

진동기구를 이용한 미세구멍 방전가공의 효율향상

손성민^{1*}

¹울산과학기술대학 기계학부

Improvement of Micro-hole EDM Efficiency using Vibration Flushing

Seong-Min Son^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Ulsan College

요 약 마이크로 방전가공은 활용도가 높은 미세가공기술이지만 가공깊이가 증가하면 방전가공 시에 발생하는 가공 부산물인 데브리(debris)로 인해 공구 전극과 공작물이 단락되어 방전의 진행이 힘들고 극심한 전극마모가 발생한다. 이를 극복하기 위하여 공구 전극이나 공작물에 진동을 추가하는 진동 플러싱 기술이 개발되었으나 기존의 진동 플러싱 연구는 피에조 액츄에이터를 적용하여 높은 진동수를 발생시키는 것에만 집중하였다. 본 연구에서는 경제적이면서도 유사한 효과를 얻을 수 있는 솔레노이드를 이용한 진동 플러싱을 제안한다. 솔레노이드를 이용한 진동 플러싱은 피에조 액츄에이터를 이용하는 것에 비해 큰 진폭을 얻을 수 있으며 진동수에 대해 독립적으로 설정하는 것이 용이하다. 가공 실험을 통해 솔레노이드를 이용하여 낮은 진동 주파수에서 큰 진폭으로 진동 플러싱하는 방법이 고주파 진동 플러싱과 비교하여 경제적이며 충분한 적용효과를 발휘할 수 있음을 확인하였다.

Abstract Micro EDM(Electric Discharge Machining) is one of the most powerful technologies which are capable of fabricating micro-structure without any problems from high cutting force. However, there is a significant defect in the part machining with deep holes or pockets, because debris which are generated by electric discharging may frequently cause a short circuit between an electrode and workpiece material. Vibration flushing can reduce the undesirable phenomena with dynamic flow of EDM fluid in a deep and choked area. In this study, Vibration flushing with solenoid is suggested and the results show that the method can generate a remarkable EDM efficiency with high amplitude at a low frequency in comparison with current vibration flushing methods with high frequency using piezo actuators.

Key Words : Micro EDM, Vibration flushing, Material removal rate

1. 서론

마이크로 방전가공은 미세가공기술 중의 하나로 중요도와 활용도가 매우 높다. 방전가공은 공구(전극)와 공작물이 접촉하지 않는 비접촉 가공으로 매우 작은 가공력으로 원하는 형상을 생성할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다[1,2]. 전기적 방전을 이용하는 가공법은 기계가공이 어려운 소재나 높은 가공력으로 인한 공작물의 물리적 변형 등에 상관없이 미세형상을 생성할 수 있다는 장점으로 최근의 산업 제품이 소형화됨에 따라 요구되는 미

세부품 제작에 다양하게 활용되고 있다. 특히, 전자부품, 광학기기, 의료기기 등 세장비(aspect ratio)가 큰 미세 구멍가공에 활용이 다양하다. 그러나 세장비가 큰 관통 구멍(Through hole)이나 블라인드 구멍(Blind hole)의 미세 방전가공 중 가공 부산물인 데브리(Debris)이 전극과 공작물 사이에 개재되고 플러싱(Flushing)이 적절하게 이루어지지 않으면 방전이 제대로 수행되지 않게 된다. 이로 인하여 방전가공의 재료제거율(Material removal rate)이 낮아지고 늘어나는 가공시간으로 인해 전극의 마모 또한 극심해져 구멍의 형상 정밀도가 떨어지게 된다. 이러한

*교신저자 : 손성민(semson@uc.ac.kr)

접수일 10년 11월 19일

수정일 11년 02월 07일

게재확정일 11년 02월 10일

문제를 해결하기 위하여 방전가공에 초음파 진동을 적용하는 방법이 제안되었다 [3]. 서동우 등은 텅스텐 카바이드 전극에 의한 스테인레스 강의 미세구멍 방전가공에서 절연액, 축전용량에 따른 가공특성 조사와 더불어 40kHz 초음파 부가에 의한 영향을 보고 하였으나 연구는 공구의 마모상태에 주로 집중되었고 전극에 초음파 진동을 부가할 경우 가공효율(재료 제거율)이 향상됨을 간단히 보고하였다 [4]. Takashi 등은 미세축(Mandrel) 가공에서 데브리(Debris)의 점착으로부터 가공의 지속성을 보장하기 위하여 전극 공구에 PZT로 100 Hz ~ 1 kHz의 진동을 부가하여 플러싱을 유도하는 연구로 일반적인 미세방전가공에 비해 진동을 이용할 경우 약 50 %정도의 가공효율 향상과 방전의 안정성 증대효과가 있음을 확인하였다 [5]. Hao 등도 미세방전가공에 피에조 액추에이터를 이용하여 주파수 6 kHz, 진폭 3 μm의 진동을 공작물에 부가할 수 있는 장치를 제작하고 실험적 연구를 통해 방전가공시 전극과 공작물 사이의 진동이 최적 방전 주파수 증가를 유도하여 가공효율 및 가공의 안정성 향상에 도움이 됨을 밝혔다 [6].

미세방전가공에 진동을 부가하는 다양한 연구를 통해 방전가공의 재료제거율 향상과 방전의 안정성 확보 등에 주파수와 진폭 등의 물리적인 변화가 도움이 됨을 확인하였으나 방전의 안정성과 플러싱의 효과를 단순하게 연결하거나 단지 가공시간의 단축 등을 확인하는 연구가 많다. 또한, 진동을 부가하기 위해 사용된 액추에이터는 음파 및 초음파의 주파수를 막론하고 거의 모든 연구에서 피에조 액추에이터를 적용하였다. 피에조 액추에이터를 이용하여 진동을 발생시킬 경우 발진기, 증폭기를 비롯하여 필요에 따라 진폭확대기구(Horn-type Transducer) 등이 사용되어 상용에 적용할 경우 비용의 증대가 예상된다. 또한, 고주파에서는 큰 진폭을 얻기 위하여 진동이 고유진동수 영역에 제한되도록 하기 때문에 진폭과 주파수를 분리하여 임의 값으로 설정하기 힘든 점도 있다.

본 연구에서는 피에조 액추에이터를 이용하여 고주파 진동을 미세방전가공에 적용하는 기존의 연구들과 달리 비용면에서 절대적으로 유리하고, 진동수 및 진폭을 각각 분리하여 설정하는 것이 상대적으로 쉬운 솔레노이드(Solenoid)를 이용한 전자석(Electromagnet)으로 공작물에 진동을 부가하는 방법을 제안한다. 전자석에 의한 진동부가기구는 상대적으로 간단하고 고주파를 달성하기는 힘들지만 진폭이 큰 장점을 갖고 있다. 실험의 분석은 진동이 플러싱에 미치는 영향에 집중하고 이를 통해 기존의 소진폭, 고주파 진동에 의한 결과들과 비교하여 그 성능을 검증하고자 한다.



[그림 1] 미세구멍 방전가공의 응용

2. 미세방전가공 효율과 플러싱

2.1 미세방전가공의 재료 제거율

방전가공에서 가공효율은 재료의 제거율로 표시될 수 있다. 방전 에너지는 전극 공구와 공작물 사이에 부가되는 전류와 전압에 의해 결정된다. 미세방전 가공에서는 펄스형태의 전류를 부가하기 때문에 방전 에너지(E_p)는 다음 식 (1)과 같이 표시될 수 있다.

$$E_p = V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (1)$$

V_p : 펄스의 전압, I_p : 펄스의 전류,
 t_{on} : 펄스 on 시간, t_{off} : 펄스 off 시간

식 (1)로부터 가공재료의 특성에 따른 제거 상수 a 를 곱하여 식 (2)와 같이 재료 제거율로 표시할 수 있다.

$$MRR = \alpha V_p I_p t_{on} \frac{1}{t_{on} + t_{off}} \quad (2)$$

식 (2)로부터 전압, 전류, 그리고 펄스의 유지시간에 비례하여 재료 제거율이 증가할 것을 예상할 수 있다. 그러나 펄스가 유지되는 시간은 독립변수가 아니기 때문에 충분한 펄스 정지시간을 고려하면 일정 값 이상으로 증가시키는 것이 불가능하다. 한편, 펄스 ON/OFF 시간의 비가 같은 경우 재료 제거율은 동일하지만 단일펄스 (Single pulse)당 제거량이 적은 고주파의 펄스가 보다 정밀한 가공에 유리하다는 것을 추측할 수 있다.

한편, 높은 재료 제거율을 획득하기 위하여 적절한 가공조건을 설정하였다 하더라도 플러싱이 제대로 이루어지지 않으면 데브리에 의해 공구와 공작물이 접촉(Short circuit)이 자주 발생하게 되어 t_{on} 시간이 줄어들어 가공효율을 떨어뜨리게 된다.

2.2 진동에 의한 플러싱 효과

미세구멍의 방전가공에서 공구와 공작물 사이의 간격이 좁아 방전액의 유동이 원활하지 못하기 때문에 데브리의 제거가 적절하게 이루어지지 못하여 가공효율을 떨어뜨리게 된다. 이를 극복하기 위하여 전극 공구나 공작물에 진동을 부가할 경우 유체(방전액)입자의 속도에 따른 압력과 진동자의 주기적인 운동에 의해 발생하는 캐비테이션(Cavitation)이 플러싱에 영향을 미칠 것을 예상할 수 있다. 유체 내에서 진동자에 의해 발생된 파(유연성 물질의 규칙적인 분자운동)의 압력을 P_f 라고 할 경우 순간 강도는 유체의 속도 v 에 대해 다음과 같은 관계가 있다 [7].

$$P_f = \rho cv \quad (3)$$

ρ : 유체 밀도, c : 음파의 전달속도

여기서 유체에 따라 다른 인자인 ρ 는 매질의 임피던스로 여겨져 속도 v 는 전류와 유사한 음향개념이며 압력 P_f 는 전압과 유사한 의미를 가진다. 전달된 파는 기계적 에너지를 동반하는데 이는 입자의 운동 같은 운동에너지와 유연성 매질에 가해지는 압력 같은 위치에너지의 형태를 보이므로 매 시간당 입의 양의 에너지가 전달방향으로 전파되는데 이 때 단위면적당 통과하는 에너지를 파의 강도라 한다. 파의 강도(I)는 파의 압력에 관한 식 (3)과 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$I = \frac{P_f^2}{\rho c} = \rho cv^2 \quad (4)$$

한편, 진동자 끝단에서 발생하는 유체의 속도는 식 (5)

와 같다.

$$v = 2\pi fd \quad (5)$$

d : 진폭

따라서 식 (4), (5)로부터 방전가공의 플러싱에 진동을 이용할 경우 속도 v 를 결정하는 진동 주파수와 진폭은 파의 강도에 제곱으로 비례함을 알 수 있다.

한편, 캐비테이션은 액체가 빠른 속도로 운동함에 따라 압력이 증기압보다 낮아져 발생하는 것이므로 방전액 속의 진동자의 운동에 따른 압력변화로 설명될 수 있다. 액 중의 진동자가 위치한 점의 압력을 P_0 라 하고 진동자의 움직임에 따라 발생하는 압력을 P_v 라 하면 감압력이 작용하는 구간에서 압력차 ($P_v - P_0$)가 0 이하가 될 때 캐비테이션이 발생하고 0 이상이 되면서 소멸하게 된다. 캐비테이션 발생은 진동자의 주파수가 높을 수록 그 크기가 작아지고 액체의 점성이 클수록 발생하기가 어렵다. 초음파 세척기는 캐비테이션을 발생시켜 오물을 제거하는데, 방전가공에서는 전극공구나 공작물에 붙어있는 데브리를 떼어 내는 역할보다는 데브리의 운동을 보다 활발하게 하는 역할을 할 것으로 생각된다.

이러한 유체내의 음압이론을 고려할 때 유체입자의 속도에 따른 압력변화와 캐비테이션의 발생 모두 주파수가 높을수록 유리하나 진폭의 크기 또한 중요하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 상대적으로 높은 비용이 드는 피에조 액츄에이터를 이용한 소진폭, 고주파 플러싱 장치에 대해 낮은 비용의 대진폭, 저주파를 발생하여 방전액의 흐름을 강하게 하는 솔레노이드를 이용한 진동 플러싱도 큰 효과를 발휘할 것으로 예측할 수 있다.

2.3 미세방전가공에의 진동부가 효과 비교

미세방전가공에서 진동효과에 대한 각 연구에서 가공형상 및 조건이 서로 다르고 동일 실험에서도 재료제거율이 시간에 따라 계속 변화하기 때문에 절대적인 비교는 할 수 없으나 여러 형태의 방전가공에서 나타나는 진동 효과의 경향을 비교할 수는 있다. 피에조 액츄에이터를 이용하여 고주파의 진동을 방전가공에 이용한 연구들의 가공효율 향상을 표 1로 정리하였다. 부가되는 진동의 주파수는 100 Hz ~ 20 kHz 까지 다양하고, 이때의 진폭은 0.6 ~ 4.8 μm 까지 나타난다. 진동은 공구나 공작물에 부가되는데 이러한 조건하에서 재료 제거율의 향상정도는 최대 10 배까지 증가하고 일부 최적 조건에서는 18 배까지도 향상된다고 보고하고 있다. 진동 주파수와 진폭에 변화를 주어 실험한 경우, 전극 공구진동에 대해서는 주파

수를 10배 증가시키더라도 진폭이 1/3로 줄어들면서 재료 제거율에는 변화가 거의 없었다. 공작물에 진동을 부가하는 경우는 주파수를 1 kHz에서 20 kHz로 20배 증가시키더라도 진폭이 1/8로 줄어들면서 가공 효율 향상 정도는 2배에 그치는 것으로 나타났다.

진동을 부가하는 방법에 대해서는 방전액에 가하는 압력의 강도와 캐비테이션의 발생 정도를 고려할 때, 진동을 발생시키는 액츄에이터의 동력이 충분하다면 방전액에 압력을 가하는 면적이 넓은 공작물을 가진하는 쪽이 유리할 것으로 판단된다.

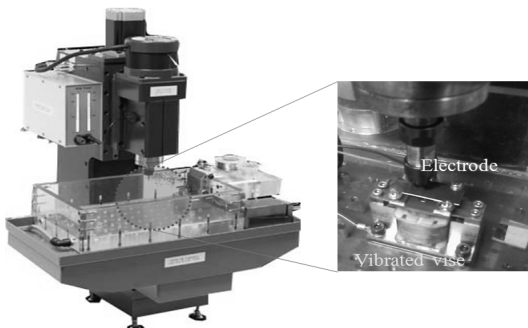
[표 1] 미세방전가공에의 진동부가 효과 비교

Parameter	Ref. [1]	Ref. [3]	Ref. [4]
Vibration	Wrkpcs	Tool	Wrkpcs
Frequency [kHz]	20	0.1~1	1~20
Amplitude [μm]	≤ 1	4.5~1.5	4.8~0.6
Fluid	Oil	-	Oil
MRR Imprv. [times]	3~5	3.5~4	1.2~10

3. 실험 결과

3.1 실험 장치

미세방전 가공에서 진동에 의한 플러싱 효과를 검증하기 위하여 플러싱이 매우 힘든 미세구멍가공에서 진동이 없는 기존의 방식과 주파수와 진폭에 변화를 주어 플러싱하는 방식을 실험하여 그 결과를 비교하였다. 가공실험에 사용된 방전가공기는 하이브리드 프리시즌사의 하이퍼-15(Hyper-15) 복합가공기를 사용하고 가공조건은 표 2와 같이 정리하였다. 텅스텐 공구 전극과 공작물인 1.5 mm 두께의 스테인레스 강을 정극성으로 연결하여 방전가공용 오일에서 가공하였으며, 진동 플러싱 실험에서는 진동 주파수 1 kHz, 10 kHz와 진폭 5 μm , 15 μm 를 부가하였다. 솔레노이드의 진동은 함수발생기의 신호를 파워트랜지스터로 증폭하여 구동하였다.



[그림 2] 마이크로 방전(복합)가공기 (Hyper-15)

[표 2] 미세방전가공 조건

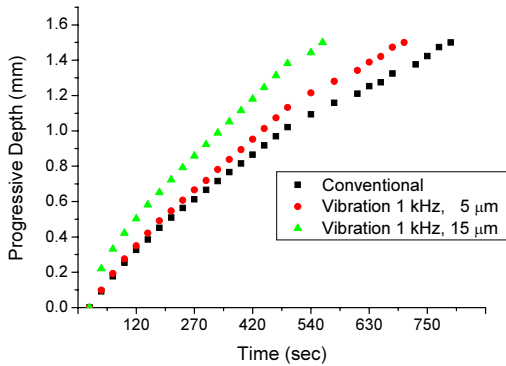
Parameter	Value
Polarity	Positive
Electrode Material	Tungsten
Electrode Diameter	0.5 mm
Workpiece Material	Stainless Steel (1.5 t)
Machining Fluid	EDM Oil
Vibration Frequency	0, 1 kHz, 10 kHz
Discharge Voltage	250 V
I _p On-time	100 ms
I _p Off-time	200 ms

3.2 가공효율 비교

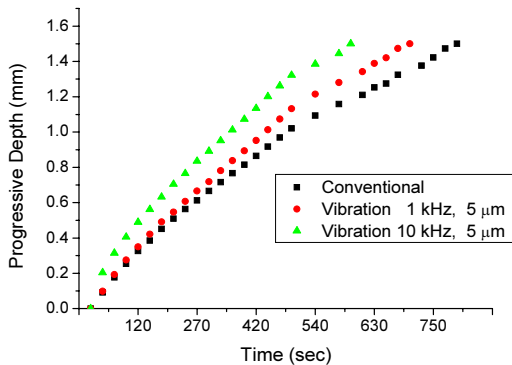
진동 플러싱의 효과를 검증하기 위하여 진동이 없는 기존 방법과 공작물에 진동을 부가한 방전가공의 가공효율을 비교하는 실험을 하였다. 본 연구에서는 진동수보다 진폭에 초점을 두고 있으므로 플러싱을 위한 공작물의 진동주파수는 1 kHz로 하고 진폭은 5 μm 와 15 μm 로 설정하였다. 그림 3은 진동 플러싱 실험에서 기존의 방전 미세구멍 가공과 진폭 변화에 따른 방전가공 효율을 비교한 것이다. 두께 1.5 mm의 스테인레스 강을 방전가공하는 동안 기존의 방전가공과 진동 플러싱을 이용하는 방전가공 모두 가공깊이가 증가함에 따라 방전의 진행속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 진동 플러싱의 경우는 기존의 방전가공법에 비해 가공속도의 감소가 작으며 진폭을 증가시켰을 때 그 효과는 더욱 증가하였다. 한편, 진폭을 동일하게 하고 주파수를 변화시켰을 때도 유사한 결과를 보였다. 그림 4는 진폭을 5 μm 로 유지하고 진동 주파수를 1 kHz에서 10 kHz로 증가시켰을 때의 방전가공 효율을 비교한 것이다. 진동 플러싱의 주파수 증가에서도 동일 주파수에서 진폭을 증가시킨 것과 유사한 결과를 보여 10 kHz로 공작물을 진동시킨 것이 가장 높은 가공 진행속도를 나타내었다. 그러나 1 kHz에서 진폭을 3배 증가시킨 것에 비해 가공효율이 현저하게 증가되는 모습을 보이지는 않아 단위 면적당 에너지 파의 강도 증가와 플러싱 효과가 선형적으로 비례하지는 않는 것으로 나타났다.

미세구멍 방전가공에 진동 플러싱을 부가하였을 때의 재료 제거율을 비교하여 그림 5로 정리하였다. 진동 플러싱의 경우도 가공깊이가 증가함에 따라 재료제거율이 급격하게 줄어들지만 진동이 없는 방전가공에 비해 재료제거율이 현저하게 큰 것을 확인할 수 있다. 진동 플러싱을 위해 공작물에 1 kHz, 5 μm 의 진동을 부가했을 경우 가공깊이에 따라 약 10 %의 재료제거율 향상을 보였으며 진폭을 3배 크게 하거나 주파수를 10배 증가시켰을 경우는

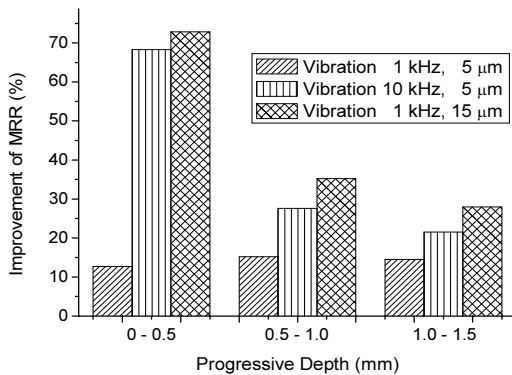
재료제거율의 향상이 작게는 20 %에서 크게는 70 % 이상 증대되었다. 한편, 진동조건 변화에 따른 진동 플러싱의 효과는 진폭을 증가시킨 경우가 진동수를 증가시킨 경우에 비해 재료제거를 증가에 더 큰 영향을 미쳐 가공 깊이가 1.0 mm 이상에서 진동수 변화에 비해 진폭변화를 준 결과가 약 1.5배 큰 재료제거율을 나타냈다.



[그림 3] 진폭 변화에 따른 방전가공효율 비교



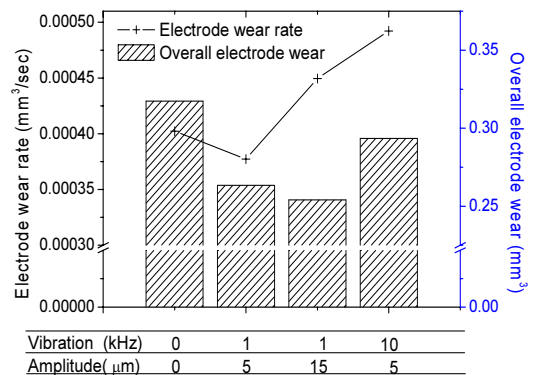
[그림 4] 주파수 변화에 따른 방전가공효율 비교



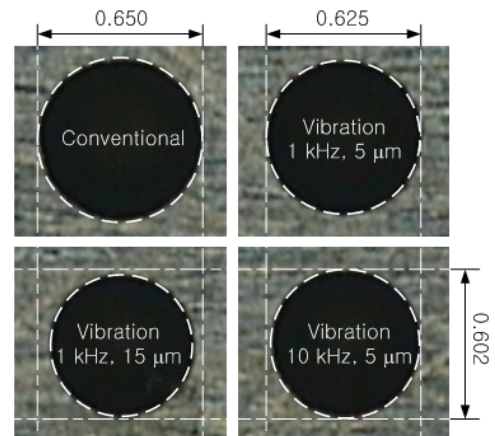
[그림 5] 진동 플러싱 방전가공의 재료제거율 비교

3.3 전극 마모와 가공 정밀도

미세구멍 방전가공 시의 플러싱에 진동을 부가하였을 경우 전극의 마모정도를 조사하여 그림 6으로 정리하였다. 진동 플러싱의 경우 동일한 방전가공량에 대해 재료제거율이 증가하여 전체적인 전극마모는 진동 플러싱을 하지 않을 경우보다 줄어 들었으나 단위시간당 전극마모는 오히려 증가하였다. 그러나 플러싱에 주파수 1 kHz, 진폭 5 μm의 진동을 부가하였을 경우는 단위시간당 전극마모도 진동을 부가하지 않을 경우보다 작게 나타나 방전가공 부품의 형상 정밀도를 높이고자 할 때는 이를 고려할 필요가 있다. 그림 7은 미세구멍 방전가공 실험을 통해 생성된 가공물의 정밀도를 비교한 것이다. 방전가공된 미세구멍은 진동 플러싱을 적용하였을 경우 진동이 없는 방전가공에 비해 정밀도가 증가하였다. 이는 진동 플러싱을 적용하였을 경우 전체적인 가공시간이 짧아져 나타난 결과로 진동 플러싱을 위해 공작물에 1 kHz, 15 μm를 부가했을 때 구멍직경은 약 570 μm로 측정되었다.



[그림 6] 진동 플러싱 유·무에 따른 전극 마모



[그림 7] 진동 플러싱 유·무에 따른 가공 정밀도

4. 결론

미세방전가공에서 가공깊이가 증가함에 따라 데브리의 영향으로 가공효율이 떨어지는 것에 대응하여 솔레노이드 진동자를 이용한 진동 플러싱 연구를 통해 다음과 같이 결론을 정리 하였다.

- 1) 피에조 액츄에이터를 이용하여 초음파의 진동을 발생시키는 기존의 연구와 달리 진동수 및 진폭을 각각 분리하여 설정하는 것이 상대적으로 용이하고 경제적 이점이 큰 솔레노이드를 진동 플러싱에 적용하였다.
- 2) 진동 플러싱은 방전가공깊이가 깊어질 경우 진동을 부가하지 않은 경우에 비해 재료제거율의 증가와 동일한 가공량에 대한 전극마모의 감소로 가공형상의 정밀도를 높일 수 있음을 확인하였다.
- 3) 진동 플러싱은 진폭을 증가시켰을 경우도 주파수를 증가시켰을 경우와 유사한 효과를 보였으며 그 향상정도가 더 크게 나타났다.

따라서 미세방전가공의 진동 플러싱에 고주파 진동의 부가는 가능하나 주파수와 진폭이 연동되어 변화하는 피에조 액츄에이터를 이용하는 방법이 아니더라도 저비용으로 솔레노이드를 이용한 진동 플러싱을 적용하는 것도 충분한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 김세환, 최계광, “와이어 컷 방전 가공한 펀치와 다이플레이트 제작에서의 수명연장에 관한 연구,” 한국산학기술학회논문지, v.7, no.4, pp.545-549, 8월, 2006.
- [2] 김세환, 최계광, “와이어 컷 방전가공후의 가공면 조도 관찰,” 한국산학기술학회논문지, v.3, no.2, pp.69-73, 6월, 2002.
- [3] C.S. Gao, Z.X. Liu, “A study of ultrasonically aided micro-electrical discharge machining by the application of workpiece vibration,” Journal of Materials Processing Technology, 139 (2003) 226-228.
- [4] 서동우, 박민수, 이상민, 주종남, “방전가공을 이용한 미세구멍 가공 시 절연액, 축전용량과 초음파 부가에 따른 가공특성”, 한국정밀공학회지, 제24권, 제12호, 42-49, 2007.
- [5] Takashi Endo, Takayuki Tsujimoto, Kimiyuki Mitsui, “Study of vibration-assisted micro-EDM - The effect of vibration on machining time and stability of

discharge”, Precision Engineering, Vol 32, 269-277, 2008.

- [6] Hao Tong, Yong Li, Yang Wang, “Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structure with non-circular cross-section”, Journal of Materials Processing Technology, Vol 208, 289-298, 2008.
- [7] Urick, Robert J., Principle of underwater sound, McGraw-Hill, 1983.

손 성 민(Seong-Min Son)

[정회원]



- 1999년 2월 : 부산대학교 지능기 계공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 부산대학교 지능기 계공학과 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2007년 2월 : NUS 전임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술 대학 디지털기계학부 조교수

<관심분야>
특수가공, 정밀가공, 생산공학