

트랜지스터 부착 RC 방전회로의 마이크로 방전가공 특성

조필주*(서울대 대학원 기계항공공학부), 이상민(서울대 대학원 기계항공공학부),
최덕기(강릉대 정밀기계공학과), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Characteristics of RC circuit with Transistor in Micro-EDM

P. J. Cho*(Sch. of Mech. And Aero. Eng., SNU), S. M. Lee(Sch. of Mech. And Aero. Eng., SNU),
D. G. Choi(Dep. of Precision Mech. Eng., KNU), C. N. Chu(Sch. of Mech. And Aero. Eng., SNU)

ABSTRACT

In micro-EDM, it is well known that RC circuit is suitable for discharge circuit because of its low pulse width and relatively high peak current. To increase machining speed without changing unit discharge energy, charge resistance should be decreased. But, if very low, continuous (or normal) arc discharge occurs, then increases electrode wear and reduces machining speed remarkably. In this paper, RC circuit with transistor is used to micro-EDM. Experimental results show that RC circuit with transistor can cut off continuous (or normal) arc discharge effectively if duty factor and switching period of transistor are set up optimally. Through experiments with varying charge resistance, it can be known that RC circuit with transistor has about two times faster machining speed than that of RC circuit. Especially, it has prominent rise-effect of machining speed in low unit discharge energy, so that a high-quality and high-speed micro-EDM can be realized through RC circuit with transistor.

Key Words : RC circuit with TR(트랜지스터 부착 RC 회로), Continuous arc discharge(연속 아크방전), Normal arc discharge(정상 아크방전), High-speed micro-EDM(고속 마이크로 방전가공)

1. 서 론

마이크로 방전가공 (Micro-EDM) 은 전도성을 가진 광범위한 재료에 대한 가공이 가능하고 0.1 μm 단위의 표면거칠기와 우수한 형상정밀도를 얻을 수 있는 장점으로 인해 3 차원 미세형상을 얻으려는 마이크로 머신의 가공기술로 크게 각광받고 있다 [1-3]. 마이크로 방전가공의 방전회로는 독립적인 펄스상의 전류파형으로 가공하는 '트랜지스터 방전회로 (TR discharge circuit)' 와 전극과 공작물 간의 절연상태에 따라 방전여부가 결정되는 'RC 방전회로 (RC discharge circuit)'로 나눌 수 있다. 트랜지스터 방전회로는 가공물로 들어가는 전류를 차단시켜 절연회복이 매우 빠르므로 펄스폭과 주기의 비로 정의되는 충격계수 (duty factor) 가 매우 높아 가공속도를 향상시킬 뿐 아니라 저소모 방전가공 및 각종 적응제어 기법의 적용이 가능하다. RC 방

전회로는 비록 충격계수는 낮지만, 트랜지스터 방전회로에서 얻기 힘든 0.1 μs 이내의 짧은 펄스폭 (pulse width) 과 입력 전원전압에 대해 상대적으로 높은 전류피크치를 얻을 수 있어 저에너지, 고주파 방전이 요구되는 마이크로 방전회로에 적합한 것으로 알려져 있다 [4]. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 RC 방전회로의 낮은 가공속도는 가공성을 크게 저해시키는 요인이다. 최근 소자기술의 발전과 더불어 트랜지스터의 스위칭 (switching) 속도도 고속화되어 RC 방전회로의 펄스폭에 근접하는 수준까지 이르렀다. 따라서 트랜지스터 회로가 가지는 가공파라미터의 제어독립성을 고려할 때 트랜지스터의 고속스위칭을 이용한 RC 방전회로 즉 트랜지스터 부착 RC 방전회로 (RC circuit with transistor) 의 마이크로 방전가공성을 살펴보는 것은 매우 의미 있는 작업이다.

본 논문에서는 먼저 RC 방전회로를 사용한 고

속 마이크로 방전가공의 한계를 살펴보고, 트랜지스터 부착 RC 회로의 마이크로 방전가공 특성 특히 고속 가공에 초점을 둔 가공성에 대해 살펴보기로 한다.

2. RC 방전회로를 사용한 고속 마이크로 방전 가공

2.1 고속 마이크로 방전가공 조건

역극성을 사용하는 범용 방전가공에서는 전류피크치 I_p , 펄스폭 τ_d 및 충격계수 D 가 클수록 가공속도가 큰 것으로 보고되고 있다 [5]. 즉 근사적으로 가공속도가 방전전력에 비례하는 것으로 해석할 수 있다. (1) 에 단발방전에너지를 방전주기로 나누는 방전전력 P 에 대한 식을 나타낸다. 당연히 단발 방전에너지를 높이는 조건 즉 개방전압 V_E 를 높이는 조건에서 방전전력이 높다.

$$P = \frac{E_{unit}}{T} = \frac{CV_E^2}{2(R_1 C \ln(V_d/V_E - 1) + \pi \sqrt{L_2 C})} \quad (1)$$

여기서 R_1 , L_2 , C , V_d 는 충전부 저항, 방전부 인덕턴스, 축전용량, 방전개시 전압을 각각 의미한다. 그러나 단발 방전에너지를 높이는 가공조건은 가공물 표면에 심한 열변형층을 유발하여 표면거칠기 등의 가공품질을 저하시키고, 매우 큰 전극소모를 야기시킨다. 특히 미세 구멍의 마이크로 방전가공에서는 가공구멍의 입출구 직경이 단발 방전에너지에 비례하여 증가하므로 직경 10 ~ 30 μm 의 미세 구멍을 높은 단발 방전에너지로 가공하는 것은 매우 힘들다. 일반 RC 방전회로에서 충격계수는 10 ~ 20 % 정도의 범위로 일반 트랜지스터 방전회로의 충격계수보다 월등히 낮으므로 충전시간 즉 방전휴지시간의 방전주기에 대한 영향이 그만큼 크다. 따라서 주어진 소량의 단발 방전가공에너지에서 고속가공을 실현하려면 충전부 저항을 줄이는 것이 바람직하다.

2.2 충전부 저항에 따른 가공성

충전부 저항의 변화에 따른 RC 방전회로의 마이크로 방전가공 특성을 살펴보았다. 공작물은 스테인레스 스틸 (304SS) 두께 100 μm 를 사용하였고, 전극재료는 텅스텐 (W)을 직경 50 μm 로 가공하여 사용하였다. 전극을 음극으로 하는 정극성을 취하고, 절연액은 전용 방전액 (EDM100)을 사용하였다. 충전부 저항은 242.5, 523.3, 1032.3, 2021.3 Ω 으로 하고, 개방전압은 100 V, 충전부, 방전부 인덕턴스는 케이블 인덕턴스 (cable inductance) 로 설정하였다.

단발 방전에너지에 대한 영향을 살펴보기 위해 축전용량 100 pF, 1000 pF 에 대해 각각 실험하였다. Fig. 1 에 충전부 저항에 따른 전극마모 및 가공시간을 나타내었다.

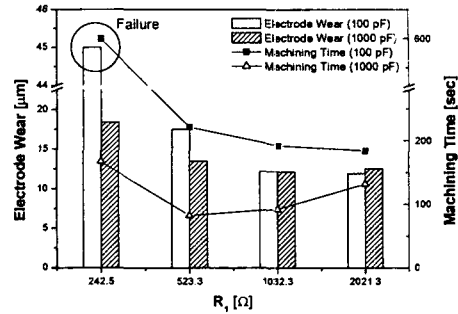


Fig. 1 Electrode wear and machining time w.r.t. charge resistance (RC circuit)

충전부 저항이 줄어들면 단발 방전에너지의 변동 없이 충전시간이 감소하여 방전전력이 상승하고 따라서 가공시간의 감소가 예상되었다. 1000 pF 축전용량에서는 2021.3 Ω 에서 523.3 Ω 로 감소하는 동안 이러한 경향이 성립하다가 242.5 Ω 에서 가공시간이 급상승하였다. 이는 242.5 Ω 에서는 충전부 저항이 너무 작아 방전 중에 개방전압의 차단이 충분히 이루어지지 못해서 ‘연속 아크 방전 (continuous arc discharge)’ 이 발생했기 때문이다. 연속 아크 방전은 충전시간이 지나치게 빠르거나 방전폭발압력이 충분치 않는 등의 이유로 극간에 다량의 이온이 존재하게 되면 단발 방전이 소멸되지 못하고 극성 반전 없이 장기간 지속되는 방전현상으로서 가공성을 크게 저해하는 요인이 된다. Fig. 2 에 1000 pF 에서 충전부 저항에 따른 방전전류 파형의 변화를 보이고 있다. 2021.3, 1032.3, 523.3 Ω 에서는 모두 펄스성 ‘정상 스파크 방전 (normal spark discharge)’ 이지만, 242.5 Ω 에서는 방전이 펄스폭 이후 종료되지 못하고 극성반전 없이 지속되는 연속 아크 방전을 생성함을 볼 수 있다.

100 pF 을 사용하는 경우에는 2021.3, 1032.3 Ω 에서 정상 스파크 방전을 보이고 523.3 Ω 에서 연속 아크 방전이 간간히 발생되다가 242.5 Ω 에서는 거의 연속 아크 방전만이 발생하였다. 따라서 523.3, 242.5 Ω 에서 전극마모 및 가공시간이 증가하는 것은 연속 아크 방전으로 인한 가공성 저하 또는 가공불가로 설명된다. 그러나 1032.3 Ω 에서는 정상 스파크 방전을 보임에도 불구하고 2021.3 Ω 에 비해 가공시간이 증가하였다. 이는 100 pF 의 방전주기가 대략 1 μs 이하로 1000 pF 에 비해 매우 짧기 때문이다. 즉 방전주기가 너무 짧아 비록

연속 아크방전이 발생하지는 않지만 충분한 절연을 통해 방전점의 분산이 이루어지지 못하고 국부적인 지점에서 개방전압 이하의 전압 특히 최저 아크전압 수준 근방에서 펄스성 방전을 지속하는 ‘정상 아크 방전 (normal arc discharge)’ 을 발생시킨다. 정상 아크방전이 발생하면, 방전면적 전 범위로 방전점의 분산이 원활히 이루어지지 않으므로 가공속도가 저하되고, 전극마모도 정상 스파크 방전에 비해 심해지게 된다.

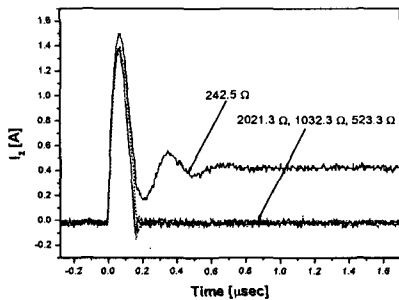


Fig. 2 Sampled discharge currents w.r.t. charge resistance (1000 pF)

3. 트랜지스터 부착 RC 방전회로의 마이크로 방전가공 특성

3.1 트랜지스터 부착 RC 방전회로 구성

앞선 실험에서 일반 RC 방전회로에서 충전부 저항을 줄여서 고속가공을 할 경우 연속 아크 방전 또는 정상 아크 방전이 발생하여 가공성이 저하됨을 알 수 있었다. 이는 전술한대로 방전시 개방전압이 충분히 차단되지 못기에 발생하는 현상으로, 만약 방전이 지속되는 동안 개방전압이 강제 차단될 수만 있다면 연속 아크 방전은 ‘잘려지고’ 높은 방전주파수를 가지면서 정상 스파크 방전을 발생시킬 수 있을 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 RC 방전회로의 충전부에 트랜지스터를 삽입한 트랜지스터 부착 RC 방전회로 (RC circuit with transistor) 를 제작하여 마이크로 방전가공에 적용하였다.

트랜지스터 부착 RC 방전회로는 크게 기본 RC 방전회로와 트랜지스터 작동을 위한 구동회로, 펄스의 충격계수 및 스위칭 주파수를 제어하기 위한 회로, 트랜지스터 입력회로로 나눌 수 있다.

구동회로는 고속 PWM controller (UC3825) 를 사용하여 구현 하였다. 구동회로는 수 Mhz 이상의 높은 주파수로 구동해야 하기 때문에 이중 게이팅 출력 (dual gating output) 을 가진 컨트롤러를 사용하여 2 개의 트랜지스터 즉 MOSFET 을 교번 하여 구동하였다. 펄스의 충격계수 및 스위칭 주파수는

PWM controller 입력부에 위치한 두개의 가변저항을 통해 제어가 가능하게 하였다. Fig. 3 에 트랜지스터 부착 RC 방전회로의 개요도를 나타내었다.

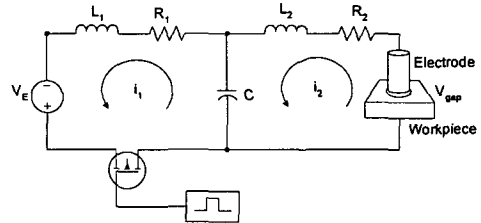


Fig. 3 Schematic diagram of RC circuit with transistor

3.2 최적의 충격계수 및 스위칭주기 설정

트랜지스터 부착 RC 방전회로로 연속 아크 방전을 차단하려면 최적의 트랜지스터 스위칭 주기와 충격계수를 먼저 설정해 주어야 한다. 트랜지스터의 충격계수를 바꾸어가며 실험해 보았다. 100 V, 500 pF 에 충전부 인덕턴스는 케이블 인덕턴스로 설정하고 연속 아크방전이 발생하도록 충전부 저항을 242.5 Ω 으로 설정하였다. 트랜지스터의 스위칭 주기는 800 nsec 로 고정하고, 충격계수를 25.0, 37.5, 50.0, 62.5, 75.0, 87.5 % 로 바꾸어 가며 전극마모와 가공시간을 측정하였다. 가공결과를 Fig. 4 에 나타내었다.

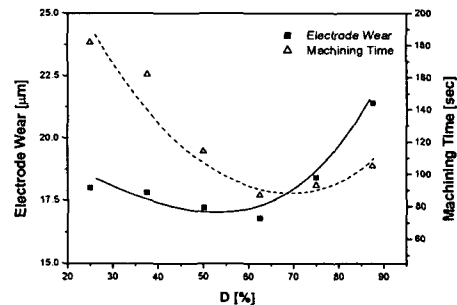
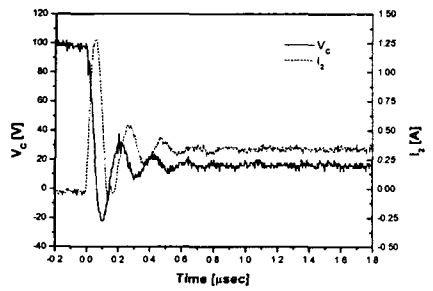
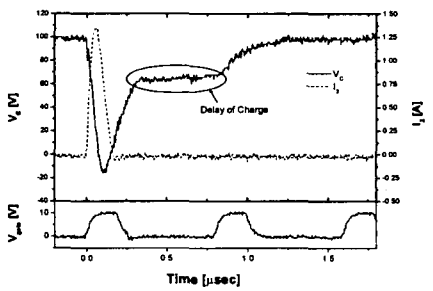


Fig. 4 Electrode wear and machining time w.r.t. duty factor (RC circuit with TR, 500 pF, 100 V, 242.5 Ω , T = 800 nsec)

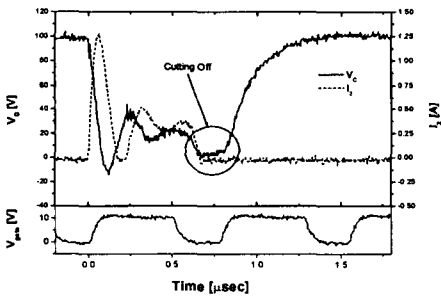
그림을 보면 충격계수가 60 % 부근에서 전극마모 및 가공시간이 최소가 된다. 전극마모는 충격계수가 커질수록 급속도로 증가하고, 가공시간은 충격계수가 작을수록 급속도로 증가함을 알 수 있다. Fig. 5 에 트랜지스터 없는 RC 방전회로에서 발생한 연속 아크방전과 트랜지스터 부착 RC 방전회로에서 충격계수가 27.5, 62.5, 87.5 % 인 경우의 축전용량 양단전압과 방전전류 및 MOSFET 구동펄스 전압을 보였다.



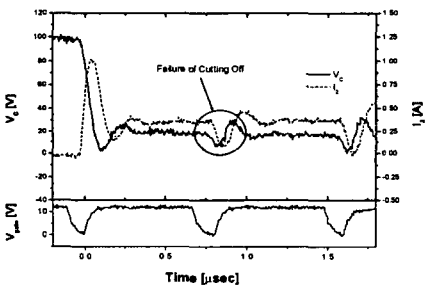
(a) Continuous arc discharge (RC)



(b) Very low duty factor (RC with TR)



(c) Optimal duty factor (RC with TR)



(d) Very high duty factor (RC with TR)

Fig. 5 Examples of RC circuit discharge and RC circuit with TR discharge

그림에서 충격계수가 27.5 % 로 짧은 경우에는 연속 아크방전이 확실치 차단 되었지만, 개방전압

의 온 시간이 매우 짧음에 따라 충전시간에서 지연이 일어났음을 알 수 있다. 충격계수가 87.5 % 로 길 경우에는 연속 아크방전 전류가 전원차단 효과에도 불구하고 차단되지 못하고 여러 주기에 걸쳐 지속됨을 보이고 있다 이것은 MOSFET 자체에 작동지연이 있으며, 비록 MOSFET 에서 완전한 스위칭이 이루어졌다 하더라도 오프 시간이 매우 짧으므로 극간에는 아직도 다량의 이온 등이 풍부하여 절연이 회복되질 않았기 때문이다. 충격계수가 62.5 % 일 경우에는 연속 아크방전이 전원 차단에 의해 명백히 차단되고, 충전시간이 지연 없이 한번의 온 시간에 이루어짐을 보인다. 따라서 충격계수가 최적값 보다 작을 경우에는 연속 아크방전이 확실히 차단되지만 너무 짧은 온 시간으로 가공시간이 지연되고, 클 경우에는 한번의 온 시간으로 충전이 이루어지지만 연속 아크방전의 차단효과가 떨어지므로 가공시간이 상승하게 된다.

실험결과에 따라 최적의 충격계수는 다음과 같이 정할 수 있다. 즉 트랜지스터의 온 시간은 RC 방전회로의 충전시간 보다 같거나 큰 정도로 설정하여 한번의 온 시간에 충전될 수 있도록 하며, 오프 시간은 방전 전류펄스폭 보다 100 ~ 200 nsec 정도 약간 길게 하여 전원차단 시간 동안 극간에 확실한 절연이 보장이 될 수 있도록 한다. 결국 충격계수를 최적으로 설정하는 작업에서 최적의 스위칭주기까지 설정되었다. 위에서 설정한 온 시간과 오프 시간을 합한 시간이 최적의 스위칭 주기가 되는 것이다.

3.3 충전부 저항에 따른 두 방전회로의 가공성 비교

최적의 충격계수와 스위칭 주기를 바탕으로 2.2 결과 동일한 조건의 실험을 하여 RC 방전회로와의 가공성을 비교하였다. 전기적 조건은 2.2 결과 동일하게 설정하였다. Fig. 6 에 실험결과를 각 축전용량에 따라 정리하여 나타내었다.

실험결과 100 pF 에서는 일반 RC 방전회로의 경향과 달리 일반적인 충전부 저항의 감소에 따른 효과인 충전부 저항이 감소할수록 가공시간이 감소한다. 이는 정상 아크 방전이 차단되었기 때문이다. 그러나 242.5 Ω 에서는 가공속도가 다시 감소하였는데, 이는 스위칭 주기 및 펄스폭이 트랜지스터의 작동성능을 넘어서서 지나치게 작게 설정되었기 때문이다. 전극마모는 트랜지스터 방전회로를 쓰더라도 충전부 저항이 감소함에 따라 다소 증가하지만, 그 증가폭이 일반 RC 방전회로에 비해 낮고 충전부 저항 전 범위에 대해 전극마모가 작다.

1000 pF 축전용량인 경우, 523.3 ~ 2021.3 Ω 에서는 일반 RC 방전가공도 충전부 저항의 감소에

따라 가공시간이 감소하는 구간이므로 굳이 트랜지스터를 병행한다 하더라도 가공시간 감소효과가 적다. 그러나 연속 아크 방전 발생빈도가 높은 242.5 Ω에서는 가공시간 감소효과가 59.9%로서 뚜렷하다. 전극마모도 523.3 ~ 2021.3 Ω 구간에서는 같거나 조금 작은 수준이지만, 242.5 Ω에서는 25.5%로서 뚜렷하다.

트랜지스터 부착 RC 방전회로와 일반 RC 방전회로의 가공성을 전 충전부 저항에 대해 비교한 결과 전극마모 감소효과는 1000 pF가 8.7%로서 크고, 가공시간 단축효과는 100 pF가 47.7%로서 크게 나오는 데 100 pF에서는 가공이 전혀 안되었던 RC 방전회로에서의 242.5 Ω의 결과를 제외하고 계산한 것이므로 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 축전용량이 작은 경우에서, 전극마모 및 가공시간 단축효과가 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

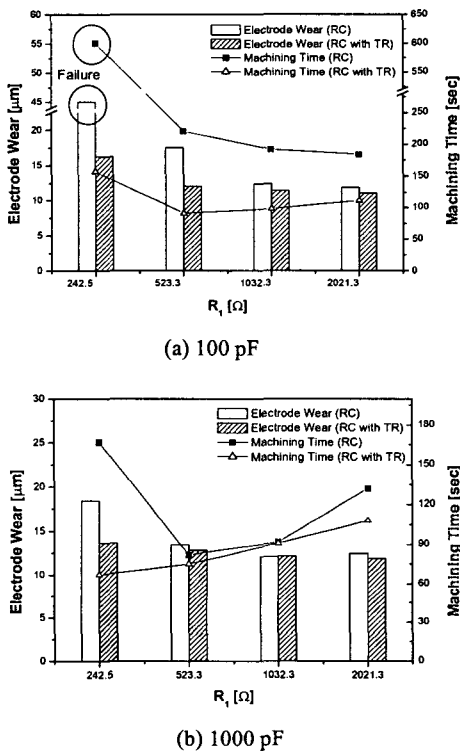


Fig. 6 Electrode wear and machining time w.r.t. charge resistance (RC vs. RC with TR)

3.4 이송속도를 고려한 두 방전회로의 최대 가공속도 비교

트랜지스터 부착 RC 방전회로의 고속 방전가공성을 최적의 상태로 비교하기 위해 트랜지스터 부착 RC 방전회로와 일반 RC 방전회로를 이송속도에 따라 가공성을 실험하였다. 앞선 실험에서 100

pF의 경우에 일반 RC 방전회로는 2021.3 Ω, 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 523.3 Ω에서 각각 최대의 가공속도를 보이므로, 이 조건들에 전극 이송속도를 바꾸어 가며 실험하였다. 100 pF에서는 전극 이송속도를 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 μm/sec로 바꾸어 가며 실험했다. 1000 pF의 경우에는 일반 RC 방전회로가 523.3 Ω에서, 트랜지스터 부착 RC 방전회로가 242.5 Ω에서 최고의 가공속도를 보이므로 역시 각각 이 조건들에서 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 μm/sec인 전극 이송속도로 실험하였다. 실험결과를 Fig. 7에 정리하였다.

100 pF의 경우 일반 RC 방전회로는 1.25 μm/sec에서 최고의 가공속도를 보이고, 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 이보다 빠른 1.5 μm/sec에서 최고의 가공속도를 보이다가 다시 감소한다. 두 회로에서 각각 최고의 가공속도를 비교해보면 트랜지스터 부착 RC 방전회로가 51.4%의 가공시간 단축효과를 보이며, 전극마모는 2.5% 증가하였다.

1000 pF의 경우에 트랜지스터 부착 RC 방전회로와 일반 RC 방전회로는 각각 3.0, 2.5 μm/sec에서 최고의 가공속도를 보인다. 가공시간 단축효과는 43.9%이며, 전극마모는 2.9% 증가하였다.

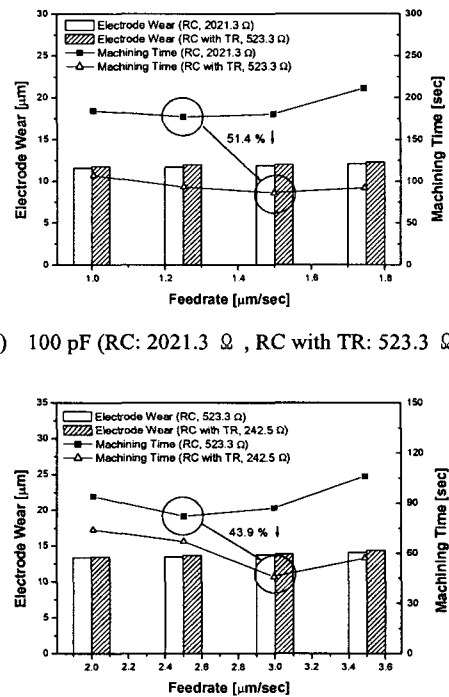


Fig. 8 Electrode wear and machining time w.r.t. feedrate (RC vs. RC with TR)

축전용량이 큰 경우나 작은 경우 모두 전극마모 상승량은 비슷하고, 가공시간은 축전용량이 작은 경우에서 큰 폭의 감소효과를 보인다. 트랜지스터 부착 RC 방전회로를 통해 축전용량이 작은 경우에 큰 전극마모의 증가 없이 가공시간을 절반 가량 줄일 수 있다는 점은 매우 주목할 만 하다. 충전부 저항을 고속 마이크로 방전가공을 위한 제어변수로 잡은 것은 단발 방전에너지의 변화 없이 방전전력을 상승시키므로, 주어진 가공물의 가공품질 손상 없이 고속 가공이 가능하기 때문이다. 따라서 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 축전용량이 작은 경우 즉 정상가공 조건에서 가공시간 감소효과가 높음에 따라 고품질 고속 마이크로 방전가공을 가능케 한다.

4. 결 론

지금까지 마이크로 방전가공에서는 좁은 펄스폭의 방전전류 생성이 용이한 RC 방전회로가 널리 사용되어 왔다. 그러나 가공품질을 유지한 상태에서 즉 단발 방전에너지를 유지한 상태에서 고속가공을 위해서는 충전부 저항을 줄여서 방전주파수를 높여주어야 하는데, RC 방전회로에서는 방전시에 개방전압을 충전부 저항만으로 차단하고 있어 충전부 저항값을 지나치게 줄이면 연속 아크 방전 또는 정상 아크 방전이 발생하여 가공성이 현저히 나빠진다. 본 논문에서는 고속의 트랜지스터를 충전부에 위치시킨 트랜지스터 부착 RC 방전회로를 제작하여 마이크로 방전가공 실험을 하였다. 트랜지스터의 온시간을 축전용량 충전시간으로, 오프시간을 펄스폭으로 설정한 충격계수에서 최적의 가공상태를 보였다. 동일한 전기적 조건에서 RC 방전회로와 트랜지스터 부착 RC 방전회로의 가공성을 비교한 결과 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 연속 아크 방전과 정상 아크 방전을 효율적으로 차단하여 가공시간을 50 % 정도 감소시켰으며, 특히 이 효과는 축전용량이 작은 경우에 더 뛰어났다. 각 회로가 가지는 최대 가공 속도 비교에서도 트랜지스터 부착 RC 방전회로가 50 % 정도 가공시간 감소효과를 보임으로써, 트랜지스터 부착 RC 방전회로는 고품질 고속 마이크로 방전가공을 가능하게 하였다.

참고문헌

1. Masaki, T., Kawata, K., and Masuzawa, T., "Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, 1990
2. Yu, Z., Masuzawa, T., and Fujino, M., "3D Micro-

EDM with Simple Shape Electrode - Part 1 : Machining of Cavities with Sharp Corners and Electrode Wear Compensation," Int. J. of Electrical Machining, No. 3, pp. 7-12, 1998

3. Takahata, K., and Gianchandam, Y., "Batch Mode Micro-EDM for High-Density and High-Throughput Micromachining," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical System Workshop, 2000
4. 마이크로 가공기술 편집위원회, "마이크로 가공 기술," 기전연구사, 1993
5. 三菱電氣(株), "放電加工のしくみと100%活用法," 技術評論社