

미세 방전 가공에서 방전 면적과 축전 용량에 따른 가공율 특성

박동희*, 류시형#, 김보현*, 주종남**

Characteristics of Material Removal Rate According to Discharge Area and Capacitance in MEDM

Dong Hee Park*, Shi Hyoung Ryu#, Bo Hyun Kim* and Chong Nam Chu**

ABSTRACT

In this paper, investigated are the machining characteristics such as material removal rate and machining time with respect to discharge area and capacitance in micro electrical discharge machining (MEDM). As discharge area determined by the electrode size and capacitance change, the optimal feedrate to allow the minimum machining time changes. The smaller discharge area is, the lower MRR becomes because of the area effect. As the capacitance increases, MRR also increases. However there is the limit capacitance beyond which the MRR does not increase anymore. As the discharge area increases, the limit capacitance also increases.

Key Words : Electrical discharge machining (방전 가공), Material removal rate (가공율), Discharge area (방전 면적), Limit capacitance (한계 축전 용량), Area effect (면적 효과)

1. 서론

최근 MEMS/NEMS 기술의 발전 추세에 비취향후 극미세 부품에 대한 수요가 급격히 증가할 것으로 예상되며, 이러한 부품을 제작하기 위해서 마이크로미터 이하의 형상 및 치수 정밀도를 구현할 수 있는 미세 가공 방법의 개발이 요구된다. 그러나 기존의 범용 가공 방식으로는 미세 형상 제작에 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해서 미세 방전 가공 (micro electrical discharge machining), 미세 전해 가공 (micro electrochemical machining),

미세 초음파 가공 (micro ultrasonic machining), 레이저 빔 가공 (laser beam machining), 이온 빔 가공 (ion beam machining) 등 특수 가공 방법과 미세 밀링 (micro milling), 미세 드릴링 (micro drilling), 미세 펀칭 (micro punching), LIGA 공정 등에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 방전 가공은 공구와 가공물이 직접 접촉하지 않는 비접촉식 가공 방법으로 가공물에 물리적인 힘이 작용하지 않아 경도가 높은 재료를 가공할 수 있으며, 공구와 재료 사이의 방전 현상을 이용하여 가공하므로 기존의 방법으로 가공하기 어려운 난삭재의 가공에도

2003 년 7 월 1 일 접수; 게재승인일: 2003 년 11 월 14 일

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
교신저자: 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
Email ryu5449@plaza.snu.ac.kr Tel. (02) 880-7147
** 서울대학교 기계항공공학부

효과적이다.¹ 방전 가공은 초정밀 위치 제어 기술의 발전에 힘입어 미세 구멍이나 복잡한 형상의 캐비티 (cavity) 제작을 위한 미세 가공 방법으로 응용되고 있다. Masuzawa^{2,3,4}는 절연액으로 탈이온수를 사용하여 방전 가공의 가공 특성을 개선시켰고, 또한 부가 축전 용량을 이용하여 가공 중에 발생하는 가공 부스러기 (debris) 의 배출을 용이하게 했으며, 다양한 전극 형상을 이용한 깊은 미세구멍 가공에 관해 연구하였다. Yan⁵은 수평형 마이크로 방전가공기를 이용해서 극성, 전극 크기, 회전속도에 따른 가공 특성 그리고 노치 전극의 가공 성능을 살펴보았다. 최근에 Takahata^{6,7}는 LIGA 공정을 이용하여 다수의 전극을 만들어 방전 가공을 통해 여러 개의 구멍을 동시에 가공하는 방법을 발표했다. 지금까지 미세 방전 가공에서는 형상 크기의 최소화, 세장비의 증가, 전극 마모의 감소에 관한 연구가 많이 이루어졌다.^{8,9} 방전 가공에서 축전 용량 및 전극 이송속도는 가공면의 품질과 정밀도, 가공 효율을 결정하는 매우 중요한 인자이다. 그러나 미세 방전 가공에서 방전 면적에 따른 가공 특성 분석 및 이송 최적화 등에 관한 연구는 아직 미진한 실정이다. 본 논문에서는 전극의 크기와 축전 용량에 따른 최적 이송속도 및 방전 특성에 대해 고찰하였다.

2. 전극 이송 알고리즘과 가공 여유

방전 면적에 따른 MRR, 가공 시간 등 미세 방전 가공 특성 실험과 관련된 전극 이송 알고리즘과 가공 여유 등의 가공 요소를 본 절에 기술하였다. 전극과 가공물 사이에 일정한 전압을 걸고, 전극은 고정된 이송속도 (feedrate) 로 step 만큼 전진한다. 그 후 제어기는 극간 상태를 나타내는 전압을 받아 전극의 전진 여부를 판단한다. 전극과 공작물 사이에 단락이 발생하지 않으면 (open circuit) 전극은 다시 step 만큼 전진하고 제어기는 다시 전압을 피드백 받는다. 그러나 전극과 공작물이 단락된 상태 (short circuit) 라면 전극이 부러지는 것을 방지하기 위해 전극을 뒤로 후퇴 (set back) 하고 그 횟수 (short counts) 를 기록하는 알고리즘을 사용하였다. 이 때 step 의 크기를 작게 할 경우 제어기가 방전유무 판단을 빈번히 하게 되어 전극은 명령된 이송속도보다 작은 이송속도로 전진하게 된다. 또한 step 의 크기를 지나치게 크게 할

경우 제어기가 전극과 공작물 사이에 단락이 일어난 상태를 빠르게 판단하지 못할 수 있어 전극 파손의 우려가 있다. Table 1 은 이송 길이가 100 μm , step 의 크기가 2 μm 일 때 지령된 이송속도와 실제 이송속도와의 차이를 보여준다. 이송속도가 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 일 때 실제 이송속도는 지령된 이송속도의 90 % 정도임을 알 수 있다. Step 의 크기를 더 증가시키면 명령된 이송속도와 실제 이송속도의 차이는 감소되지만 미세 방전 가공에서 일반적인 이송속도는 10 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이내이므로 본 논문에서는 2 μm step 으로 고정하고 실험하였다.

Table 1 Ideal and actual feedrate with 2 μm feed step

Feedrate ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	Ideal time (sec)	Actual time (sec)	Actual feedrate ($\mu\text{m}/\text{sec}$)	Following rate (%)
0.5	200	200.83	0.5	99.6
1	100	100.98	0.99	99
2	50	51.05	1.96	97.9
4	25	26.12	3.83	95.7
5	20	21.08	4.74	94.9
6	16.67	17.77	5.63	93.8
10	10	11.12	8.99	89.9

방전 폭발은 전극과 가공물 사이의 절연 상태가 파괴되면서 발생하고 이로 인해 전극과 구멍 사이에는 일정한 간극이 존재하는데 이를 가공 여유 (machining clearance) 라고 정의한다. Figure 1 은 100 V, 전극직경 50 μm 에서 축전 용량에 따른 가공 여유의 크기를 보여준다. 축전 용량이 증가될수록 가공 여유는 증가하고, 구멍 입구쪽의 가공 여유가 출구쪽의 가공 여유보다 크다.

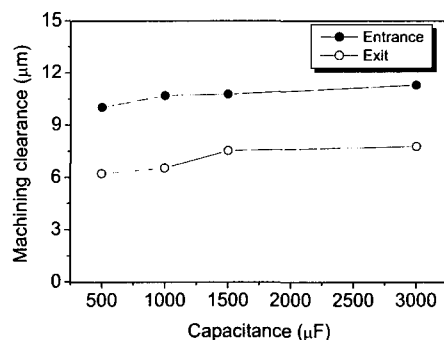


Fig. 1 Machining clearance according to capacitance

가공율 (material removal rate; MRR) 은 단위시간 동안 제거된 공작물의 부피를 의미하며 이는 가공 효율을 나타내는 개념으로서 방전 에너지와 밀접한 관계를 가지고 있다. 미세 방전 가공에서 전극 직경과 가공 여유의 크기는 Fig. 2 로부터 유추할 수 있다. 가공 여유가 전극의 크기와 무관하다고 가정할 때, 공구와 공작물 사이의 간극 단면적 A_p , a_p 는 전극의 반경 R , r 에 각각 비례하게 된다. 반면 일차 방전이 발생하는 전극 밀면의 방전 면적 A_w , a_w 는 전극 반경의 제곱에 비례한다. 따라서, 단위 간극 단면적에 대한 방전 부스러기 (debris) 의 밀도는 전극의 반경에 비례하게 된다. 그러므로 전극의 크기가 클수록 부스러기에 의한 이차 방전의 가능성이 증가하고 가공 여유는 커지게 된다.⁵

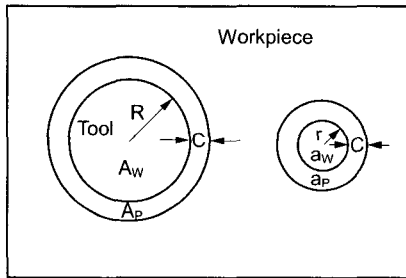


Fig. 2 Effect of electrode diameter on machining clearance.⁵ (A_p : clearance area with large electrode, a_p : clearance area with small electrode, A_w : work area with large electrode, a_w : work area with small electrode, C: machining clearance)

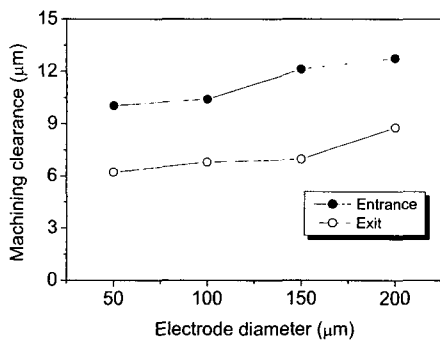


Fig. 3 Machining clearance according to electrode diameter

Fig. 3 은 500 pF 일 때 전극 직경에 따른 가공 여유를 나타내고 있다. Figure 3 으로부터 전극 직경이 증가할수록 가공여유가 커짐을 확인할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 시스템 구성 및 가공 조건

실험에 사용된 미세 방전 시스템과 RC 방전 회로를 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타냈다. 전극은 WC 를 사용하였고 공작물은 304 SS, 절연액은 Kerosene 이며 기타 가공 조건은 Table 2 와 같다.

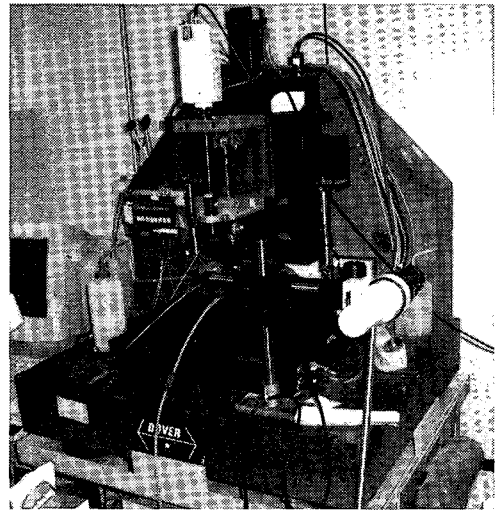


Fig. 4 MEDM system

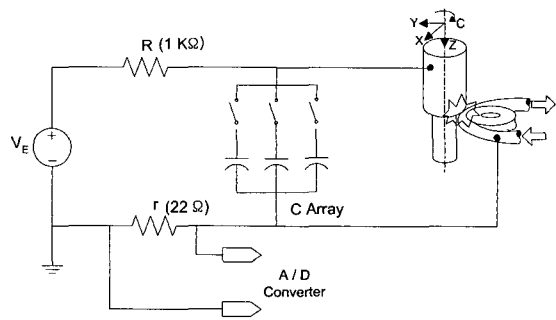


Fig. 5 Electrical discharge circuit

방전 면적에 따른 가공시간의 관계를 알아보기 위해서 다양한 전극 직경 25, 50, 100, 150, 200

μm 를 사용하였으며, 가공물의 두께는 $300 \mu\text{m}$ 를 사용했으나, 전극 직경 $25 \mu\text{m}$ 일 때는 세장비를 고려해서 $100 \mu\text{m}$ 두께의 가공물을 사용하였다. 축전 용량에 따라 가공 시간이 어떻게 변하는지를 알아보기 위하여 축전 용량은 부유 축전 용량 및 100, 500, 1000, 1500, 3000 pF 에 대해 실험하였으며 최소가공 시간을 얻기 위해 전극의 이송속도를 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}/\text{sec}$ 만큼 증가시켜서 가공을 하였다.

Table 2 Machining condition

Electrode	WC
Workpiece	304 SS
Voltage	100 V
Resistance	1 K Ω
Dielectric fluid	Kerosene

3.2 최적 전극 이송속도

전극의 이송속도와 방전에 의한 공작물의 제거 속도가 동일한 때를 본 논문에서는 이상적인 이송속도로 정의한다. Figure 6 은 전극 직경이 $200 \mu\text{m}$ 일 때 각 축전 용량에서 이송속도에 따른 가공시간의 변화를 나타낸 것이며, Fig. 7 은 이 때의 단락 횟수를 측정 한 결과이다. 이송속도가 증가함에 따라 가공 시간이 감소하다가 일정 이송속도를 지나면 가공 시간이 다시 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 가공 시간이 감소하는 영역은 이송속도가 이상적인 이송속도보다 작아 공구와 공작물 사이의 간격이 안정된 방전이 이루어질 수 있는 간격보다 커서 다시 방전이 발생할 때까지 시간 지연이 생기는 영역이다. 따라서 이송속도를 증가시키면 이송에 불필요하게 소요되는 시간을 줄일 수 있어 가공시간이 감소한다. 이 영역에서는 가공 시간은 길지만 안정된 방전이 이루어질 수 있어서 공구와 공작물 사이의 단락 발생은 거의 없다. 이러한 가정은 Fig. 7 의 단락횟수 측정 결과로부터 확인할 수 있다. 가공 시간이 다시 증가하는 영역에서는 이송속도가 이상적인 이송속도보다 커서 전극과 가공물 사이에 잦은 단락이 발생한다. 전극 파손 방지를 위해 단락이 발생하면 전극을 후퇴시키고 다시 전진시키는 과정이 필요하므로 이 때문에 가공 시간이 증가하게 된다. Figure 7 에서 가공 시간이 다시 증가하는 시점부터 단락횟수가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있으며 따라서

미세 방전 가공의 효율성을 제고하기 위해서는 이송속도를 가공 시간이 최소가 되는 최적 이송속도로 설정할 필요가 있다.

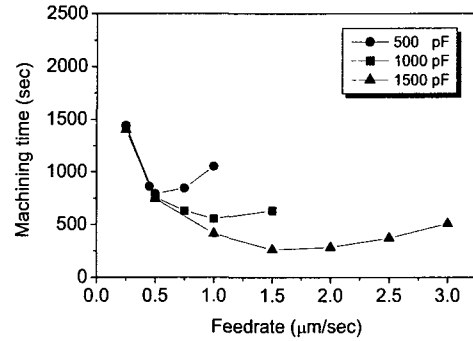


Fig. 6 Machining time according to feedrate and capacitance with $\phi 200 \mu\text{m}$ electrode

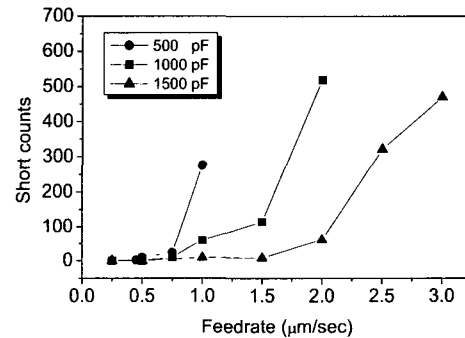
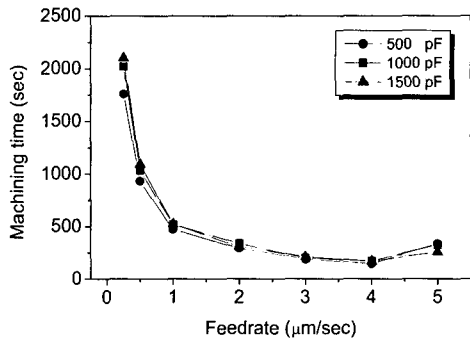


Fig. 7 Short counts according to feedrate and capacitance with $\phi 200 \mu\text{m}$ electrode

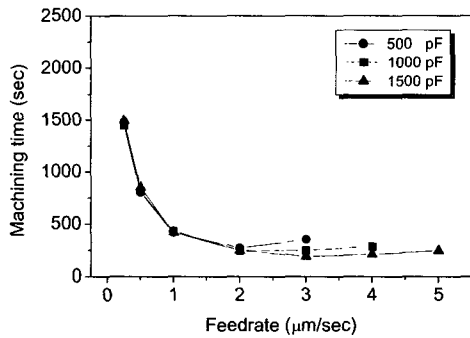
3.3 전극 직경에 따른 가공 시간

공구와 공작물사이의 방전 특성은 방전 면적에 의해 영향을 받으므로 미세 방전 가공에서 전극 크기에 따른 최적 이송속도를 살펴보는 것은 의미있는 일이다. 또한 축전 용량은 가공특성에 가장 큰 영향을 주는 요소로서 축전 용량에 따라 최적 이송속도를 찾는 것이 필요하다. Figure 8 은 직경이 다른 전극으로 가공을 하면서 축전 용량에 따른 가공 시간의 변화를 나타낸 그래프이다. Figure 8 의 (b), (c) 와 Fig. 6 의 결과 ($\phi 200 \mu\text{m}$) 로부터 전극 직경이 $100 \mu\text{m}$ 이상일 때 축전 용량이 증가할수록 최적 이송속도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 축전 용량은 단발 방전 에너지와 비례관계에 있으며 이 때문에 축전 용량이 커지면 제거량이 증가하고 따라서 최적 이송속도는 증가하게

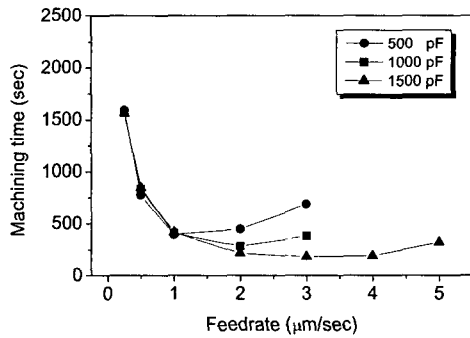
된다. 반면 Fig. 8 의 (a) 에서 볼 수 있듯이 공구 직경이 50 μm 인 경우에는 축전 용량을 증가시켜도 최적 이송속도는 거의 변화가 없다. 이는 방전 면적이 작을 때 단발 방전 에너지를 크게 하면 오히려 가공 속도가 저하된다는 면적효과가 미세 방전에도 존재함을 의미한다. 1 가공 면적이 증가할수록 최적 이송속도는 감소하는데 이는 가공 면적이 증가하면 공구와 공작물의 단락 가능성이 증가하여 느린 이송속도에서 안정된 방전이 이루어지기 때문이다.



(a) ϕ 50 μm , 100 V, 1 K Ω



(b) ϕ 100 μm , 100 V, 1 K Ω



(c) ϕ 150 μm , 100 V, 1 K Ω

Fig. 8 Machining time according to electrode diameter

Figure 9 는 방전 면적과 축전 용량에 따라 최적 이송속도에서의 가공시간을 비교한 그래프이다. 전극 직경이 커질수록 가공 시간이 증가하고, 축전 용량이 증가할수록 가공 시간이 단축됨을 알 수 있다. 또한 전극 직경이 클 때는 축전 용량을 높이면 가공 시간이 많이 단축되지만, 직경이 작을 때는 큰 축전 용량을 사용해도 가공 시간이 크게 단축되지 않음을 알 수 있다. Figure 1 에서 보듯이 축전 용량을 증가시킬수록 가공여유가 증가하므로 직경이 작을 때 큰 축전 용량을 사용하면 가공여유가 증가해서 가공 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 직경이 작을 때는 작은 축전 용량을 사용하는 것이 가공 시간과 가공 정밀도 측면에서 바람직하다. 가공 면적에 따른 가공 특성을 파악하기 위해 가공 시간과 함께 단위 시간당 공작물의 제거량을 살펴보았다. Figure 10 은 전극직경에 따른 가공율을 나타낸 것으로 축전 용량이 증가할수록 가공율은 증가된다.

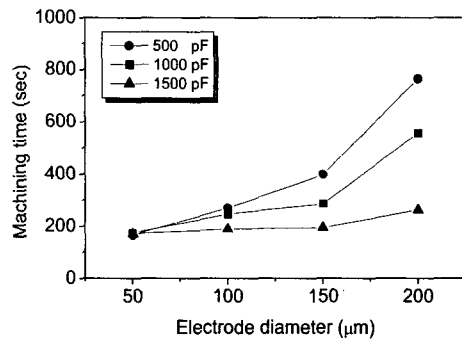


Fig. 9 Minimum machining time according to electrode diameter and capacitance

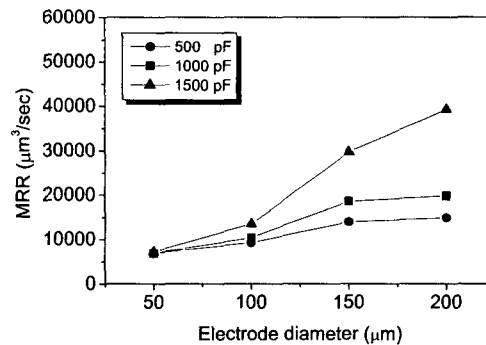
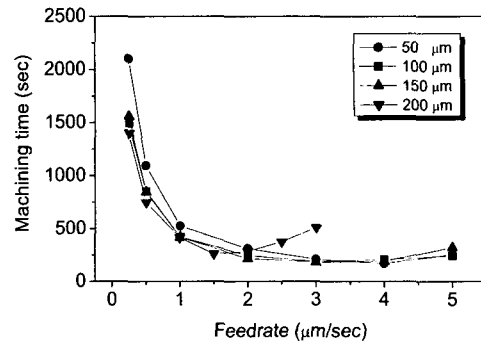


Fig. 10 Material removal rate according to electrode diameter and capacitance

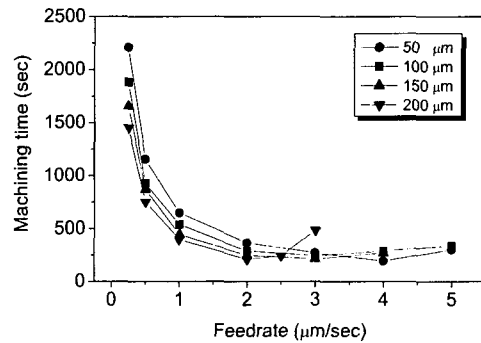
방전 면적이 작아질수록 가공율은 떨어짐을 알 수 있는데 이는 면적효과로 인해 직경이 작아질수록 가공속도가 저하되기 때문이다.

3.4 축전 용량에 따른 가공 시간

방전 가공에서 방전 에너지는 축전 용량에 비례하기 때문에 축전 용량은 중요한 가공특성 요소 중의 하나이다. Figure 11은 축전 용량 및 전극 크기에 따른 가공 시간을 측정한 것으로 축전 용량이 증가할수록 가공 시간이 감소함을 볼 수 있다. Figure 11의 (c)는 축전 용량이 1500 pF일 때 전극 직경에 따른 가공 시간 그래프이다. 전극 직경이 200 μm 일 때 이송속도 1.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 에서 가공 시간이 최소가 되었으며, 다른 직경에 대해서는 대략 이송속도 4 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 에서 가공 시간이 최소였다. Figure 11의 (d)는 축전 용량 3000 pF에서의 전극 직경에 따른 가공 시간 결과로서, 직경 50, 100, 150 μm 일 때 최소 가공 시간은 축전 용량 1500 pF에서의 직경 50, 100, 150 μm 의 최소 가공 시간과 크게 다르지 않다. 그러나 축전 용량 3000 pF, 직경 200 μm 일 때의 최소 가공 시간은 축전

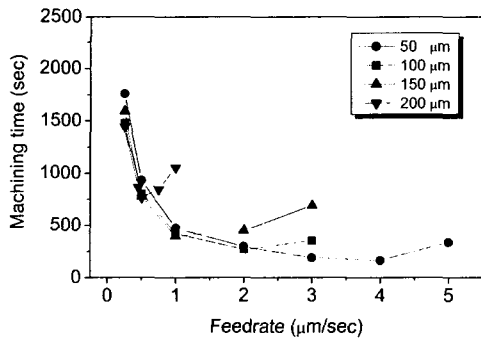


(c) 1500 pF, 100 V, 1 K Ω

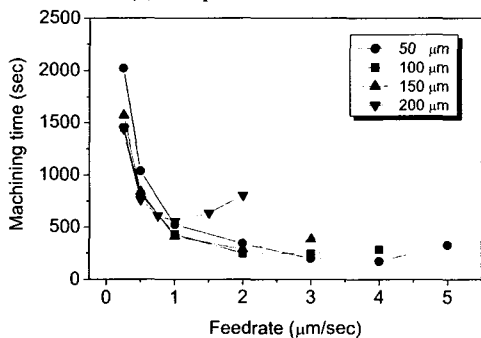


(d) 3000 pF, 100 V, 1 K Ω

Fig. 11 Machining time according to capacitance



(a) 500 pF, 100 V, 1 K Ω



(b) 1000 pF, 100 V, 1 K Ω

용량 1500 pF, 직경 200 μm 일 때의 최소 가공 시간보다 작다. 위의 결과로 알 수 있듯이 더 큰 축전 용량을 사용하더라도 전극 직경 50, 100, 150 μm 에서는 더 이상의 가공 시간 단축을 기대하기 어렵다. Figure 11의 결과로부터 축전 용량을 증가시켜도 더 이상 가공 시간이 감소되지 않는 축전 용량이 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 축전 용량과 방전 면적의 관계를 규명하기 위해 다양한 전극 직경에서 축전 용량에 따른 가공율을 측정하였다. Figure 12는 전극 직경 50, 100, 150, 200 μm 에서, Fig. 13은 전극 직경 25, 50 μm 에서 축전 용량에 따른 가공율의 변화를 나타낸 것이다. 가공율은 가공된 구멍의 입구 직경과 출구 직경 그리고 구멍의 깊이에 의해서 정해지는 제거량을 가공 시간으로 나누어 계산하였다. 그래프에서 보듯이 일정 범위에서는 축전 용량이 증가할수록 가공율은 증가한다. 그러나 축전 용량을 증가시켜도 가공율이 더 이상 증가되지 않는 지점이 존재함을 알 수 있었으며 본 논문에서는 이를 각 전극 직경에 대한 한계 축전 용량으로 정의하였다. 따라서

방전 가공에서 한계 축전 용량보다 큰 축전 용량으로 가공을 하더라도 가공 시간은 단축되지 않으며, 오히려 Fig. 1 에서 보듯이 가공여유의 증가로 가공정밀도는 떨어진다. 실험한 축전 용량 범위에서는 전극 직경 200 μm 일 때 한계 축전 용량을 찾을 수 없지만 다른 전극 직경에서는 방전 면적이 커질수록 한계 축전 용량이 증가함을 확인할 수 있었다. Figure 12 의 전극 직경 50 μm 일 때 실험한 축전 용량 범위에서 가공율은 거의 일정함을 볼 수 있다. 그러므로 한계 축전 용량을 확인하기 위해서 전극 직경 50 μm 이하에서는 500 pF 보다 작은 축전 용량을 사용하고 세장비를 고려해서 두께 100 μm 의 가공물을 가공하였다. Figure 13 은 전극 직경 25, 50 μm 에 대해서 축전 용량에 따른 가공율을 나타낸 것으로 전극 직경 50 μm 에서도 한계 축전 용량이 존재함을 확인할 수 있으며, 전극 직경 20 μm 에서는 실험된 범위 이하의 조건에 한계 축전 용량이 있는 것으로 생각된다.

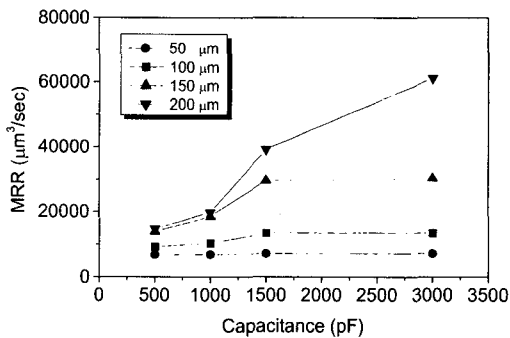


Fig. 12 Material removal rate according to capacitance and electrode diameter. (ϕ 50 μm , ϕ 100 μm , ϕ 150 μm , ϕ 200 μm)

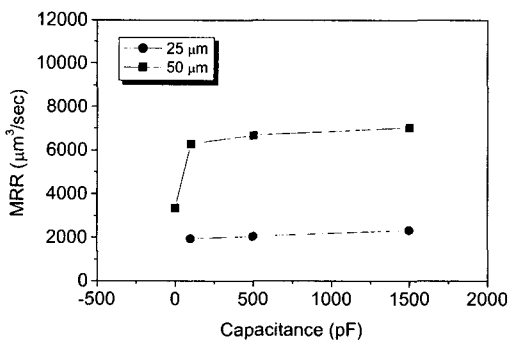


Fig. 13 Material removal rate according to capacitance and electrode diameter. (ϕ 25 μm , ϕ 50 μm)

4. 결론

미세 방전 가공에서 방전 면적과 축전 용량에 따른 가공 특성을 고찰하였다. 방전 면적과 축전 용량에 대한 가공 시간과 가공율의 변화를 실험하였으며 각 조건에 따른 최적 이송속도, 한계 축전 용량 등을 조사하여 다음의 결론을 도출하였다.

1) 미세 방전 가공에서 전극 크기 즉, 방전 면적에 따라 가공 시간이 최소화되는 최적 이송속도가 존재한다. 전극 이송속도와 방전에 의한 공작물의 제거 속도가 동일할 때가 이상적인 이송속도이며, 이송속도가 이상적인 이송속도보다 작으면 이송속도에 의해 가공 시간이 지연되며, 이송속도가 이상적인 이송속도 보다 크면 잦은 단락이 발생하여 가공 시간이 증가한다.

2) 미세 방전에서 방전 면적이 작아질수록 가공율은 떨어진다. 이는 방전 면적에 비해 방전에 너자가 지나치게 크면 가공속도가 저하되는 면적 효과 때문이다. 따라서 방전 면적이 넓은 때는 큰 축전 용량을 사용하여 가공 시간을 크게 단축시킬 수 있지만, 방전 면적이 작을 때는 작은 축전 용량을 사용하여 가공여유를 감소시키는 것이 바람직하다.

3) 미세 방전에서 방전 면적에 따른 한계 축전 용량이 존재한다. 일반적으로 가공율은 축전 용량에 비례하여 증가하나 축전 용량을 증가시켜도 더 이상 가공율이 증가하지 않는 한계 축전 용량이 존재한다. 한계 축전 용량 이상의 축전 용량으로 가공할 경우 가공 시간은 단축되지 않는 반면 가공 정밀도는 떨어지게 된다. 이러한 한계 축전 용량은 방전 면적이 커질수록 증가한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Kim, C. H., Electrical Discharge Machining, Kigeon Publishing Co., Seoul, Korea, 1995.
2. Masuzawa, T., and Tanaka, K. "Water Based Dielectrics Solution for EDM," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 1, pp. 119-122, 1983.

3. Masuzawa, T., Kuo, C. L., and Fujino, M., "Drilling of Deep Microholes by EDM Using Additional Capacity," Bull. of Japan Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 275-276, 1990.
4. 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.
5. Yan, B. H., Huang, F. Y., Chow, H. M., and Tsai, J. Y., "Micro-hole Machining of Carbide by Electric Discharge Machining," J. of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 139-145, 1999.
6. Takahata, K., Shilbaike, N., and Guckel, H., "A Novel Micro Electro Discharge Machining Method Using Electrodes Fabricated by the LIGA Process," Proc. of the 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 238-243, 1999.
7. Takahata, K., and Gianchandani, Y. B., "Bath Mode Micro-EDM for High Density and High-Throughput Micromachining," Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 72-75, 2001.
8. 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 Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 10, pp. 94-100, 1999.
9. Kim, J. H., Kim, B. H., Ryu, S. H., and Chu, C. N., "Micro-Hole Machining Using MEDM According to Machining Depth," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 227-232, 2003.