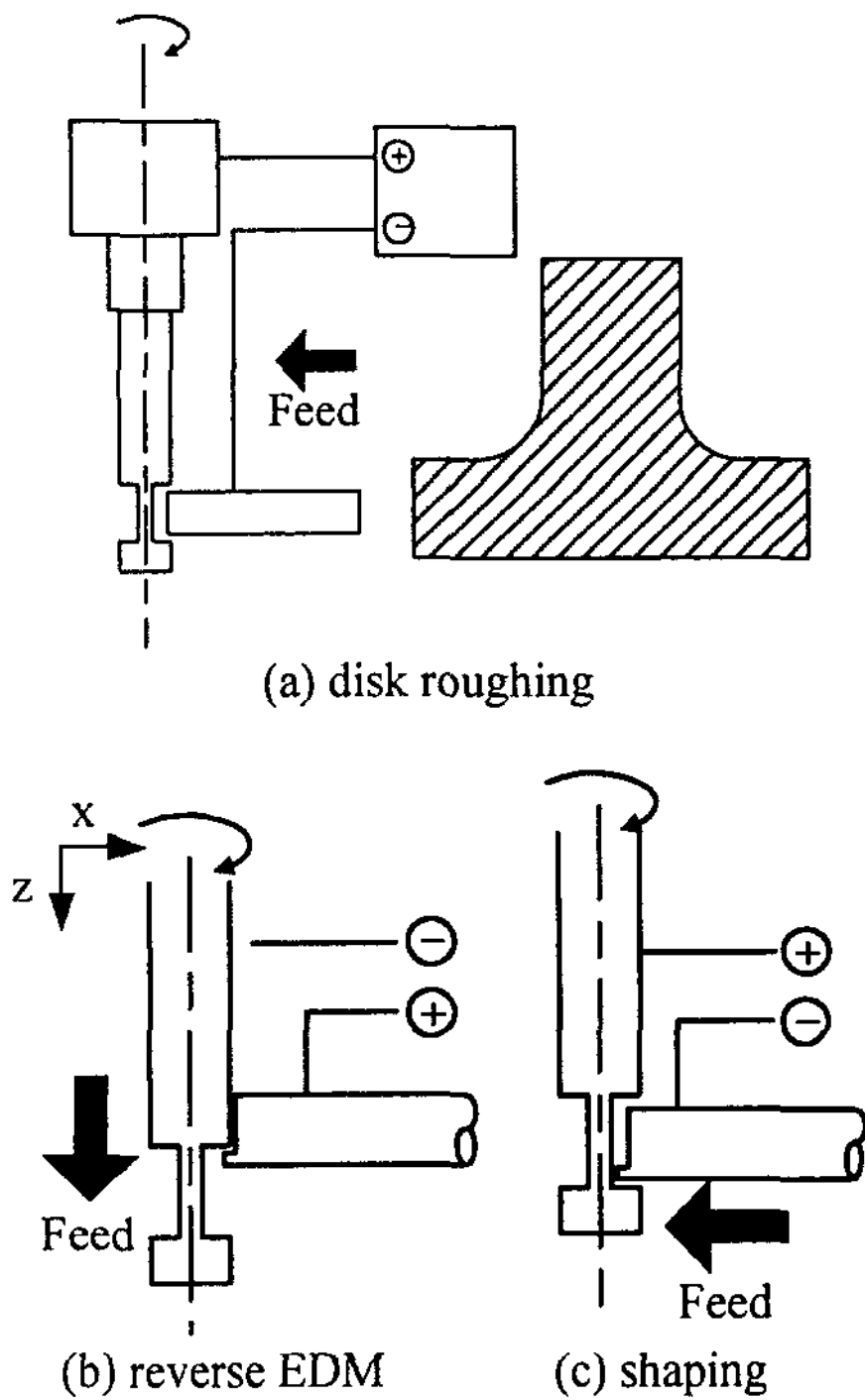


Fig. 3 Fabrication of disk electrode



(d) groove on disk electrode

Fig. 4 Procedure of groove machining on the neck of disk electrode and picture of electrode

2.3 절연 디스크 전극

미세 방전 가공을 이용하여 제작된 전극을 이용하여 구멍 내부의 측면에 홈을 제작하였다. 먼저 디스크 전극을 이용하여 Fig. 5(a)와 같이 전해 드릴링(drilling)의 방법으로 구멍을 가공한다. 그 다음 Fig. 5(b)와 같은 방법으로 전극을 구멍 내부에서 이심(eccentric)으로 회전시키면서 홈을 가공하였다. 미세 전해 가공에서는 많은 양을 한꺼번에 가공하기 힘들기 때문에, 홈 가공 시에는 조금씩 전극 회전 반경을 증가시켜 한 층씩(layer by layer) 가공하는 방법으로 원하는 형상을 가공하게 된다.

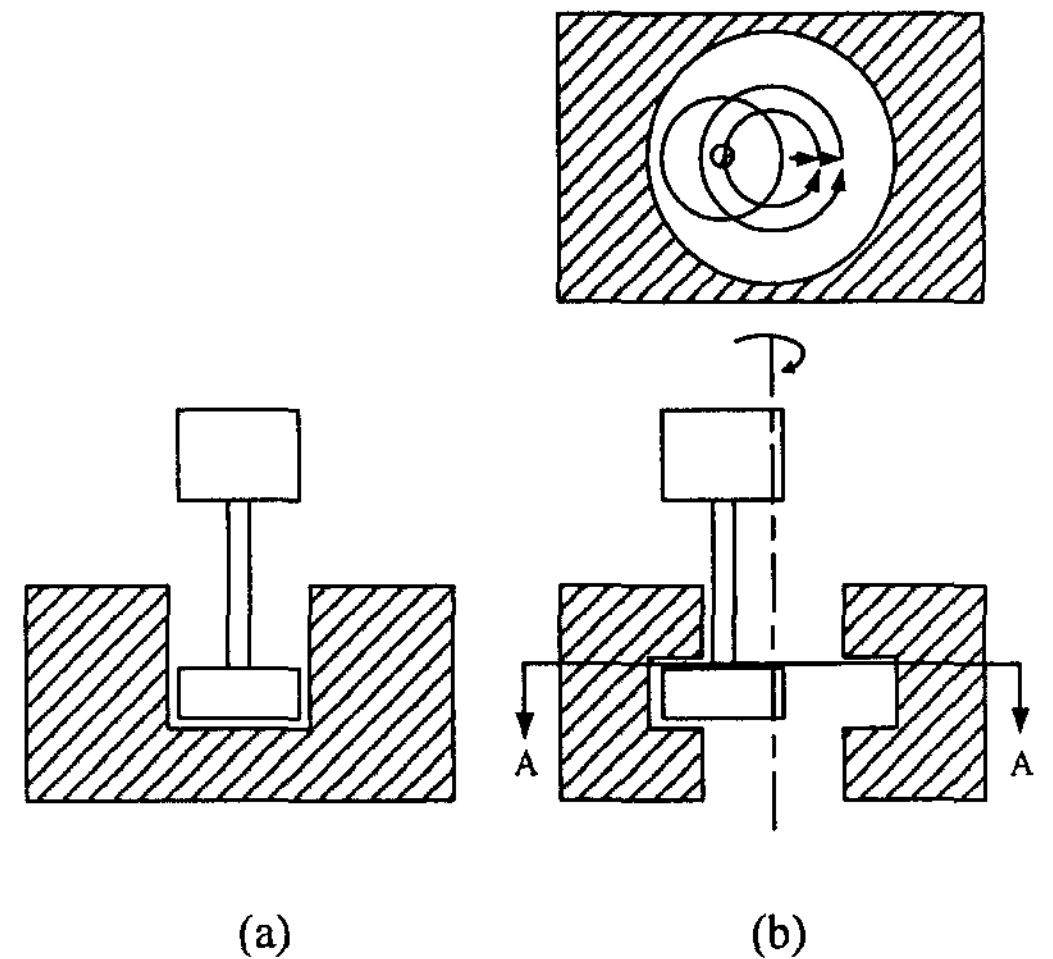


Fig. 5 Schematic diagram of grooving process in the micro hole by using disk electrode: (a) drilling, (b) eccentric rotation for layer-by-layer grooving

Fig. 6(a)는 위와 같은 방법을 이용하여 가공된 형상의 예이다. 그러나 모서리 부분(원부분)이 날카롭지 못하고 형상 왜곡이 생겼음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 6(b)는 디스크 전극으로 가공된 홈을 정면에서 본 사진이다. 이 사진에서도 가공면의 위, 아래가 둥글게 가공된 모습을 볼 수 있다. 이는 한 층씩 가공됨에 따라 구멍과 홈의 경계 부분에서의 가공 시간이 홈 안쪽 부분을 가공하는 시간보다 길기 때문이다. 길어진 가공시간은 홈의 다른 부분보다 넓은 가공간극을 야기시키게 된다. 모서리가 둥글게 되는 현상을 막기 위해서는 가공을 원하지 않는 부분에서 전해 작용이 일어나지 않아야 한다. 이를 위해서 가공

영역을 제외한 모든 전극 표면을 절연시켜, 전해 반응을 가공 영역에만 집중 시킬 필요가 있다.⁴

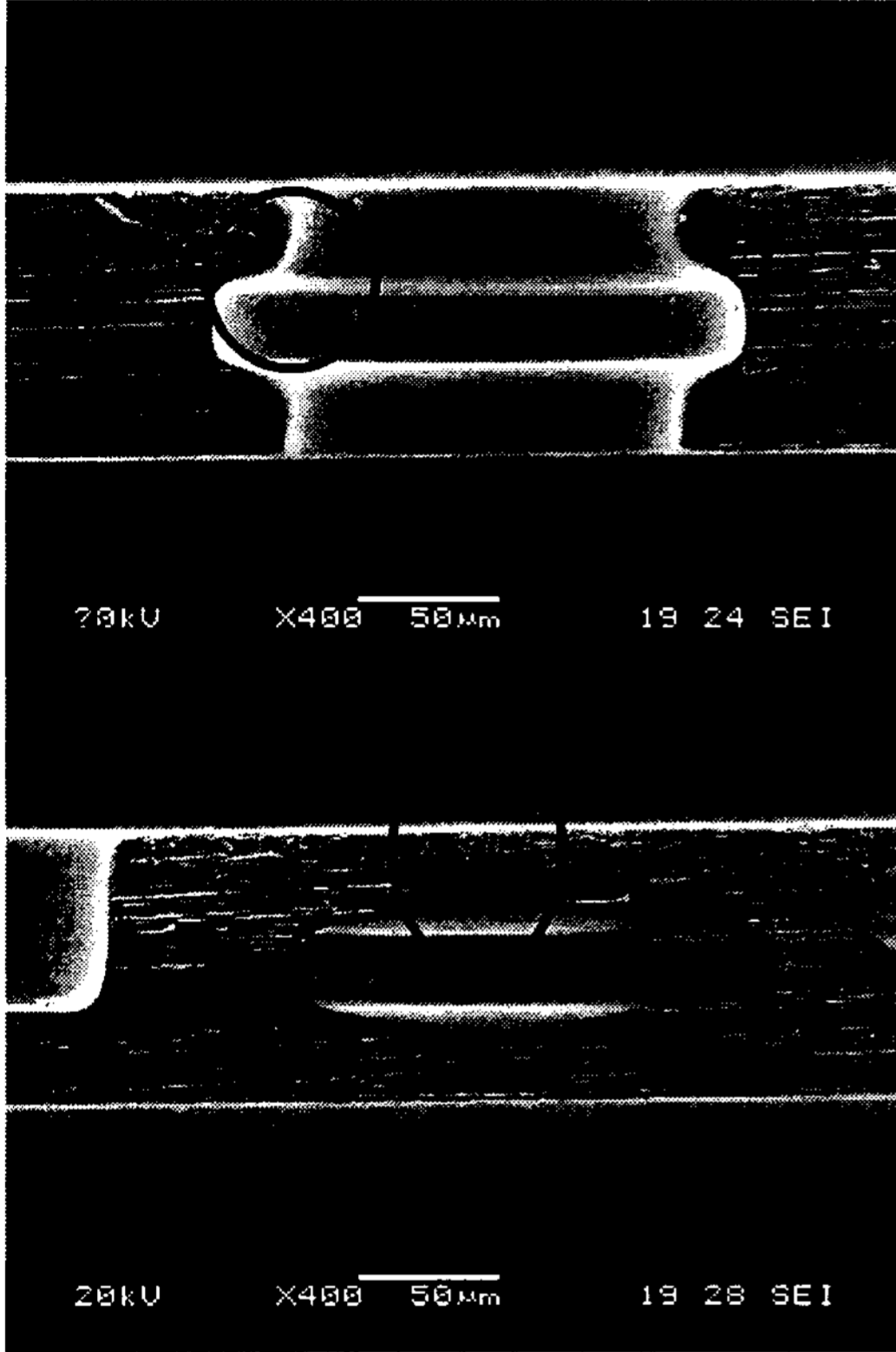


Fig. 6 Sectional view of product by using disk electrode: (a) groove in the micro hole, (b) groove

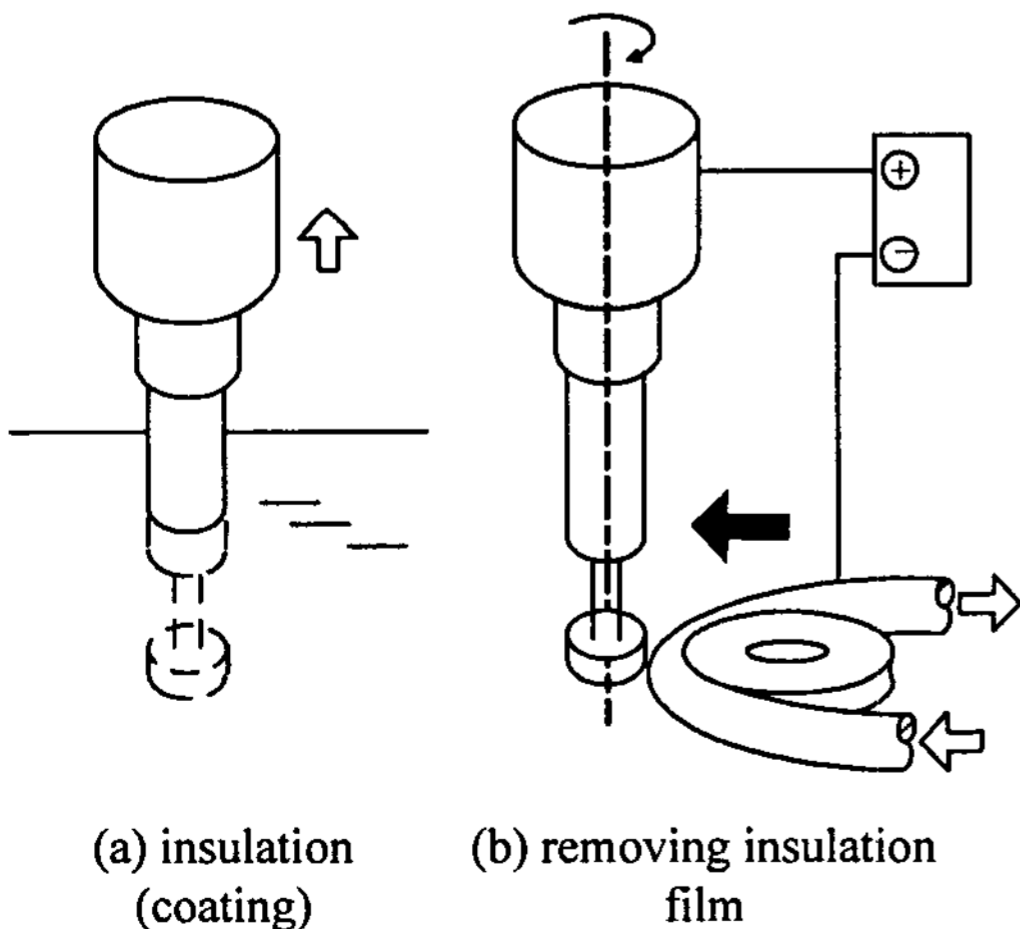


Fig. 7 Procedure of machining insulated disk electrode

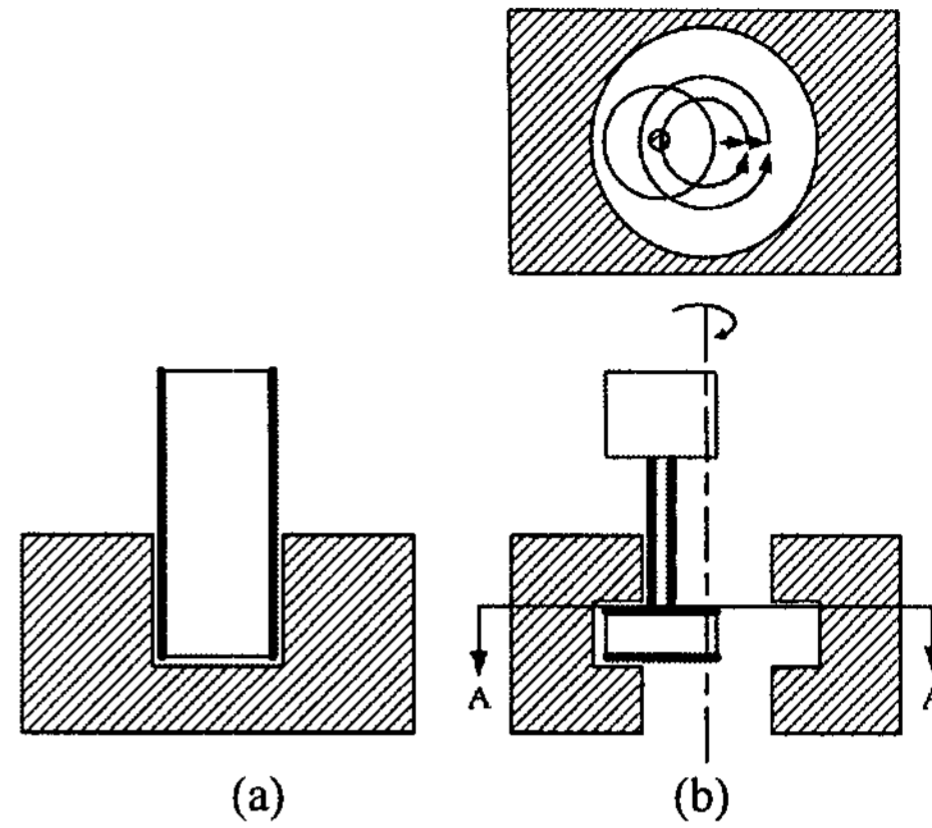


Fig. 8 Procedure diagram of groove in the micro hole by using two insulated electrodes: (a) drilling, (b) eccentric layer by layer rotation for grooving

전극 절연을 위하여 폴리스티렌(polystyrene, PS)를 사용하였다. 폴리스티렌은 스티렌의 중합체로 스티렌 분자가 무극성이기 때문에 물에 녹지 않는다. 또한 내산성이 있으며, 전기 전도도가 매우 낮아 절연 물질로 적당하다.

전극을 절연한 뒤, 가공 영역의 절연막은 제거되어야 한다. 폴리스티렌은 녹는점이 140 °C 로 높지 않기 때문에, 방전 가공 중 발생하는 열을 이용해서 절연막을 제거할 수 있다.

Fig. 7 과 같이 침지(dipping)법을 이용하여 디스크 표면 전체에 절연막을 만들었다.⁷ 그 다음 가공 영역, 즉 전해 작용이 일어나야 하는 부분인 디스크의 측면의 절연막은 와이어 방전을 이용하여 제거하였다. 이와 같은 방법을 이용하면 디스크의 측면에만 절연막이 제거되어 홈 가공 중에 디스크 측면을 제외한 다른 부분에서의 가공을 막을 수 있다. 보다 효율적인 공정을 위해, Fig. 8 과 같이 구멍 가공을 위한 전극과 내부 형상 가공을 위한 디스크 전극을 따로 제작하여 이용하였으며, 구멍 가공용 전극도 측면을 절연하여 구멍의 테이퍼와 가공 간극(machining gap)을 줄일 수 있었다. Fig. 9 는 절연막을 입힌 전극의 단면을 광학 현미경으로 관찰한 사진이다. 사진에서의 절연막의 두께는 약 3-4 µm 이다.

3. 형상 가공

절연시킨 구멍 가공용 전극과 디스크 전극을 이

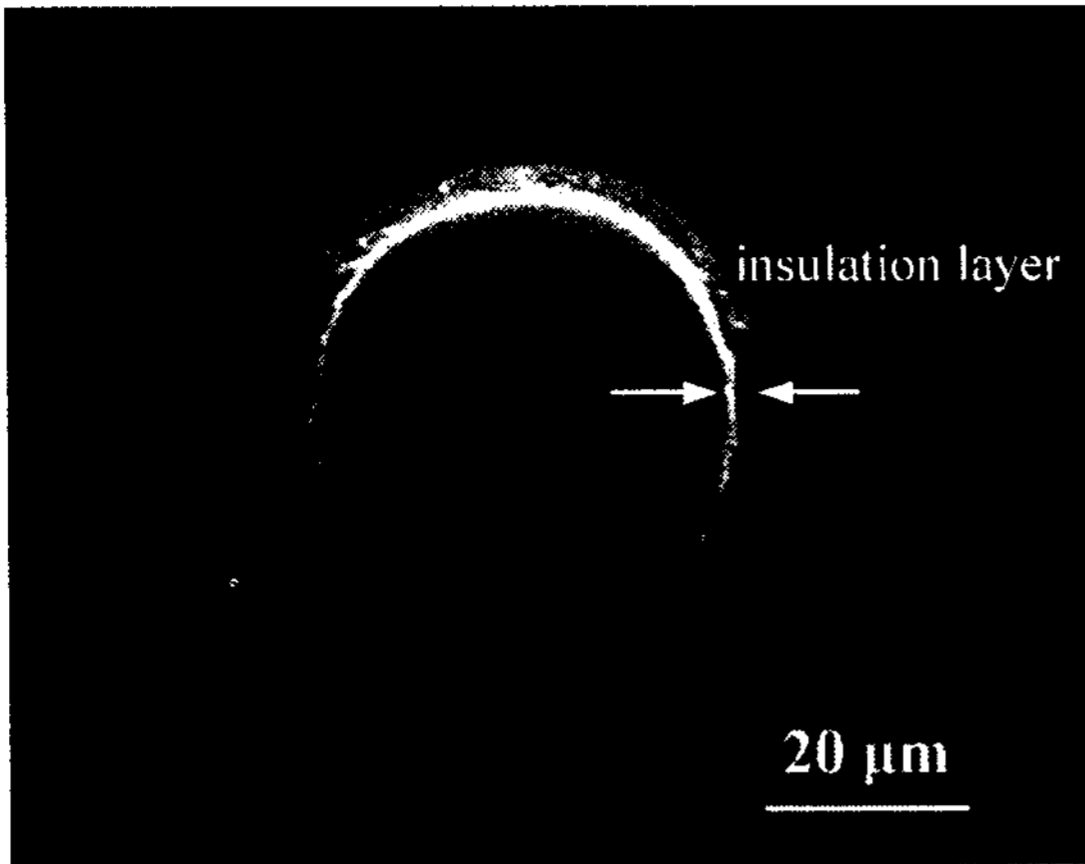


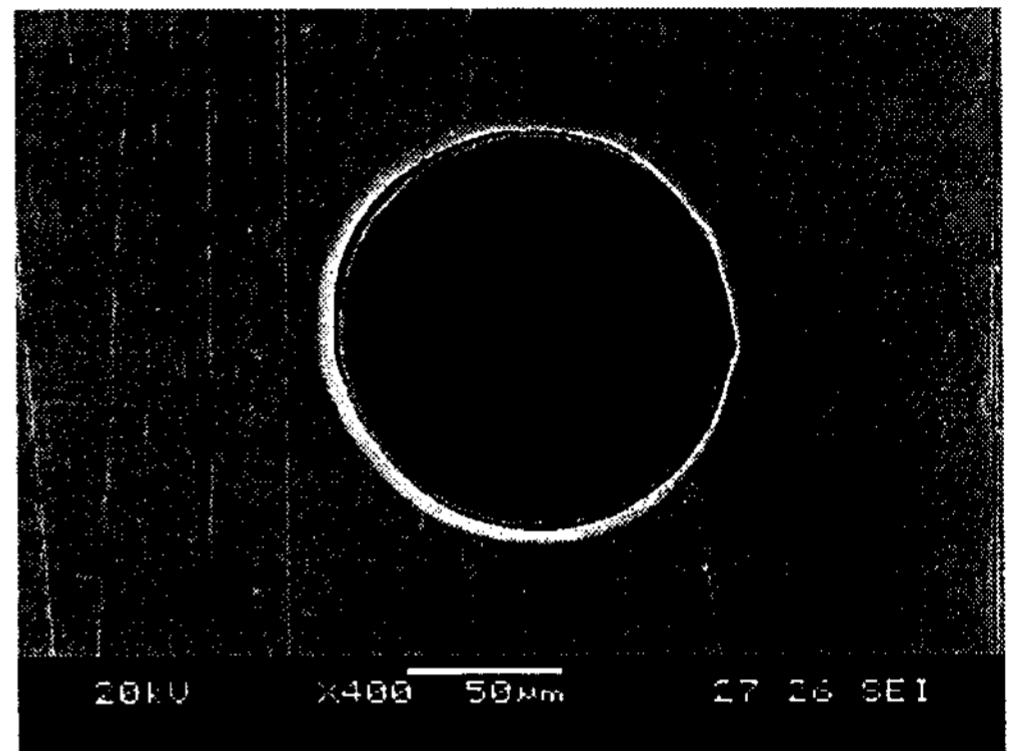
Fig. 9 Cross-section of an insulated electrode

용하여 내부 형상을 가공하였다. 먼저 지름 115 μm의 구멍 가공용 전극을 제작하여 지름 130 μm 정도의 미세 구멍을 스테인리스 강에 가공하였다.

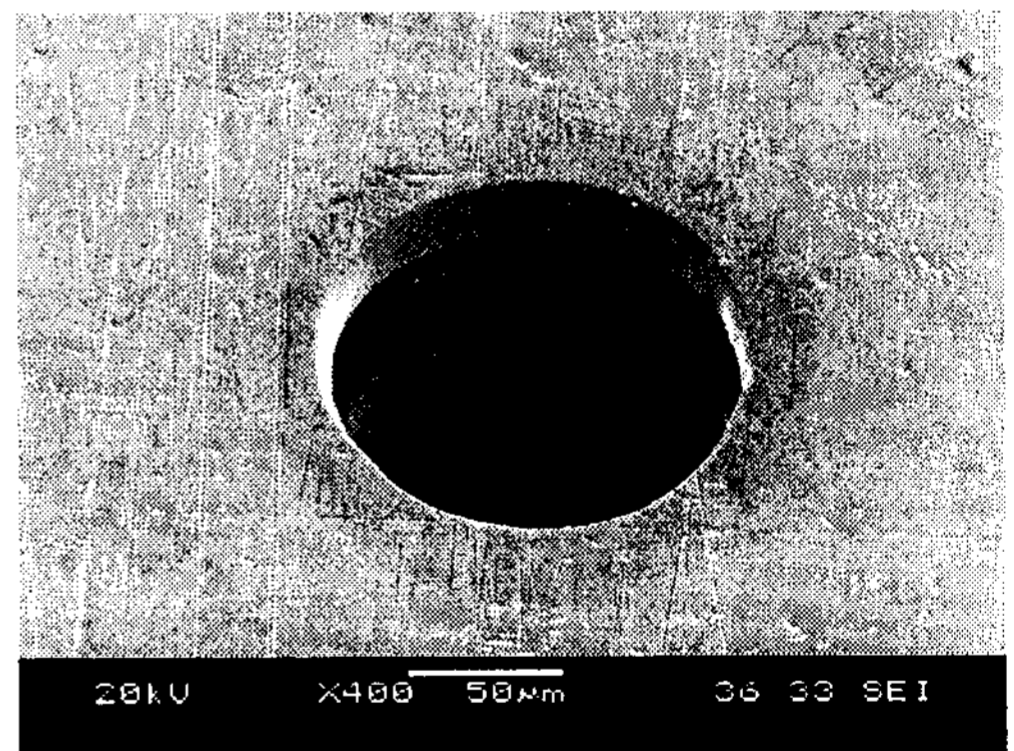
그 다음 디스크의 직경과 목의 직경이 각각 120 μm, 와 37 μm 인 디스크 전극을 이용하여 홈을 가공하였다. 디스크의 두께는 28 μm 이다. 전해 가공은 인가되는 펄스 전압의 크기나 펄스 폭이 클수록 가공량 또는 가공 간극이 증가하게 된다.⁴ 따라서 구멍 가공할 때에는 폭이 상대적으로 큰 펄스 전압을 사용하고, 구멍 내부의 미세 형상을 가공할 때에는 그보다 짧은 폭의 펄스를 사용하는 것이 유리하다. 만약 폭이 긴 펄스를 사용한다면, 가공량 또는 가공 간극이 증가하여 형상이 둥글게 나오는 현상이 나타난다.^{5,6} 따라서 여러 실험을 거쳐 구멍 가공 시에는 100 ns, 홈 가공 시에 50 ns 의 펄스 온-타임을 가공 조건으로 선정하였다. 두 개의 절연 전극을 이용하여 스테인리스 강에 미세 구멍 내 홈 형상을 제작하였다. Fig. 10 은 미세 구멍 내부에 가공된 홈 형상을 찍은 사진이다. 구멍의 직경은 130 μm 이고 홈의 깊이는 30 μm 이다.

전해 가공은 가공 중 전극의 마모가 없기 때문에 공구 전극을 한번 제작하면 이를 이용하여 다수의 형상을 반복적으로 가공 할 수 있다. 이런 장점을 이용하여 Fig. 11(a), (b)와 같이 하나의 미세 구멍 내에 홈 어레이(array)를 가공하였다. Fig. 11(c)는 홈의 모서리 중 한 개를 확대한 사진이다. Fig. 6(a)에서 보인, 절연하지 않은 공구 를 이용하여 가공한 형상과 비교하면 테이퍼 형상이 줄어든 것을 볼 수 있으며 이를 정량적으로 측정하기 위해 Fig. 12

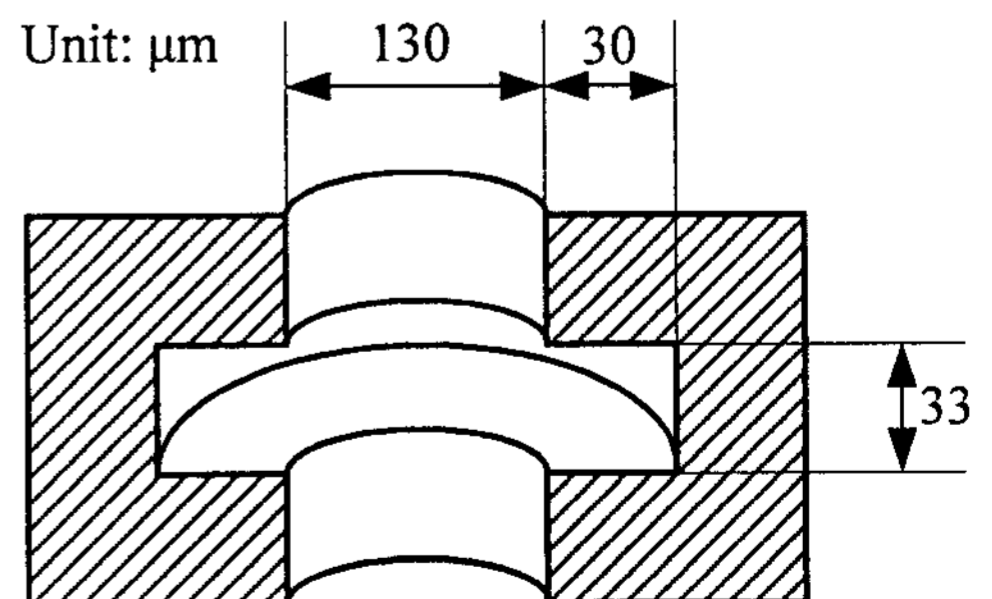
와 같이 가공된 홈의 테이퍼 각도를 정의하여 측정하였다. 절연하지 않은 공구를 이용하여 가공한 홈(Fig. 6(a))의 테이퍼 각도는 약 18도, 절연공구로 가공한 홈(Fig. 11(c))의 테이퍼 각은 약 6도로 측정되었으며 이를 통하여 공구전극의 절연 효과를 확인할 수 있었다.



(a) Front view (entrance hole)



(b) Isometric view



(c) Hole dimension

Fig. 10 Groove in the micro hole

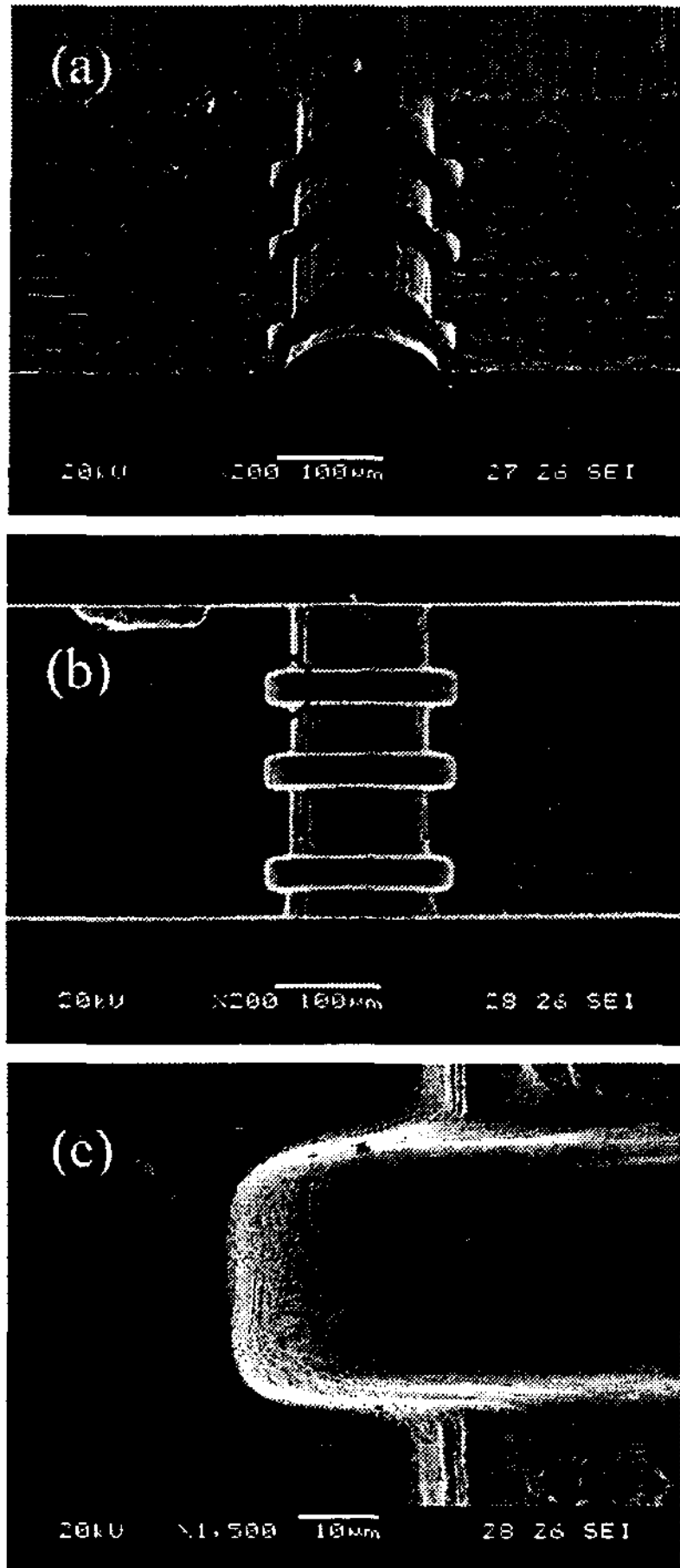


Fig. 11 Sectional view of groove array in the micro hole: (a), (b) groove array, (c) enlarged view of marked area in (b)

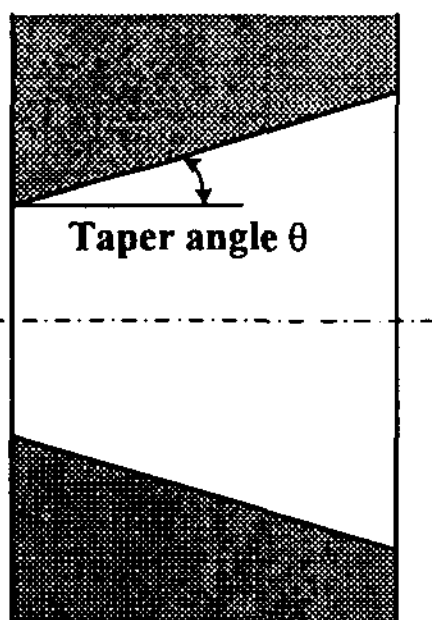


Fig. 12 taper angle of groove

4. 결론

미세 전해 가공에서는 다양한 형상의 미세 전

극을 이용할 수 있기 때문에 적절한 공구 전극을 이용하면 미세 형상 내부에 복잡한 형상을 가공할 수 있다. 본 논문에서는 미세 디스크 전극을 이용하여 미세 구멍 내부에 여러 홈 형상을 가공하였다. 가공 시 모서리 부분에 일어나는 과전해 (over-dissolution) 현상을 방지하기 위해 디스크 전극의 위, 아래 면을 절연하였으며 이를 통하여 구멍과 홈의 경계가 뚜렷한 홈 형상을 가공하였다. 전해 가공은 방전 가공과 달리 전극의 소모가 없어서 한 개의 전극으로 여러 개의 형상을 가공할 수 있다. 이러한 장점을 이용하여 기존의 절삭 방법이나 방전 가공을 이용해서는 만들기 힘든 형상인 홈 어레이 형상을 가공하였다. 본 연구에서 제안한 가공 기술을 통해서 마이크로 베어링 케이지(micro bearing cage)나, 마이크로 실링(sealing), 미세 공극 등의 제작에 사용될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. Rajukar, K. P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M. M., McGeough, J., Hu, X., Rensnick, R. and DeSilva, A., "Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes," *Annals of CIRP*, Vol. 55, No. 2, pp. 643-666, 2006.
2. Masuzawa, T., Okajima, K., Taguchi, T. and Fujino, M., "EDM-Lathe for Micromachining," *Annals of CIRP*, Vol. 51, No. 1, pp. 355-358, 2002.
3. Schuster, R., Kirchner, V., Allongue, P. and Ertl, G., "Electrochemical Micromachining," *Science*, Vol. 289, No. 98, pp. 98-101, 2000.
4. Masuzawa, T., Fujino, M. and Kobayashi, K., "Wire Electro-Discharge Grinding Method," *Annals of the CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp. 431-434, 1985.
5. Park, B. J., "Effects of Tool Electrode Size on Micro Electrochemical Machining Using Ultra Short Pulses," PhD Dissertation Seoul National University, 2006.
6. Kim, B. H., Lee, Y. S., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Taper reduction in micro electrochemical milling using disk type electrode," *J. of the KSPE*, Vol.22, No. 4, pp. 167-172, 2005.
7. Advincula, R. C., "Polymer Brushes," Wiley-VHC, Weinheim, pp. 6-10, 2004.