

건성 와이어방전가공 프로세스 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Characteristics of Dry Wire Electrical Discharge Machining (EDM) Process

이상원^{1,✉}, 김홍석²

Sang Won Lee^{1,✉} and Hong Seok Kim²

¹ 성균관대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.)

² 서울산업대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Seoul National Univ. of Technology)

✉ Corresponding author: sangwonl@skku.edu, Tel: 031-290-7467

Manuscript received: 2009.7.14 / Accepted: 2009.9.27

This study investigates the non-traditional manufacturing process of dry wire electrical discharge machining (EDM) in which liquid dielectric is replaced by a gaseous medium. Wire EDM experiments of thin workpieces were conducted both in wet and dry EDM conditions to examine the effects of spark cycle (T), spark on-time (T_{on}), thickness of workpieces, and work material on machining performance. The material removal rate (MRR) in the dry wire EDM case was much lower than that in the wet wire EDM case. In addition, the thickness of workpiece and work-material were found to be critical factors influencing the MRR for dry EDM process. The relative ratios of spark, arc and short circuit were also calculated and compared to examine the effectiveness of processes of dry and wet wire EDM.

Key Words: Dry Wire Electrical Discharge Machining (건성 와이어방전가공), Wet Wire Electrical Discharge Machining (습식 와이어방전가공), Machinability (가공성), Material Removal Rate (재료제거율), EDM States (방전상태)

1. 서론

최근 마이크로(micro) 및 메소급(meso) 정밀 형상 및 부품에 대한 수요가 전자, 광학, 우주산업, 군수 등의 분야를 중심으로 급격하게 늘어나고 있다. 이러한 정밀 형상 및 부품의 제조를 위해 3 차원 자유형상 가공이 가능하고 가공재료에 제한이 없는 마이크로 밀링, 마이크로 드릴링, 마이크로 레이저 가공, 마이크로 소성가공, 마이크로 방전가공 등의 기술이 많은 주목을 받고 있다. 이 중에서도 방전가공은 절연성 유체(dielectric fluid)에 잠긴 공구 전극과 전도성 소재 사이에 고전압을 부가하여 전기스파크를 연속적으로 발생시켜 소재로부터 미세한 양을 제거하는 가공 기술로 우수한

정밀도 및 복잡한 형상 가공성 등의 장점으로 인해 금속 소재의 마이크로 및 메소급 형상을 제조하는데 많이 활용되고 있다.

건성방전가공은 탈이온수나 기름 등을 절연성 매질로 사용하는 기존의 습식방전가공과는 달리 공기나 산소와 같은 기체를 절연성 매질로 사용한다. 건성방전가공의 경우, 습식방전가공과 비교하여 공구 전극 마모율 및 잔류응력이 작고 표면경화층이 얇으며, 방전간극(discharge gap)이 작기 때문에 보다 향상된 부품의 형상 정밀도를 얻을 수 있다.

이러한 건성방전가공 기술은 일본 Tokyo University of Agriculture & Technology 의 Kunieda 교수에 의해 처음으로 소개되었다.¹ Kunieda 는 고압

의 공기 및 산소를 절연성 매질로 사용하여 건성 형조 방전가공을 최초로 시도하였으며, 상기한 건성방전가공의 장점을 확인하였다. 또한, 전기 스파크가 발생할 때 공구 전극에 가해지는 반작용력이 건성방전가공에서는 무시할 만큼 미소하다는 것을 발견하였다.² Kunieda 는 최근의 연구에서 건성 와이어 방전가공 및 산소를 절연성 매질로 이용한 고속 3 차원 건성 형조 방전가공의 특성을 분석하였다.^{3,4} 즉, 건성 와이어 방전가공의 경우, 습식 와이어 방전가공에 비하여 더 정밀한 가공물의 진직도(straightness), 표면거칠기, 코너컷을 얻을 수 있다는 것을 보였고, 고속 3 차원 건성 형조 방전가공 실험에서는 산소를 절연성 매질로 사용하여 준폭발(quasi-explosion) 모드를 발생시켜 재료제거율을 급격히 증가시켰다. 이러한 준폭발 모드는 소재의 거친 가공(roughing)에 사용될 수 있으며, 낮은 재료제거율을 갖는 일반 모드는 소재의 미세형상 가공에 사용될 수 있다.

Kunieda 교수 연구팀 이외에 미국 University of Michigan 의 S. M. Wu Manufacturing Research Center (WuMRC)에서도 건성방전가공 기술에 관한 연구가 진행되고 있다. Kao 등은 대형 방전가공기에서 건성 및 분무를 이용한 유사 건성 와이어방전가공과 방전 드릴링 가공의 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다.⁵ 상기한 연구에서 방전펄스, 가공소재, 절연액체-기체 혼합물 등 다양한 방전가공 변수가 재료제거율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, Tao 등은 건성 및 유사 건성 방전 밀링 가공 프로세스에 대한 실험적 연구를 수행하였다.⁶ 상기한 연구에서 산소를 절연성 매질로 이용하여 재료제거율을 높임으로써 거친 가공에 적용되는 건성 방전가공 및 질소와 물을 혼합한 분무를 이용하여 미세 가공에 적용되는 유사 건성 방전가공 프로세스 특성에 관하여 연구하였다. 즉, 실험계획법을 적용하여 건성 방전가공 및 유사 건성 방전가공의 경우, 방전전류, 방전펄스 지속시간, 방전펄스 간격이 재료제거율과 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 건성 와이어방전가공에 대한 이해를 넓히고 그 프로세스 특성을 규명하기 위하여 습식 및 건성 와이어방전가공에 관한 실험적인 연구를 수행하였다. 기존의 대형 와이어방전가공기를 통해 가공소재에 따른 습식 및 건성 와이어방전 프로세스의 가공성에 대해 고찰하였으며, 방전사이클, 방전지속시간, 가공소재의 두께 및 가공소

재의 재료가 재료제거율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 방전상태 식별 알고리즘을 이용한 스파크, 아크 및 전기단락의 상대적 비율을 계산하여 습식 및 건성 와이어방전가공의 특성을 분석하였다.

2. 건성 와이어방전가공 실험 시스템 및 방법

건성 방전가공의 특성을 규명하고 가공변수의 영향을 분석하기 위하여 지름 0.254 mm 의 황동 와이어 전극을 장착한 일반 대형 와이어 방전가공기를 이용하여 와이어방전가공 실험연구를 수행하였다. 습식 및 건성 와이어방전가공 프로세스 특성의 비교, 분석을 위하여 (1) 액체 Flushing 습식 와이어방전, (2) 공기 Flushing 건성 와이어방전, (3) 공기 Flushing 이 없는 건성 와이어방전의 3 가지 가공조건을 적용하였다.

습식 와이어방전가공 실험은 가공소재가 탈이온수(deionized water)에 잠긴 상태에서 수행되었고, 고압의 Water Jet 을 방전간극 주변에 공급함으로써 가공파편을 제거하였다. 반면에, 건성 와이어방전가공 실험은 공기 Flushing 의 경우, 0.17MPa 압력의 Air Jet 을 방전간극에 공급하여 수행되었고, 공기 Flushing 이 없는 경우에는 대기상태에서 수행되었다. Fig. 1 은 대형 방전가공기에서 수행된 황동 박판의 건성 와이어방전가공 실험 사진을 보여주고 있다.

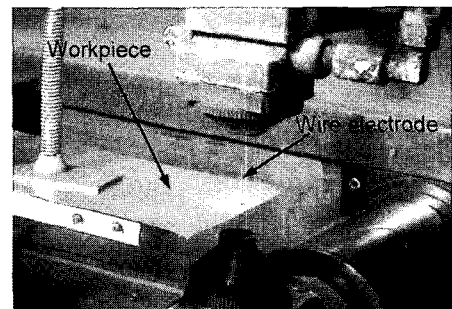


Fig. 1 Photo of dry wire EDM of brass shim

본 실험에서 황동(brass), 알루미늄(aluminum), 흑연 양극성 플레이트(graphite bipolar plate), 탄소폼(carbon foam) 등의 가공소재를 대상으로, 건성 방전와이어가공의 가공성 및 가공정밀도를 고찰하였고 방전사이클(discharge cycle), 방전지속시간(discharge on-time), 소재 재료 및 소재두께 등의 공

경변수들이 재료제거율(material removal rate, MRR)에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 건성 와이어방전가공 프로세스 특성

3.1 방전가공성

건성 와이어방전가공의 가공소재 별 가공성을 분석하기 위하여 탄소폼 및 흑연 양극성 평판을 대상으로 직선 슬롯(straight slot) 방전가공실험을 수행하였다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 건성 와이어방전가공의 경우, 보다 정교한 형상정밀도를 얻을 수 있었으며, 와이어 전극의 지름이 동일함에도 가공된 슬롯의 폭이 습식 와이어방전가공보다 작게 나타남을 관찰할 수 있었다.

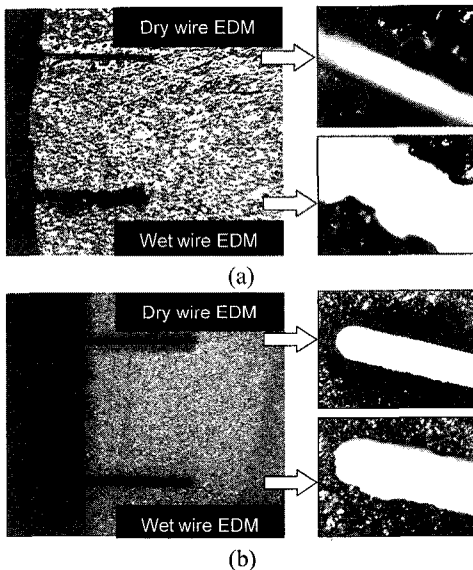


Fig. 2 Microscopic photos of wire EDMed slots in the cases of (a) Carbon foam and (b) Graphite bipolar plate

건성 와이어방전가공의 형상정밀도 향상은 방전에너지가 습식 와이어방전가공과 비교하여 상대적으로 낮아 재료제거율이 작아지는 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 또한, 슬롯 폭의 감소는 건성방전가공의 경우, 전극과 가공물 간의 방전간극이 습식 와이어방전가공에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다.

와이어방전 가공소재의 표면거칠기를 고찰하기 위해 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope,

SEM)을 이용하였다. Fig. 3 은 습식 및 건성 와이어방전 가공된 흑연 양극성 평판 표면의 SEM 사진을 보여주고 있다. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 건성 와이어방전가공의 경우, 가공된 표면의 방전 크레이터(crater)의 크기가 작고, 결과적으로 습식 와이어방전가공의 경우와 비교하여 표면거칠기가 우수함을 정성적으로 확인할 수 있다.

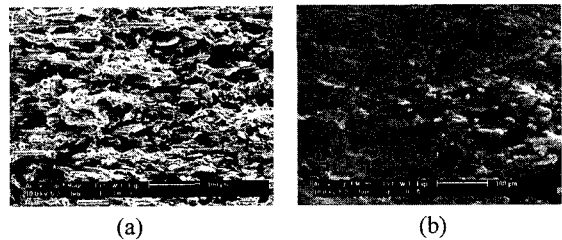


Fig. 3 SEM micrographs of EDMed surfaces of graphite bipolar plate for (a) wet and (b) dry wire EDM

3.2 방전가공 재료제거율

방전사이클 T 와 방전지속시간 T_{on} 이 재료제거율에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 다양한 T 및 T_{on} 값에 대한 재료제거율의 변화를 측정하였다. 가공물은 0.2mm 두께의 황동재료를 사용하였으며, T 및 T_{on} 의 범위는 Miller 등이 제안한 방법에 근거하여 실험적으로 결정하였다.⁷ Fig. 4 에 나타난 것처럼 재료제거율의 최대값은 습식 와이어방전가공의 경우 14mm³/min, 공기 Flushing 건성 와이어방전가공의 경우 3.8mm³/min 이며, 공기 Flushing 이 없는 건성 와이어방전가공의 경우에는 2.8mm³/min 이다.

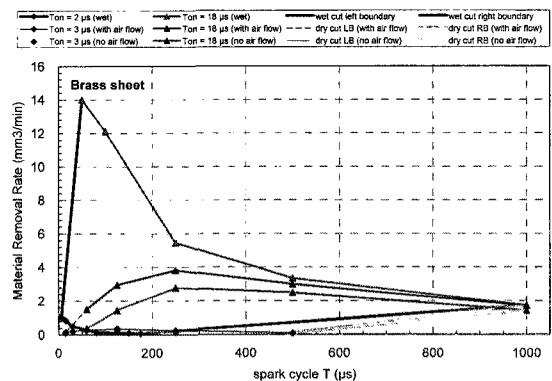


Fig. 4 MRR envelopes for wire EDM of brass with thickness of 0.2 mm in the cases of wet and dry EDM conditions

Fig. 4 에 나타난 것처럼 습식 와이어방전가공에서는 방전사이클 T 가 작아질수록 스파크 펄스의 발생빈도가 높아져 재료제거율이 향상되었다. 그러나, 건성 와이어방전가공의 경우에는 T 가 특정값(T_{on} 이 $18\mu s$ 일 때 $250\mu s$) 이하로 작아지면서 재료제거율이 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 건성 와이어방전가공의 경우, 가공소재와 전극 사이의 방전간극이 상대적으로 작기 때문에 방전사이클이 작을 경우, 가공파편이 효율적으로 제거되지 못하기 때문인 것으로 판단되었다. 공기 Flushing 건성 와이어방전가공의 경우, 보다 효율적인 가공파편의 제거를 위해 $0.17MPa$ 의 압축공기를 방전간극에 제공하게 되며, 이로 인해 동일한 방전사이클 및 방전지속시간 조건에서 공기 Flushing 이 없는 경우에 비하여 약 35%의 재료제거율 증가를 확인할 수 있다.

가공소재의 두께가 재료제거율에 미치는 영향도 분석하였으며 그 결과가 Fig. 5 에 주어져 있다. Al 6061T 재료에 대하여 방전사이클 T 를 $250\mu s$, 방전지속시간 T_{on} 을 $14\mu s$ 로 고정하고 공기 Flushing 이 없는 상태에서 건성 와이어방전가공을 수행하였다.

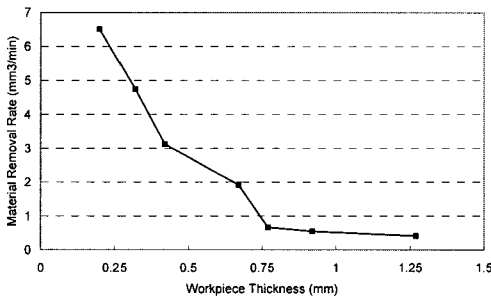


Fig. 5 Effect of thickness on MRR for the dry wire EDM of Al 6061T without air flow

Fig. 5 에서 알 수 있듯이 가공소재의 두께가 증가할수록 재료제거율이 지수적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 가공소재의 두께가 $0.75mm$ 이하의 경우에는 두께가 증가함에 따라 재료제거율이 급격히 감소하나, 두께가 $0.75mm$ 이상의 경우에는 재료제거율 감소율이 완만해진다.

가공소재의 재료가 재료제거율에 미치는 영향을 연구하기 위해서 알루미늄 Al6061T 와 황동에 대하여 습식 및 건성 와이어방전가공 실험을 수행하였다. 가공소재의 두께는 $1.27mm$ 였으며 방전사

이클과 방전지속시간은 각각 $250\mu s$ 및 $14\mu s$ 로 고정하였다. Fig. 6 에 주어진 것처럼 가공소재가 알루미늄 Al6061T 인 경우, 각각의 방전조건에서 황동의 경우보다 재료제거율이 더 큼을 알 수 있다.

가공소재 재료에 따른 재료제거율 변화는 가공소재 재료의 상이한 열특성에 기인한 것으로 판단된다. 예를 들어, 각 가공소재 재료의 열용량(heat capacity)은 알루미늄 Al 6061T 및 황동의 경우 각각 $2.42, 3.20 J/cm^3K$ 이며, 용융점(melting point)는 각각 $652, 955 ^\circ C$ 이다. 따라서, 알루미늄 Al 6061T 의 경우, 가공소재 용융에 필요한 에너지가 적게 되어 동일한 방전에너지를 적용하였을 때 황동의 경우와 비교하여 더 큰 재료제거율을 얻을 수 있다.

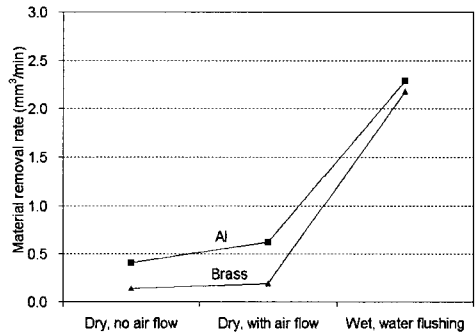


Fig. 6 Effect of work-materials on MRR for wet and dry wire EDM conditions

3.3 방전상태비율

방전가공의 상태는 개로(Open), 스파크(Spark), 아크(Arc), 전기단락(Short circuit)의 4 가지로 구분된다. 상기한 방전상태는 방전전압 및 전류 선도로부터 식별할 수 있다. 와이어방전가공 시 방전전압 및 전류의 측정을 위해 전압 Probe 및 전류 Probe 를 사용하였고, 측정 시스템 사진이 Fig. 7 에 주어져 있다. Fig. 8 은 Fig. 7 에 주어진 측정시스템으로 검출한 방전전압 및 전류 선도의 예를 보여주고 있으며, 식별된 방전상태를 보여주고 있다.

개로상태는 전압은 적용되고 있으나 방전간극이 커서 전류가 0 인 상태를 의미한다. 스파크는 Fig. 8 에서 알 수 있듯이 방전전압에 있어서 일정시간의 점화지연(ignition delay) 후에 전압이 강해지고 방전전류가 상승하는 상태를 의미한다. 아크의 경우에는 점화지연이 없고 피크전압이 스파크 상태의 전압보다 작으며 방전전류는 상승한다. 전기단락의 경우는 물리적으로 방전파편에 의해 방전

간극이 연결되는 상태를 의미하며, 미세한 전압의 상승과 상당한 전류의 상승이 관찰된다.

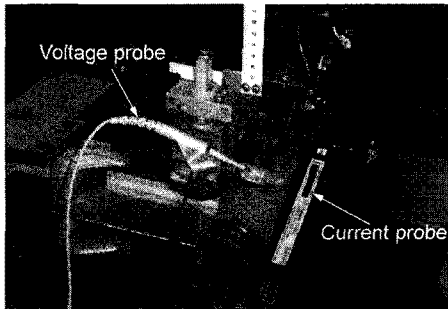


Fig. 7 Photo of measurement system of discharge voltage and current

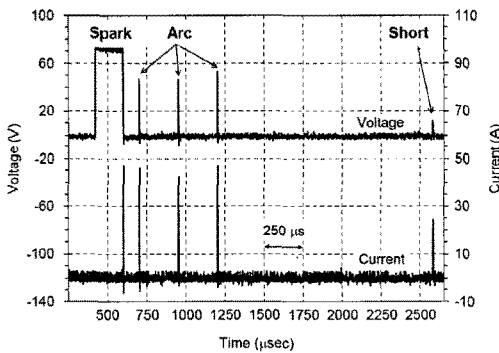


Fig. 8 Characterization of EDM states from discharge voltage and current profiles

점화지연은 절연성 유체의 절연 격리(dielectric isolation) 효과에 의해 발생하며 이 때 방전에너지가 축적된다. 축적된 방전에너지는 스파크 시 방전전압의 강하와 함께 방전간극에 발산되어 가공물의 일부를 제거하게 된다. 아크의 경우에는 방전간극에 방전파편 등의 불순물이 산재되어 있어서 절연 격리 효과가 작아 점화지연이 발생하지 않으며, 점화가 불순물 및 가공물에 집중되어 가공물의 과열 및 표면 손상을 초래하게 된다. 따라서, 이러한 아크 상태가 지속되지 않도록 방전간극의 Flushing 및 서보 시스템 운동제어를 수행하여 방전파편 등의 불순물을 제거한다.

측정된 방전전압 및 전류 선도로부터 방전상태를 식별하기 위해 Dauw 등의 알고리즘을 발전시킨 전압 및 전류의 역치값을 이용한 방전상태 식별 알고리즘을 이용하였다.⁸ 즉, 측정된 방전전압 및 전류를 분석하여 와이어방전가공 시 스파크,

아크 및 전기단락의 상대적인 비율을 계산할 수 있다. Fig. 9는 두께가 0.2mm 인 황동을 가공소재로 했을 때, 습식 및 건성 와이어방전가공 각각의 경우에 대하여 스파크, 아크 및 전기단락의 상대적인 비율을 보여주고 있다.

Fig. 9(a)는 습식, 공기 Flushing 및 공기 Flushing 이 없는 건성 방전가공의 경우에 대하여 와이어의 이송속도를 5mm/min 으로 고정하고 실험을 수행한 후 스파크, 아크 및 전기단락의 상대적인 비율을 계산한 것이다. 반면에 Fig. 9(b)는 각각의 방전조건에 대하여 황동 와이어의 이송속도를 최대로 하여 실험을 수행한 후 방전상태의 상대적인 비율을 계산한 결과이다. Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이 와이어 이송속도가 충분히 낮은 경우 (5mm/min), 습식 및 건성 와이어방전가공에 있어서 스파크의 비율은 약 90%이다. 전기단락은 습식 와이어방전가공에서는 발생하지 않고, 건성 와이어방전가공에서는 전체의 약 2%에 해당하는 발생 비율을 보인다. 이는 낮은 와이어 이송속도 조건에서 모든 방전가공 프로세스가 안정적임을 의미한다. 반면에 Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이 각 와이어방전조건에서의 최대 와이어 이송속도를 적용했을 때, 낮은 와이어 이송속도의 경우와 비교하여 스파크의 비율은 감소하고, 아크 및 전기단락의 비율은 증가하였다. 특히, 건성 와이어방전가공 실험에서 와이어 이송속도가 5mm/min 에서 공기 Flushing 이 있는 경우에 38mm/min, 공기 Flushing 이 없는 경우에 28mm/min 으로 증가할 때 스파크의 상대적인 비율은 88%에서 각각 58%와 56%로 급격하게 감소하였다. 이러한 스파크 비율의 급격한 감소로 인한 건성 와이어방전가공에서의 아크 및 전기단락 비율의 증가는 Fig. 4 에서 주어진 것처럼 재료제거율의 감소를 초래한다.

4. 결론

본 논문에서는 건성 및 습식 와이어방전가공에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 통해 건성 와이어방전가공의 프로세스 특성을 분석하였다. 탄소폼 및 흑연 양극성 플레이트에 대한 습식 및 건성 와이어방전가공 실험을 통해 건성 와이어방전 프로세스의 상기한 가공소재에 대한 가공성을 확인하였다. 또한, 건성 와이어방전가공을 통해 습식 와이어방전가공보다 더 우수한 표면거칠기 및 형상정밀도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

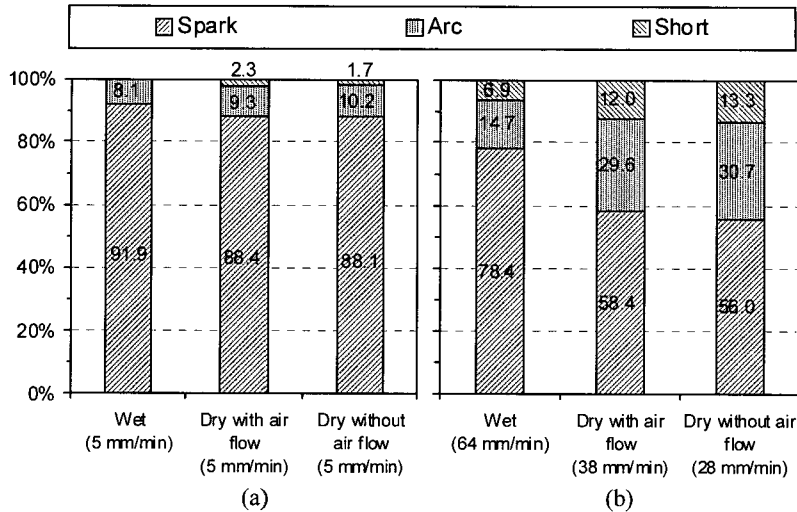


Fig. 9 Percentage of spark, arc, and short pulses in wet, dry with air flow, and dry without air flow EDM conditions: (a) 0.2 mm-thick brass with 5 mm/min feed rate, (b) 0.2 mm-thick brass with maximum feed rate

또한, 본 연구에서는 방전사이클(T), 방전지속 시간(T_{on}), 압축공기, 가공소재의 두께 및 가공소재 재료가 건성 와이어방전가공의 재료제거율에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 방전상태 모니터링 알고리즘을 이용하여 건성 및 습식 와이어방전가공에서의 스파크, 아크 및 전기단락 등의 방전상태를 식별하고 상대적인 비율을 계산하여 방전가공의 효율성을 분석하였다.

건성 와이어방전가공의 경우, 습식 와이어방전가공의 경우와는 달리 가공파편이 효율적으로 제거되지 못해 방전사이클이 특정값보다 작아질 때 재료제거율이 감소하는 경향을 보인다. 또한, 다양한 두께를 갖는 알루미늄 Al6061T 의 공기 Flushing 없는 건성 와이어방전가공 실험을 통해 가공소재 두께 증가에 대하여 재료제거율이 지속적으로 감소함을 확인하였다. 또한, 동일한 두께를 갖는 알루미늄과 황동 소재의 와이어방전가공 실험을 통해 가공소재 재료가 재료제거율에 미치는 영향을 고찰하였으며, 열용량 및 용융점이 낮은 알루미늄 소재를 가공할 때 더 큰 재료제거율을 얻을 수 있음을 확인하였다.

최종적으로 본 연구에서는 방전전압 및 전류를 이용한 방전상태 식별 알고리즘을 이용하여 0.2mm 두께의 황동 박판의 와이어방전가공 시 스파크, 아크 및 전기단락의 상대적인 비율을 계산하였고, 와이어 이송속도를 증가시켰을 때 건성 와이어방전가공 시 스파크의 상대적인 비율이 습

식 와이어방전가공에 비하여 급격하게 감소하여 결과적으로 재료제거율이 감소하게 됨을 고찰하였다. 이러한 고찰을 통해 와이어 이송속도가 방전가공 효율성에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

후 기

본 논문은 2006 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006- 331-D00038).

참고문헌

1. Kunieda, M. and Yoshida, M., "Electrical Discharge Machining in Gas," Annals of the CIRP, Vol. 46, No. 1, pp. 143-146, 1997.
2. Kunieda, M., Adachi, Y. and Yoshida, M., "Study on Process Reaction Force Generated by Discharge in EDM," Proc. MMSS'2000, pp. 313-324, 2000.
3. Kunieda, M. and Furudate, C., "High Precision Finish Cutting by Dry WEDM," Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 1, pp. 121-124, 2001.
4. Kunieda, M., Miyoshi, Y., Takaya, T., Nakajima, N., Zhanbo, Y. and Yoshida, M., "High Speed 3D Milling by Dry EDM," Annals of the CIRP, Vol. 52, No. 1, pp. 147-150, 2003.
5. Kao, C. C., Tao, J. and Shih, A. J., "Near dry

- electrical discharge machining,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, No. 15, pp. 2273-2281, 2007.
6. Tao, J., Shih, A. J. and Ni, J., “Experimental Study of the Dry and Near-Dry Electrical Discharge Milling Processes,” *Transactions of the ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, No. 1, Paper No. 011002, 2008.
 7. Miller, S. F., Shih, A. J. and Qu, J., “Investigation of the spark cycle on material removal rate in wire electrical discharge machining of advanced materials,” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 4, pp. 391-400, 2007.
 8. Daw, D. F., Snoeys, R. and Dekeyser, W., “Advanced pulse discriminating system for EDM process analysis and control,” *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 541-549, 1983.