

역방전 가공을 이용한 미세 전극 제작과 그 응용

최세환*, 김보현#, 박병진*, 주종남*

Fabrication of Micro Electrodes by Reverse EDM and Its Applications

Se Hwan Choi*, Bo Hyun Kim#, Byung Jin Park* and Chong Nam Chu*

ABSTRACT

For increasing productivity of micro electrochemical machining (MECM), the application of multiple electrodes was introduced. The electrodes were fabricated by reverse electrical discharge machining (REDM). By REDM micro electrodes with various shapes can be machined easily. According to capacitance and applied voltage, machining characteristics of reverse EDM were investigated and the optimal conditions for stable machining were suggested. By using multiple electrodes and a channel-shape electrode, holes and channels were machined on stainless steel by ECM.

Key Words: Electrical discharge machining (방전 가공), Electrochemical machining (전해 가공), Micro electrode (미세 전극)

1. 서론

최근 미세 부품에 대한 관심이 높아짐에 따라 많은 미세 가공 기술이 연구되고 있다. 반도체 제작 공정은 정밀한 형상 제어가 가능하고 대량 생산에 유리하여 미세 형상 제작에 널리 쓰이고 있지만 2.5 차원 형상에만 국한되고 재료도 실리콘에 한정되는 단점이 있다. 한편 실리콘 재료 외에 금속의 미세 가공 수요는 계속 늘어나고 있지만 금속, 특히 고경도 금속의 3 차원 미세 가공 기술은 그다지 많지 않다. 이러한 기술의 예로서 미세 밀링 가공, 방전 가공, 전해 가공 등이 있다.

미세 방전, 전해 가공과 같이 미세 전극을 사용하여 형상을 가공하는 가공법은 다른 가공 방법에 비해 상대적으로 가공 속도가 느리고 전극을 이송

시키면서 한 번에 한 개의 형상을 가공하므로 생산성이 떨어지는 단점이 있다. 하지만 여러 개의 전극, 즉 다중 전극을 사용하여 다수의 형상을 동시에 가공함으로써 생산성을 높일 수 있다. 특히 전해 가공은 금속의 전기 화학적 반응을 이용한 가공법이므로 전극의 마멸이 무시할 정도로 작아 다중 전극을 적용하는데 있어서 유리하다고 할 수 있다. 이러한 다중 전극을 제작하는 방법으로 LIGA 공정이나 와이어 방전 가공을 예로 들 수 있다.^{1,2} 하지만 LIGA 공정은 비용이 많이 들고 순금속에만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 또한 와이어 방전 가공은 다양한 형상의 전극을 제작하기가 어렵고 와이어 크기 때문에 미세한 형상을 가공하는데 한계가 있다. 이에 반해 미세 역방전 가공은 다수의 미세 전극을 다양한 형상으로 쉽게

접수일: 2005 년 4 월 29 일; 게재승인일: 2005 년 9 월 9 일

* 서울대학교 기계항공공학부

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ssborry@plaza1.snu.kr Tel. (02) 540-5970

가공할 수 있다.³ 본 논문에서는 미세 역방전 가공을 이용하여 다중 전극을 제작하고 그 가공 특성을 연구하였다. 또한, 이를 토대로 다양한 형상의 전극을 제작하여 미세 전해 가공에 응용하였다.

2. 역방전 가공을 이용한 전극 제작

2.1 역방전 가공

일반적으로 미세 방전 가공은 Fig. 1(a) 와 같이 미세 공구 전극을 이송시켜 방전을 이용하여 공작물을 가공하는 방법이다. 방전에 의해 공구 전극과 공작물 전극, 모두 가공되지만 양극으로 걸어준 전극 쪽이 가공이 많이 되므로 공작물에는 양극을, 공구 전극에는 음극을 걸어 준다. 이에 반해, Fig. 1(b) 와 같이 금속판에 미세 구멍을 가공한 뒤 금속판에 음극을, 전극에 양극을 걸어주고 가공하면 그 구멍 크기만큼의 미세 전극이 가공된다. 이 때는 전극이 공작물이 된다. 이러한 개념을 일반 미세 방전 가공과 구별하여 미세 역방전 가공(reverse EDM, REDM) 이라 한다.³ 이러한 방법을 이용하면 다수의 다양한 형상의 전극을 제작할 수 있다.

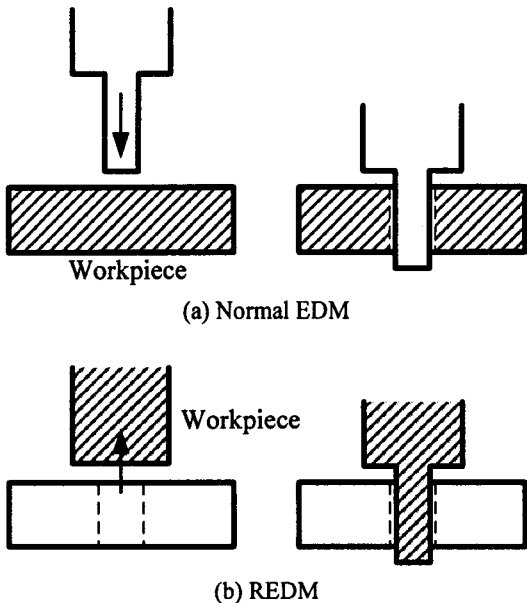


Fig. 1 The concept of REDM

2.2 역방전 가공 특성

미세 방전 가공에서는 전극을 회전시킬 경우 가공 속도가 빨라진다.⁴ 이는 방전 중에 발생하는 탄소와 가공 부스러기가 간극에서 쉽게 배출되고 공작물과 전극 사이의 단락이 발생하여도 쉽게 절연 상태를 회복할 수 있기 때문이다. 하지만 원형이 아닌 일정한 형상을 갖는 전극 제작이나, 다중 전극 제작을 위한 역방전 가공에서는 전극을 회전시키는 것이 불가능하다. 따라서 가공 중 발생하는 탄소나 가공 부스러기가 간극에서 잘 배출되지 못하고 단락을 일으키거나 불안정한 방전을 야기하는 경우가 많다. 방전 가공 중에 단락이 발생하면 단락이 끊어질 때까지 전극을 후퇴시키고 다시 가공을 시작한다. 전극이 회전할 때는 보통 수 μm 정도 전극을 후퇴시키면 단락이 끊어진다. 하지만 전극이 회전하지 않는 경우에는 전극과 공작물 사이에 가공 부스러기가 녹아 달라붙어 전극을 후퇴시켜도 쉽게 떨어지지 않고 수 십 μm 에서 수 백 μm 까지 후퇴를 해야 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이 때문에 가공 시간이 훨씬 많이 걸리게 된다. 따라서 역방전 가공 시 발생하는 단락을 줄일 수 있는 가공 조건을 찾아내어 전극 제작 시간을 줄이는 것이 중요하다.

RC 회로를 이용한 방전 가공에서 인가 전압과 축전 용량은 단발 방전 에너지에 직접적으로 영향을 미치므로 단락 발생과 밀접한 관계가 있다. 따라서 인가 전압과 축전 용량의 변화가 가공 상태, 특히 단락의 생성과 소멸에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 두께 200 μm 의 구리 판과 지름 300 μm 의 텅스텐 카바이드 전극(WC rod)를 사용하였다. 구리 판에는 음극, WC 전극에는 양극을 걸어주고 전극을 판에 수직하게 이송시켜 가공 시간과 단락의 발생 정도를 평가하였다.

2.2.1 가공 조건: 전압

단락이 발생하지 않는 가공 조건을 찾기 위해 인가 전압의 영향을 알아 보았다. 축전 용량은 650 pF, 이송 속도는 1 $\mu\text{m/s}$ 로 설정하여 가공하였다. Fig. 2 는 80 V 와 100 V 의 전압을 인가하여 역방전 가공 할 때 전극의 이송을 나타낸 그래프이다. 100 V 의 전압을 인가하였을 때는 가공 중에 단락이 거의 발생하지 않고 전극이 안정적으로 이송된 것을 볼 수 있다. 반면에 80 V 를 인가하였을 때는 가공 초기에는 가공 상태가 안정적이었으나,

시간이 흐를수록 단락이 자주 발생하여 가공 속도가 감소하였다. 전극이 500 μm 이상 이송되면 단락이 자주 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 가공 깊이가 증가할수록 탄소나 가공 부스러기가 배출되기 어려워지고 가공 간극에 축적되어 단락이 더 자주 발생하게 되는 것이다. 또한 전극 이송이 1500 μm 이상 되면 단락이 발생하여 전극이 후퇴를 해도 단락이 즉시 없어지지 않고 수 십 μm 이상 후퇴를 해야 없어지는 것을 볼 수 있다. 이는 용융된 가공 부스러기가 전극과 구리 판 사이에 녹아 붙어 더 이상 방전이 일어나지 않고 단락이 지속되기 때문이다.

가공 부스러기가 녹아 달라붙어 일어나는 단락의 빈도는 방전 전류 피크 값이 증가할수록 감소하는데, 이러한 경향에는 다음과 같은 원인들이 있다. 첫째, 전류 피크 값이 증가하면 전극과 구리 판 간의 간극 거리가 증가하여 용융된 부스러기가 달라붙기가 힘들어진다. 둘째, 전류 피크 값이 커질수록 더 많은 방전 열이 발생하므로 간극에 달라붙는 부스러기가 쉽게 끊어지기 때문이다.⁵ 따라서 RC 회로를 사용한 미세 방전 가공에서는 인가 전압이 증가할수록 전류 피크 값이 증가하기 때문에 실험 결과와 같이 방전 전압이 높아질수록 단락이 줄어드는 것으로 판단된다.

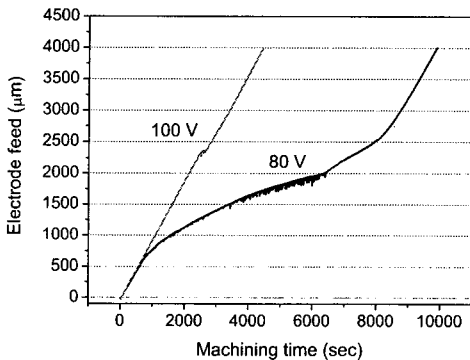


Fig. 2 Electrode feed according to applied voltage: 200 μm thick Cu plate (-), \varnothing 300 μm WC rod (+); capacitance 650 pF

2.2.2 가공 조건: 축전 용량

축전 용량에 따른 가공 특성을 조사하였다. 100 V의 전압을 인가하고 세 개의 다른 축전 용량 (50 pF, 650 pF, 5000 pF) 을 이용하여 가공할 때의

전극 이송 기록을 살펴보았다. Fig. 3 은 각각의 축전 용량에서의 전극의 이송을 나타낸 것이다. 650 pF 을 사용할 때 단락이 발생하지 않고 가공이 안정적인 것을 볼 수 있다. 반면에 축전 용량이 50 pF 또는 5000 pF 일 때는 단락이 자주 일어나 가공이 불안정하며 가공 속도가 느렸다.

방전 가공에서 방전 에너지는 축전 용량에 비례하며 방전 에너지가 증가할수록 단발 방전 제거량과 폭발 압력이 증가한다. 축전 용량이 50 pF 인 경우에 폭발 압력이 작아 부스러기의 배출에 충분하지 못하다. Fig. 3 에서 50 pF 의 축전 용량을 사용했을 때의 전극 이송을 살펴보면 650 pF 의 경우에 비하여 가공 속도가 현저히 작은 것을 볼 수 있다. 배출되지 못한 부스러기로 인한 단락의 발생과 소멸에 따라 수 μm 이상의 후퇴와 전진을 반복하기 때문이다. 한편, 큰 축전 용량인 5000 pF 의 경우에도 가공 속도가 역시 느린 것을 볼 수 있다. 이 경우 방전 압력은 충분한 반면, 단발 방전 제거량이 크기 때문에 생성되는 부스러기의 크기가 크고 양이 많아 이들 중 일부가 전극과 구리 판 사이에 부착되어 쉽게 단락이 발생하기 때문이다.

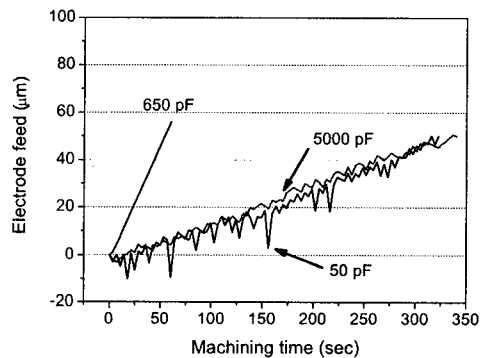
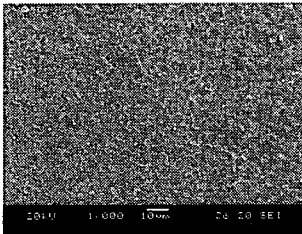


Fig. 3 Electrode feed according to capacitance: (-) 200 μm thick Cu plate, (+) \varnothing 300 μm WC rod; applied voltage 100 V

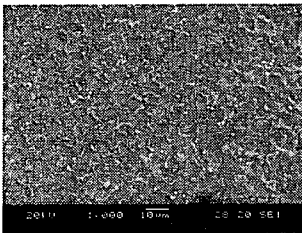
이를 확인하기 위해 각 축전 용량에 따른 가공 후의 WC 전극 표면의 표면 조도를 측정하고 SEM 사진을 통해 그 표면을 살펴보았다. Fig. 4 는 각 축전 용량에 따른 가공 후 WC 전극 표면의 사진이다. 축전 용량이 증가함에 따라 방전흔의 크기는 증가하고 표면 조도는 증가하는데 이는 단발 방전으로 인한 가공 부스러기의 양이 많다는

것을 알 수 있다.

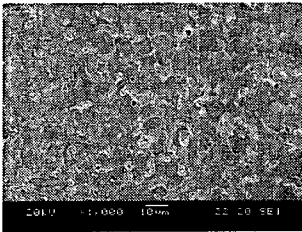
한편, 5000 pF 의 경우는 50 pF 일 때와는 달리 단락이 쉽게 소멸하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 축전 용량이 큰 경우 전류 피크 값이 커서 용융된 부스러기가 간극에 달라붙기 힘들기 때문이다. 따라서 역방전 가공 시 단락을 줄이기 위한 가공 조건으로 100 V, 650 pF 로 선정하였다.



(a) 50 pF, $R_a = 0.11 \mu\text{m}$



(b) 650 pF, $R_a = 0.19 \mu\text{m}$



(c) 5000 pF, $R_a = 0.35 \mu\text{m}$

Fig. 4 The surface of WC rods machined with different capacitances

2.3 미세 전극 제작

역방전을 이용한 미세 전극 제작에 앞서 일정 길이의 전극 가공을 위해서, 필요한 구리 판 전극 두께를 예측할 필요가 있다. 따라서 구리 판 전극으로 WC 붓을 역방전 가공을 할 때의 마멸율을 알아보았다. 마멸율은 WC 붓의 가공량에 대한 구리 판의 마멸량의 비로 정의하였다. 두께 200 μm 의 구리 판으로 지름 300 μm 의 WC 붓을 수직 방향

으로 가공하고 구리 판이 마멸되어 관통될 때 WC 붓이 가공된 길이를 측정하였다. 100 V 를 인가하였고 650 pF 의 축전 용량을 사용하여 가공한 결과 WC 붓이 길이 방향으로 약 2000 μm 가공되었다. 따라서 마멸율은 약 10 % 정도임을 알 수 있다.

다중 전극을 제작하기 위해 구리 판에 미세 구멍을 가공한 뒤 역방전 가공으로 WC 전극을 가공하였다. 구리 판의 미세 구멍 가공은 방전 가공을 이용하였다. Fig. 5 는 역방전 가공에 사용된 구리 판 전극의 형상이며, Fig. 6 은 이 구리 판을 이용하여 가공한 다중 전극의 예이다.

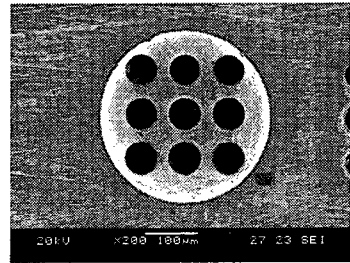


Fig. 5 Copper plate electrode after REDM

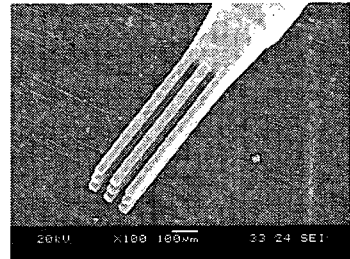


Fig. 6 Multiple electrodes: WC, diameter 35 μm ; applied voltage 100 V, capacitance 650 pF

3. 다중 전극을 이용한 전해 가공

전해 가공은 방전 가공과 달리 전극 소모가 없이 가공이 이루어지므로 전극을 한번만 가공하면 새로 전극을 가공할 필요 없이 계속적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 초단 펄스를 사용하면 가공 간극을 수 μm 이내로 조절하는 것이 가능하여 미세 구조물의 제작이 가능하다.⁶⁻⁸ 반면 초단 펄스를 이용하는 특성상 화학 반응속도가 느리기 때문에 가공 속도가 낮아진다. 하지만 다수의 미세 전극을 이용하여 다수의 형상을 동시에

가공함으로써 생산성을 높일 수 있다.

미세 다중 전극으로 동시에 여러 개의 형상 가공을 하는 다중 가공의 예로서, 다중 구멍 가공을 Fig. 7에 도식적으로 나타내었다. 먼저 미세 방전으로 구리 판에 여러 개의 미세 구멍을 가공한다 (Fig. 7(a)). 이 경우 공구 전극에 음극, 구리 판에 양극을 걸어준다. 그 다음 이 구리 판으로 WC 붕을 가공한다 (Fig. 7(b)). 이 때 극성을 바꿔 주어 WC 붕이 가공되도록 한다. 이렇게 가공된 미세 다중 전극을 이용하여 여러 개의 구멍을 동시에 전해 가공하게 된다 (Fig. 7(c)).

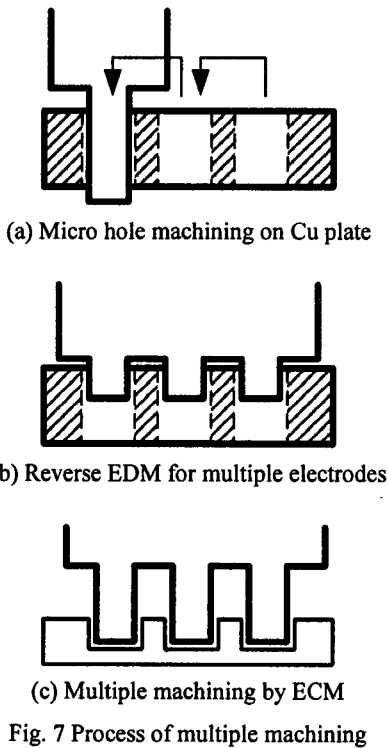


Fig. 8 은 Fig. 6 의 미세 다중 전극을 이용하여 전해 가공으로 미세 구멍을 가공한 것이다. 두께 100 μm 의 스테인리스 강 (STS 304) 에 지름 약 50 μm 의 구멍을 동시에 아홉 개씩 가공을 하여 총 27 개의 구멍을 가공하였다. 0.1 M 황산 용액을 전해액으로 사용하였으며 펄스 폭 90 ns, 6 V 의 펄스를 인가하였다. 아홉 개 구멍을 가공하는데 걸린 시간은 40 분 정도이며, 총 가공시간은 2 시간이 소요되었다. 단일 전극으로 구멍을 하나씩 뚫을 경우

가공 시간은 약 15 분이 걸리므로 다중 전극으로 가공할 때 생산성이 약 4.5 배 향상된 것을 알 수 있다. 초단 펄스를 이용한 전해 가공에서는 초단 펄스 발생기의 전류치가 매우 낮으므로 가공 면적이 커지면 전류 밀도가 반비례해서 떨어지므로 가공 속도가 떨어진다. 따라서 다중 전극으로 구멍을 가공하는 경우, 단일 전극으로 가공할 때보다 전류 밀도가 감소하게 되어 전극의 개수에 비례하여 생산성이 증가하지는 않았다. 보다 많은 개수의 전극으로 가공하거나 넓은 면적의 가공을 하는 경우, 전류 밀도의 감소를 고려하여 펄스 전압이나 펄스 폭을 늘려주거나, 전류를 증폭시킬 필요가 있다.

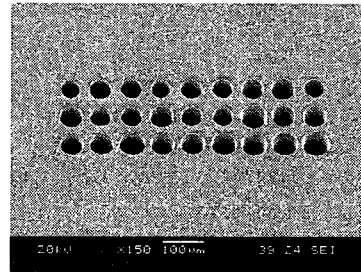


Fig. 8 Hole array machined by ECM: STS 304, \varnothing 50 μm , 100 μm depth; applied voltage 6 V, pulse width 90 ns, \varnothing 35 μm electrode

4. 형조 전해 가공

역방전 가공을 이용하면 다양한 형상의 전극을 제작할 수 있기 때문에 제작된 전극은 구멍 가공뿐만 아니라 3 차원의 미세 형상 가공에도 응용될 수 있다. 일정한 형상의 전극을 이용하면 단순 원형 전극을 이용하여 횡 방향으로 이송하는 경우보다 가공 공정이 간단해지는 장점이 있다. 그 예로서 Fig. 9 의 구리 판을 이용하여 만든 전극을 사용하여 Fig. 10 의 미세 채널 형상을 가공하였다. 전극을 두께 100 μm 의 스테인리스 강 (STS 304) 에 10 μm 를 이송하여 전극 형상을 전사시킨 후 전극의 폭만큼 옆으로 이동시키고 다시 전사시키는 공정을 반복하였다. 0.1 M 황산 용액을 전해액으로 사용하였으며 펄스 폭 90 ns, 6 V 의 펄스를 사용하였다. 전극 이송 속도는 약 0.1 $\mu\text{m/s}$ 로 설정하였다.

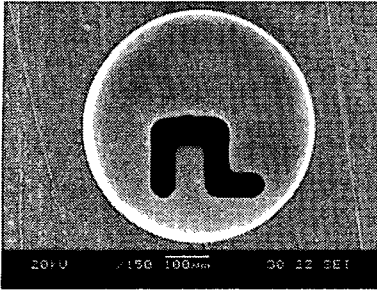


Fig. 9 Copper plate for fabricating a channel shape electrode

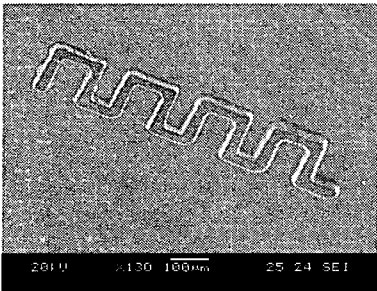


Fig. 10 Channel shape: STS 304, 10 μm depth; applied voltage 6 V, pulse width 90 ns

5. 결론

본 논문에서는 미세 역방전 가공을 이용한 전극 제작 방법에 대하여 연구하였다. 방전 가공 중 일어나는 단락은 가공 시간을 증가시키므로 최대한 발생을 억제하여야 한다. 따라서 초경 재료의 미세 전극을 제작할 때 인가 전압과 축전 용량에 따라 단락 발생 특성을 평가하였다.

- 1) 인가 전압이 80 V 인 경우 단락 발생이 많아지고 쉽게 안 끊어지고 지속되는 것을 볼 수 있는데 이는 전압이 낮아질수록 방전 전류 치가 낮아져 가공 재료가 간극에 융착되기 때문이다.
- 2) 축전 용량이 너무 작으면 방전 폭발력이 작아 부스러기 배출이 어려워지며 방전 전류 값이 작아 단락이 지속된다.
- 3) 축전 용량이 너무 커지면 가공 부스러기의 양이 많아져 단락의 발생이 많아지지만, 전류 피크 값이 커 단락이 지속되지 않는다.

역방전 가공을 이용하면 복잡한 형상의 미세

전극을 제작할 수 있기 때문에 미세 전극을 이용하는 미세 방전 가공, 전해 가공, 초음파 가공, 미세 펀치 가공 등 다양한 공정에 응용될 수 있다. 특히 전해 가공은 전극 마멸이 거의 없기 때문에 그 적용 효과가 높다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 역방전 가공으로 초경 재료에 9 개의 미세 다중 전극을 제작하여 전해 구멍 가공에 적용하였다. 기존의 단일 전극으로 가공하였을 때 보다 약 4 배 이상의 생산성 증가의 효과를 볼 수 있었다. 또한 채널 형상의 전극을 제작하여 형조 전해 가공에도 응용하였다.

참고문헌

1. Takahata, K., Shibaike, N. and Guckel, H., "High-aspect-ratio WC-Co Microstructure Produced by the Combination of LIGA and Micro-EDM," *Microsys. Tech.*, Vol. 6, No. 5, pp. 175-178, 2000.
2. Weng, F.T. and Her, M.G., "Study of the Batch Production of Micro Parts Using the EDM Process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 19, pp 266-270, 2002.
3. 増沢隆久, やさしいマイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, 2000.
4. Kim, B. H., "Micro-Hole Machining Using MEDM with Screw-Type Electrode," Thesis of Master Degree, Seoul National University, 1999.
5. Goto, A., Yuzawa, T., Magara, T. and Kobayashi, K., "Study on Deterioration of Machining Performance by EDMed Sludge and Its Prevention," *Int. J. of Electrical Machining*, No. 3, pp. 1-6, 1998.
6. Choi, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Micro-electrochemical Machining and Deposition," *Proceedings of Korea-Japan Joint Symposium on Nanoengineering*, pp. 64-71, 2003.
7. Ahn, S. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Localized Electro-chemical Micro Drilling Using Ultra Short Pulses," *Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 20, No. 8, pp. 213-220, 2003.
8. Kim, B. H., Ryu, S. H., Choi, D. K. and Chu, C. N., "Micro Electrochemical Milling," *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 124-129, 2005.