

미소구멍의 가공 깊이에 따른 미세방전 가공특성

김재현*, 김보현#, 류시형*, 주종남**

Micro-Hole Machining Using EDM According to Machining Depth

Jae Hyun Kim*, Bo Hyun Kim#, Shi Hyoung Ryu* and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

In order to make a deep and precise micro-hole, electrode wear and clearance between the electrode and the workpiece are important parameters using micro-electrical discharge machining. In this study, experiments were carried out to show the characteristics of electrode wear and radial clearance with respect to the depth of machined hole. Electrode wear varied with respect to the depth of hole. With deeper machined hole, bigger clearance was observed. Also it was found that the diameter of electrode influences machining characteristics of deep holes.

Key Words : Debris (가공 부스러기), Electrode wear (전극 마모), EDM (미세 방전 가공), Micro-hole (미세 구멍), Radial clearance (반경 방향 간극)

1. 서론

최근 MEMS 기술과 관련한 여러 산업 분야에서 미소구멍에 대한 수요가 높아지고 있다. 미세 가공분야나 광전자공학 분야, 그리고 반도체 제조 분야 등은 형상정밀도가 우수하면서 높은 세장비의 미소 구멍을 필요로 한다. 그 예로 마이크로 펀치용 다이, 잉크젯 프린터의 박막 노즐, 그래픽 화면 처리를 위한 전자총, 고속 컴퓨터의 마이크로 연결부, 광학 부품 등을 들 수 있다¹. 이러한 미소구멍은 일반적인 절삭공정으로는 가공하기 어렵기 때문에 특수가공법을 이용하여 가공한다. 특수가공법 중에서도 미세방전 가공기술은 비접촉 가공특성을 지니므로 가공력이 다른 가공법에 비해 극히 작아 미세가공에 매우 적합한 방법이다.

일본의 Masuzawa^{2,3} 등은 정밀하고 깊은 구멍 가공을 위해 수평형 방전 가공기를 이용하여 절연액으로서의 탈이온수, 다양한 전극 형상, 그리고 부가 축전 용량을 이용하는 방법 등을 제시하였다. 일본의 Kagaya⁴ 등은 텅스텐 전극과 탈이온수를 이용하여 직경 0.17 mm, 깊이 2.9 mm의 미소구멍을 가공하였다. 이렇게 응용 사례별로 정밀하면서도 깊은 구멍 가공에 대한 많은 연구가 발표되었으나 가공 깊이(Machining depth)에 따른 가공특성에 대한 체계적인 연구는 적은 실정이다. 본 논문에서는 미소구멍의 가공 깊이에 대한 미세방전 가공 특성을 알아보고 향후 깊은 구멍 가공에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 미세 방전을 이용한 구멍가공

접수일: 2002년 12월 11일; 게재승인일: 2003년 4월 14일
* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
교신저자: 서울대학교 대학원 기계항공공학부
Email: ssborry@plaza1.snu.ac.kr, Tel: (02) 880-7147
** 서울대학교 기계항공공학부

2.1 미세 방전 가공 시스템

가공기는 X, Y 그리고 Z 의 3 축과 주축 C 축을 제어할 수 있고 Delta Tau 사의 PMAC 보드를 사용한다. 주축에 장착되어 있는 미세전극을 회전시키면서 Z 축 방향으로 미세전극을 이송시켜 가공을 수행한다. 방전상태는 전극과 가공물 간의 간극과 밀접한 관계를 가지고 있으므로 반복적인 스파크 방전상태를 지속시키기 위해서 일정한 간극을 유지하여야 한다. 이를 위하여 방전회로의 간극 전압을 측정하여 전극과 가공물의 단락여부를 판단하여 전극이송을 제어하게 된다. 방전회로는 RC 회로와 트랜지스터 회로가 주로 사용된다. 미세방전에서는 단발방전에너지가 매우 작기 때문에 가공효율을 고려할 때 고주파수 전원이 필요하므로 RC 회로가 사용된다. Fig. 1 은 실험에 사용된 RC 방전회로이다.

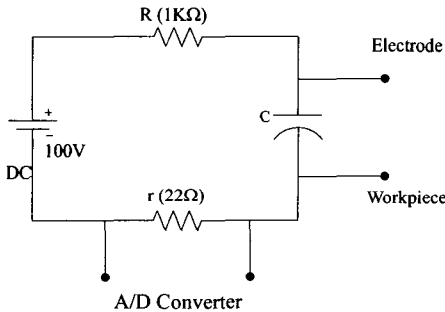


Fig. 1 Electrical discharge circuit

2.2 깊은 미소 구멍 가공

일반적으로 미세 방전 가공으로 미소 구멍을 가공하는 경우 구멍 깊이가 깊어질수록 가공이 불안정해진다. 예를 들어 스테인레스 스틸에 미소 구멍을 가공하는 경우 구멍 깊이 대 직경의 비가 5 이상이 되면 가공이 어려워진다².

이러한 깊은 미소구멍 가공에서 문제점은 가공 깊이가 깊을수록 가공 중에 발생하는 가공부스러기가 구멍 외부로의 배출이 원활하지 못하다는 것이다. 가공 깊이가 깊지 않을 경우에는 방전폭 발력이나 전극의 회전에 의해 가공부스러기의 배출이 용이하나 가공 깊이가 깊을 때는 그렇지 못하다. 일정한 깊이 이상 가공이 진행되어 가공부스러기가 배출되지 못하고 구멍내부에 존재하게 되면 방전이 불안정해지고 지속적인 단락도 발생

할 수 있게 된다.

2.2.1 전극의 마모

Fig. 2 는 깊이 대 직경비가 6 정도인 깊은 미소구멍 가공에서의 전극의 이송(Feed)을 보여주고 있다. 가공시간 1170 초 이후에는 전극과 가공물 사이의 가공부스러기에 의해 계속되는 단락 현상이 발생하여 전극이송에 어려움이 생긴다. 이 가공에서 전극의 총 마모량은 987 μm 이지만 전극마모가 1170 초를 전후로 어떤 특성을 가지는 지 확실하게 알 수 없으며 따라서 시간에 따른 실제의 가공 깊이가 어느 정도인지도 알 수 없다.

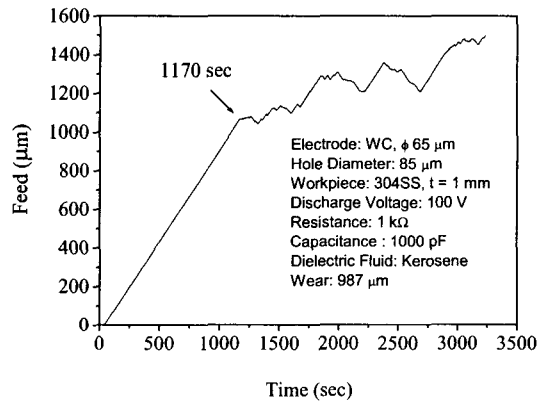


Fig. 2 Electrode feed with respect to time

2.2.2 간극

Fig. 3 은 앞에서 언급한 가공에 사용된 전극과 구멍의 입구이다. 구멍의 직경은 85 μm 이고 간극은 10 μm 이다. 깊은 구멍에서 간극의 크기는 구멍의 품질을 결정하는 데 있어서 중요한 특성이다. 가공 부스러기는 가공 중에 간극을 통해 구멍 밖으로 배출되는데 가공 깊이가 깊을수록 가공 부스러기가 많이 발생하게 된다. 이 때 간극 사이에서 2 차 방전이 발생하여 간극의 크기가 어느 일정치까지 계속 커지게 된다. 따라서 입구의 직경이 출구의 직경보다 크게 되어 테이퍼가 생기는 현상이 깊은 구멍에서 더 심화될 수 있다. 다음 장에서 가공 시간과 가공 깊이에 따른 마모 및 간극의 변화를 실험을 통해 알아보려고 한다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 개요 및 조건

가공 깊이, 또는 가공 시간에 따른 가공 특성을 알아보기 위해서 전극의 총 이송량을 단계적으로 늘려가면서 각 단계마다 전극의 마모, 구멍의 직경, 가공시간 등을 측정하였다. 전극의 마모량은 구멍 가공 전과 가공 후에 공작물의 동일한 지점을 전극으로 전기적 접촉을 시켰을 때 높이 차를 측정하였다. 실험 조건은 Table 1 과 같다. 근사화를 통해 구해진 충격 계수는 약 5%이다.

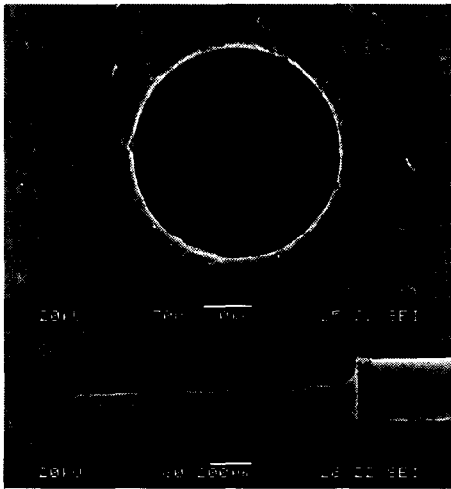


Fig. 3 Example of hole and electrode

Table 1 Machining condition

Electrode	WC
Workpiece	304SS, t = 1 mm
Voltage	100 V
Resistance	1 kΩ
Dielectric Fluid	Kerosene
Capacitance	1000 pF
Feed rate	1 μm/s

3.2 실험 결과

3.2.1 전극의 마모

Fig. 4 는 각 전극의 크기에 따른 이송 그래프이다. 그래프에 표시되어 있는 것처럼 45μm 직경을 제외하고 각 전극의 이송에서 단락이 집중적으로

로 발생하기 시작하는 시간이 존재한다. 45μm 전극의 이송이 다른 직경의 전극과 달리 안정적으로 보이는 것은 전극의 직경이 작아서 이송과 동시에 상대적으로 많은 마모가 발생하기 때문이다. 또한 전극 직경의 크기가 클수록 같은 가공시간에서 실제 가공 깊이가 커지기 때문에 지름이 큰 전극이 단락 발생 시작 시간이 더 짧다.

Fig. 5 는 각 전극에 대한 가공시간에 따른 전극 마모 그래프이다. 직경 45μm 전극을 제외한 전극의 이송에서 가공이 시작한 지 약 1000 초 이후에서 단락이 집중적으로 발생하더라도 단위 가공시간당 마모는 크게 변하지 않는다. 이것은 단락이 발생하여 방전이 불안정해지는 구간에서 이송이 느려진 것에 비해 마모는 상대적으로 커진다는 것을 의미한다. 그리고 Fig. 5 에 화살표로 표시되어 있는 세 가지 점에서 기울기가 급격히 증가하는 이유는 가공 깊이가 깊어져 더 이상 가공은 거의 되지 않고 전극의 마모만 일어나기 때문이다. 45μm 전극은 이송그래프에서 전술한 것과 마찬가지로 직경이 매우 작기 때문에 마모가 가공 시간에 비례하지만 역시 끝부분의 기울기가 급격한 것으로부터 깊은 구멍에서 가공은 거의 되지 않고 마모만 일어나는 것을 알 수 있다.

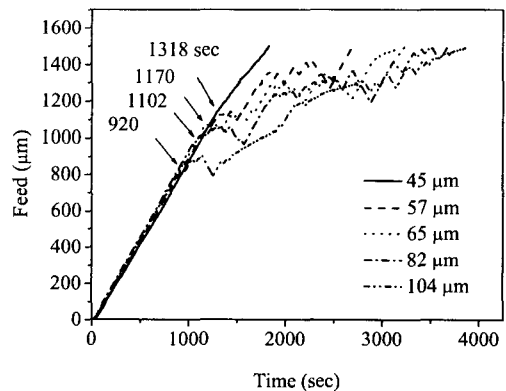


Fig. 4 Electrode feed with respect to time

Fig. 6 은 65μm 직경의 전극에 대하여 마모와 이송을 함께 표시한 그래프이다. 이 그래프에서도 가공이 불안정해지는 구간에서부터 가공되는 깊이에 비해 마모가 상대적으로 증가하는 것을 볼 수 있고 가공 깊이가 한계에 다다르면 마모가 급격히

증가함을 볼 수 있다. Fig. 7 은 가공시간에 따른 가공 깊이의 추이를 나타낸 그래프로서 각 전극들이 일정 깊이에 도달하기까지 걸린 시간을 보여주고 있다. 가공 깊이는 전극 이송량과 가공 후의 전극 마모량의 차를 구하여 구멍의 가공 깊이를 예측하였다. 각 전극 크기마다 가공이 불안정해지는 깊이를 보여주고 있으며 불안정한 방전으로 인해 가공성이 매우 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8 은 104 μm 전극의 이송에서 단락이 발생하기 시작하는 920 초를 기준으로 각 전극의 실제 가공 깊이를 나타내고 있다. 전술한 것처럼 동일한 가공 시간에서는 전극의 직경이 클수록 더 깊이 가공되는 것을 보여주고 있다.

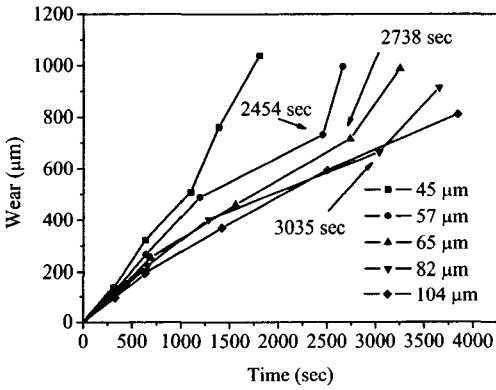


Fig. 5 Electrode wear according to machining time

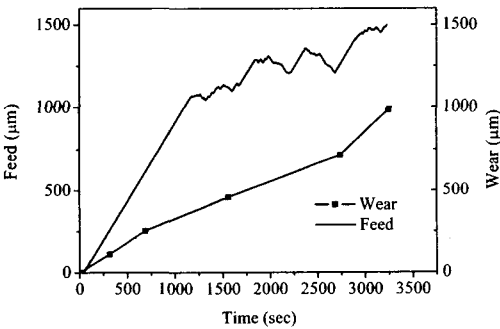


Fig. 6 Wear and feed of $\phi 65 \mu\text{m}$ electrode

가공 깊이가 일정 깊이 이상에 도달하면 마모가 급격하게 증가하는 것은 Fig. 9 에서도 볼 수 있다. 그리고 각 전극이 특정 깊이에서 마모가 급격하게 증가하는 것을 보면 그 직경의 전극이 가

공할 수 있는 한계 구멍 깊이를 예측할 수도 있다. 예를 들어 지름 65 μm 전극은 약 500 μm 깊이가 가공할 수 있는 한계 깊이라고 할 수 있다. 또 104 μm 전극은 본 실험에서 한계의 깊이가 확연히 드러나지 않은 것을 알 수 있다. 즉 이송량(Feed)을 더 증가시키면 더 깊이 가공될 수 있다는 것을 의미한다.

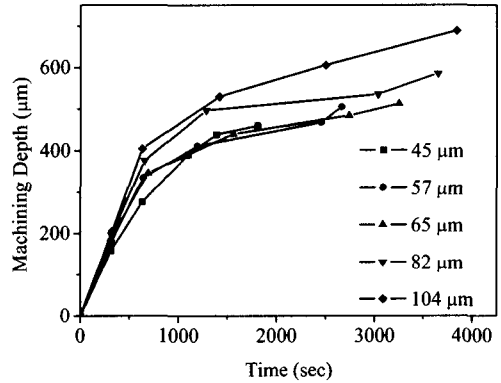


Fig. 7 Machining depth according to machining time

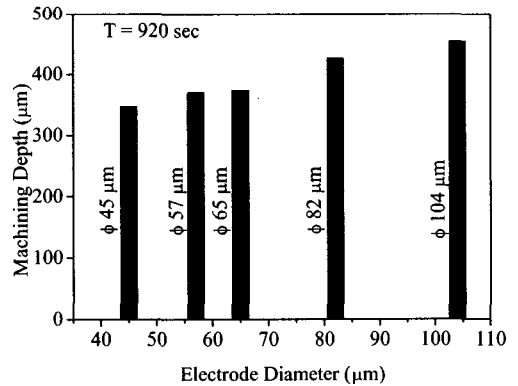


Fig. 8 Machining depth at 920 sec

Fig. 9 에서 전극의 직경이 클수록 더 깊은 구멍 가공이 가능한 것을 알 수 있는데 이 이유는 전극의 직경이 클수록 마모량이 상대적으로 작아 같은 이송량을 기준으로 더 깊이 가공할 수 있기 때문이다. 한가지 유의할 점은 여기서 깊은 구멍이라고 하는 것은 단순 길이 비교에서 나오는 것이며 깊이 대 직경비를 고려한 깊은 구멍에 대해서는 이후의 항에서 다루도록 하겠다.

3.2.2 간극

Fig. 10 은 가공시간에 따른 구멍 입구의 간극 변화이다. 구멍 입구의 간극은 가공 초기에 급격히 증가한다. 그 이유는 가공 초기 구멍이 깊지 않아 방전폭발력에 의한 가공부스러기 배출이 원활하여 가공부스러기와 전극, 그리고 구멍의 옆면이 서로 방전을 일으키면서 구멍이 커지기 때문이다. 그러나 어느 이상 구멍이 커지고 나면 가공부스러기가 구멍 밖으로 배출될 때 더 이상 방전이 일어나지 않게 되어 Fig. 10 에서 볼 수 있듯이 가공시간에 따른 간극변화가 거의 없어지게 된다.

가공 깊이에 따른 간극변화는 Fig. 11 과 같은데 가공 깊이와 간극의 관계는 거의 선형적이다. 그 이유는 가공 깊이가 깊어지면 그 만큼의 가공부스러기가 발생하게 되고 발생된 부스러기가 구멍 밖으로 배출됨에 따라 방전이 일어나게 되어 간극이 증가하기 때문이다. Fig. 7 과 Fig. 10 을 비교해 보면 가공시간에 따른 간극과 가공 깊이의 증가하는 추세가 비슷하다는 것을 알 수 있다.

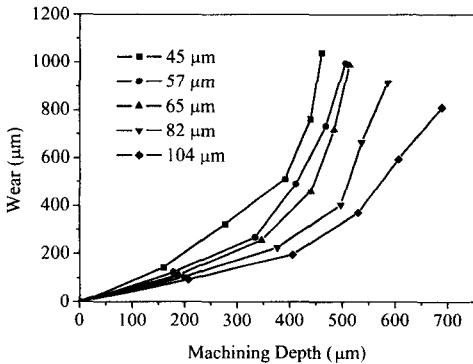


Fig. 9 Electrode wear according to machining depth

한편, Fig. 10 과 Fig. 11 에서 전극 직경에 따른 간극변화도 알 수 있는데 이 변화는 Fig. 12 에 좀 더 명확히 나타나 있다. 전극 직경이 커질수록 간극이 미소하게 증가하고 있다. 그 이유로 두 가지를 들 수 있는데 첫 번째 이유는 전극직경이 커질수록 가공물이 증가하기 때문이다⁵. 두 번째 이유는 다음과 같다. 가공부스러기가 배출될 수 있는 부분의 면적이 전극직경에 비례하여 커지지만 방전면적은 전극직경의 제곱에 비례하여 커지므로 가공부스러기가 존재하는 부분의 밀도는 전극직경

에 비례하게 되어 결과적으로 가공부스러기에 의한 2 차 방전의 가능성이 증가하게 되고 이는 곧 간극의 증가로 이어지게 된다⁶.

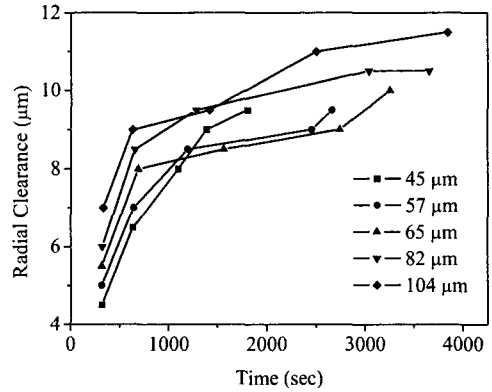


Fig. 10 Radial clearance variation according to machining time

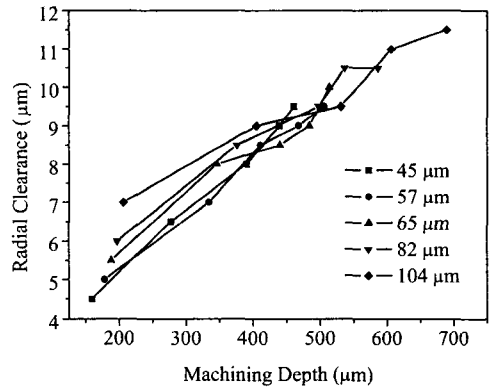


Fig. 11 Radial clearance variation with machining depth

3.2.3 깊이 대 직경비

Fig. 13 은 본 실험에서 얻어진 구멍들에 대한 깊이 대 직경비를 나타내는 그래프이다. 구멍의 입구직경이 증가하는 것에 비해 가공 깊이가 증가하는 것이 월등히 크기 때문에 깊이 대 직경비는 가공 깊이에 따라 선형적으로 증가한다.

주어진 실험 조건에서 45μm 직경의 전극이 깊이 대 직경비가 7 인 가장 깊은 구멍을 가공하였다. 가장 작은 직경의 전극으로 가공한 구멍의 깊이 대 직경비가 상대적으로 가장 큰 이유는 동일

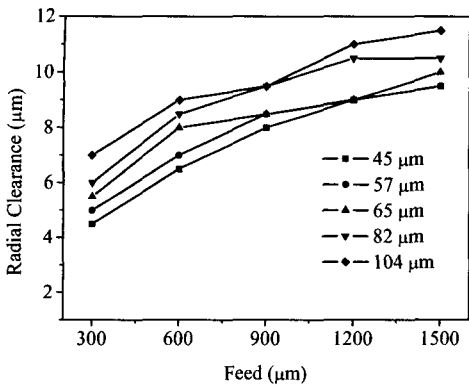


Fig. 12 Radial clearance variation with electrode feed

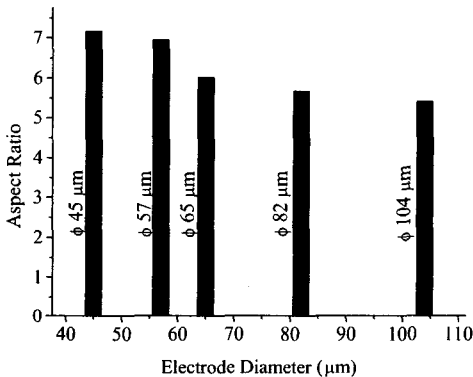


Fig. 13 Aspect ratio according to machining depth

한 실험 조건에서 동일한 이송량을 주었기 때문이다. 그리고 주어진 실험 조건이 약 50μm 인 전극이 가공할 수 있는 한계 깊이를 보여줄 수 있다는 점을 고려해 볼 때 큰 직경의 전극이 가공할 수 있는 한계 깊이를 알 수 있는 실험 조건이 주어지면 큰 직경의 전극을 이용한 가공이 더 큰 깊이 대 직경비를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결론

미소구멍의 가공 깊이에 따른 미세방전 가공 특성을 알아보기 위해 실험을 수행하여 전극마모와 간극 그리고 깊이 대 직경비에 대한 경향을 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 전극의 마모는 가공 깊이에 따라 증가한다. 그리고 가공 깊이가 일정 깊이에 도달하면 전극의

마모는 급격하게 증가하는데 이는 가공부스러기가 원활하게 배출되지 못해 불안정한 방전상태가 지속되는 현상에 기인한다.

2. 구멍의 입구 간극은 가공 깊이에 따라 선형적으로 증가한다. 이는 가공 깊이가 깊을수록 많은 가공 부스러기가 구멍 밖으로 배출되며 이때 구멍 입구에서 2차 방전이 일어나기 때문이다.

3. 주어진 실험조건에서 전극 직경이 작을수록 깊이 대 직경비는 더 크다. 이 이유는 주어진 실험조건이 작은 직경의 전극에 맞춰져 있기 때문이라 판단되며 실험조건이 바뀐다면 큰 직경의 전극이 더 큰 깊이 대 직경비를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Youn, J. W., Yang, Y. M., "A Study on Micro-Hole Drilling by EDM," Trans. of KSME, Vol. 14, No. 5, pp. 1147~1154, 1990.
2. Masuzawa, T., Tsukamoto, J. and Fujino, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM," Annals of the CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 195~198, 1989.
3. Masuzawa, T., Kuo, C.-L. and Fujino, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM Using Additional Capacity," Int. J. of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 275~276, 1990.
4. Kagaya, K., Oishi, Y. and Yada, K., "Micro-electrodischarge Machining Using Water as A Working Fluid - I : Micro-hole Drilling," Precision Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 157~162, 1986.
5. Kim, G. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Machining Rate and Electrode Wear Characteristics in Micro-EDM of Micro-Holes," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 16, No.10, pp. 94~100, 1999.
6. Yan, B. H., Huang, F. Y., Chow, H. M. and Tsai, J. Y., "Micro-hole Machining of Carbide by Electric Discharge Machining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 139~145, 1999.