방전드릴링에서 홀 관통 평가 방법

이철수^{1*} · 최인휴² · 허은영³ · 김종민³

¹서강대학교 기계공학과 / ²CSCAM(주) CNC 사업부 / ³서강대학교 미래기술연구원

A Method of Hole Pass-Through Evaluation for EDM Drilling

Cheol-Soo Lee¹ · In-Hugh Choi² · Eun-Young Heo³ · Jong-Min Kim³

¹Department of Mechanical Engineering, Sogang University

²CNC Division CSCAM Co Ltd., 311-3 Sunnam-si, Gyeonggi-do

³Sogang Institute of Advanced Technology, Sogang University

The Electric discharge machining (EDM) process is used to minimize the difference between designed feature and machined feature while the most workpiece is removed through the cutting processes. The tiny-deep hole machining and perpendicular wall machining in mold and die are good applications of EDM. Among EDM equipment, the super drill uses the hollowed electrode to eliminate the debris which causes the second discharge with the electrode and degrades the machining quality. Through the hollow, the high pressured discharge oil is supplied to remove the debris together with the spindle rotation. The thin-hollow electrode tends to easily wear out compared to the sold die-sinking electrode and its wear rate is might not allowed to monitor in real time during discharging. Up to now, the wear amount is measured by off line method, which leads machining time to increase because the hole pass-through moment can be check by visual (manually) with the extra tool path. Therefore, this study suggests the attractive method to evaluate the hole pass-through moment in which the gap voltage and z-axis encoder pulse are monitored to predict the moment. The commercial super drill is used to validate the proposed method and the experiment is carried out.

Keywords: Electric Discharge Machining, EDM Drilling, Electrode Wear out, Hole Machining, Gap Voltage.

1. 서 론

고정밀 가공을 필요로 하는 기계부품, 금형, 항공기 부품은 설계형상과 오차가 없어야 하며 가공품에 대한 요구는 마이크로 가공을 넘어 나노단위의 가공품까지 진행되고 있다. 반면, 가공품에 대한 품질은 생산성과 동시에 고려해야 하는 바, 가공 품질 및 생산성을 높이기 위해서 절삭가공과 아울러 방전 가공이 사용된다. 절삭가공으로 오차를 만족하기 어렵거나 생산 효율이 떨어지는 경우, 미세한 형상 및 정밀한 형상을 방전 가공을 통해 가공한다.

방전가공(EDM)은 1940년대에 레지스턴스-캐퍼시턴스(resistance-capacitance) 형태의 가공방법이 소개된 이후, 정밀한 위치 제어를 위한 CNC(computer numeric control)의 부작으로 첨단

반도체 장비에서부터 일상적인 용품의 대량생산에 사용되는 금형에 이르기까지 다양한 분야에 사용되고 있다. 방전가공은 0.1mm 이하의 홀 가공 뿐 아니라 곡면, 경사면에서 소재의 경도(hardness)에 관계없이 가공할 수 있는 장점을 갖고 있다(Kalpajian, 2003). 최근 방전가공 관련연구는 마이크로 크기의 가공과 방전 최적화 관련 연구들이 많이 수행되었으며, Masuzawa *et al.*(1985; 1994)와 Yu *et al.*(1998)은 마이크로 핀가공, 마이크로 노즐, 마이크로 캐버티 형상관련 연구를 수행하였다. 이철수 등(2011; 2011)은 micro-EDM을 이용한 채널 및 홀 가공에서 스핀들 스피드(RPM), 방전유, 방전 조건이 가공품질에 주는 영향에 대하여 연구하였으며, 방전 조건의 최적화를 위해 다꾸지 방법을 사용하고(Marafona, 2000), 퍼지 이론을 적용한 연구(Lin, 2000) 들이 수행되었다. EDM의 평가지표로서는 소재제거율(material

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 첨단의료기기사업본부 - 신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 2010K001051).

* 연락저자 : 이철수 교수, 121-742 서울시 마포구 신수동 1-3번지 서강대학교 기계공학과, Tel : 02-705-8646, Fax : 02-705-7968,

E-mail : cscam@sogang.ac.kr.

2011년 11월 1일 접수; 1차 : 2012년 1월 9일; 2차 : 2012년 4월 27일 수정본 접수; 2012년 5월 3일 게재 확정.

removal rate), 전극 소모량(electrode wear rate), 표면 조도(surface roughness) 등 있으며, 방전 조건의 최적화와 아울러 방전효율을 극대화하기 위해서 레이저와 EDM의 장점을 혼합한 가공방법(Jia, 1997), 초음파와 EDM을 혼합한 방법(Kremer, 1989; Kremer, 1991) 등 다양한 연구가 2차원 형상 뿐 아니라 3D 형상 가공에 대하여 시도되고 있다. 미세 형상 가공을 위한 연구로서는 마이크로 EDM, 마이크로 형조방전, 마이크로드릴링/밀링 등 다양한 장비 및 방법들(Lee, 2001; Kim, 2005; Lim, 2003)이 연구 되었으며, 김동준 등(2005)은 미세 방전 가공을 이용하여 홀을 가공할 때 발생하는 테이퍼 형상에 대하여 방전조건 및 방전 환경에 대한 연구를 수행하였다.

특히 미세한 홀 가공에 있어 방전드릴가공기(EDM drill)는 전통적인 절삭가공에 비하여 매우 효과적이다. 황동 소재의 중공을 갖는 전극을 사용하여 수십 μm 부터 수 mm 직경을 가지는 홀을 빠르고 정밀하게 가공할 수 있다. 응용분야로서는 와이어 방전가공의 시작 홀 가공부터 터빈 블레이드의 냉각공기 통로에 까지 다양한 분야에 널리 응용된다. 그러나 효율적 방전 드릴링을 위해서는 가공 중 생성되는 가공 부스러기(debris) 제거가 필수적이다. 방전부스러기(debris)들은 전극과 공작물 사이에서 쇼트를 일으키거나 2차 방전을 일으켜 정상 방전 가공을 방해한다. 이는 가공속도를 저하시킬 뿐만 아니라 가공 형상과 표면 거칠기에도 영향을 미친다. 따라서 가공 부스러기의 특성과 이의 제거와 관련한 많은 연구가 수행되었다(Kalpajian, 2003; Lonardo, 1999). 가공 부스러기의 효율적 제거를 위해 전극 형상을 스크류 형상(Kim, 1999)을 이용하거나 방전 가공 중에 축전용량을 순간적으로 높임으로써 그 폭발력을 이용한 가공 부스러기 배출로 가공 속도를 높이는 방법 등이 연구되었다(Masuzawa, 1990).

이러한 방전조건의 최적화 연구와 방전드릴의 효율적 가공을 위해서는 전극소모량에 대한 연구가 진행되어진바(Mohri, 1995; Mohri, 2000), 전극 소모 비율에 대한 정확한 예측이 필요하다. 방전가공을 통해 소모되는 전극은 가공 진행상황을 예측하기 어렵게 만들고, 또한 가공 중 발생한 가공부스러기에 의한 2차 방전은 홀 관통 여부를 판단하기 어렵게 만든다. 홀 관통 이후 지속되는 전극의 채류는 생산성 뿐 아니라 품질에 악영향을 주는바 본 연구에서는 홀 관통 시점을 평가할 수 있는 모델을 제시하고 상용 방전드릴링 장비를 이용하여 제안한 방법을 검증한다. 이 후 본 연구의 기술은 제 2장에서 방전 드릴링에 대하여 기술하고, 제 3장에서 홀 관통 순간의 방전드릴장비의 전기적 신호를 이용한 홀 관통 평가 방법을 소개한다. 제 4장에서는 본 연구에서 제시한 방법을 상용 방전드릴장비를 이용하여 실제 가공실험을 통하여 검증하고 제 5장에서는 결론 및 추후연구에 대하여 다룬다.

2. 방전드릴 가공

2.1 장비 특성

미세한 홀 가공에 사용되는 방전드릴가공(super drilling)은

형조 방전이나 와이어 방전 가공과 달리 중공의 전극과 주축의 회전을 통해 가공 중 발생한 부스러기(debris)를 제거한다. 방전 가공 중 발생한 부스러기들은 가공환경에 악영향을 주는 바, 간극(gap distance)을 좁히고 방전액의 순환을 방해한다. 또한 부스러기에 의한 2차 방전은 전극 소모를 증가시킬 뿐 아니라 가공품질을 저하시킨다. 따라서 깊고 좁은 홀 가공 시 부스러기의 제거는 매우 중요하며, 방전드릴링에서는 전극봉의 중공을 통해 고압의 방전액을 공급하고 전극을 회전시켜 부스러기 제거를 용이하게 한다(<Figure 1> 참조).

Figure 1. EDM drilling illustration

2.2 전극 소모량에 의한 홀 관통 예측

방전 드릴은 밀링이나 드릴과 같은 절삭가공과 다르게 공구인 전극이 소모 된다. 따라서 방전 드릴을 이용한 홀 가공은 가공 깊이에 소모되는 전극량을 고려하여 전극을 이송해야 홀을 관통할 수 있다. 전극 소모량은 실시간 측정이 어렵고 홀 관통 예비실험을 통해 계산할 수 있다.

<Figure 2>는 방전드릴에서 전극 소모량을 계산하는 방법을 나타낸다. 일반적인 전극소모량 계산은 홀 가공 전후에 기준면에 대한 전극 길이 차이를 이용하여 계산한다. 전극소모비율(w')은 홀 관통 시점에 소모된 전극량($D-T$)을 홀 두께(T)로 나눈 값으로 표현 할 수 있다(식 (1) 참조).

$$w' = \frac{D-T}{T} \times 100[\%] \quad (1)$$

Figure 2. Electrode wear out calculation

2.3 전극 소모 곡선

전극 소모량은 전극 형상, 가공 형상/소재, 방전 조건에 따라 달라지며, 동일한 홀을 n 회 가공할 때 첫 번째 홀 가공 시 가장 적고, 차츰 늘어나 일정한 소모량에 수렴한다(<Figure 3> 참조). 그 이유는 방전 스파크의 에너지가 전극 끝단의 형상에 따라 달라지기 때문이다. 새 전극 끝단의 세로단면 형상은 모서리가 살아있는 사각형상이지만 방전 가공이 진행되면서 사각이던 모서리가 방전 스파크에 의하여 계속 소모되어 부드러운 곡선 형상으로 변형된다. 따라서 전극 바닥면이 반구형상이 될 때 전극의 소모율이 일정하게 된다. 일반적인 전극 소모량은 식 (2)에서 보는 바와 같이 실험적 데이터를 근사하여 사용한다.

$$w' = \alpha(1 - \lambda e^{-\lambda n}) \quad (2)$$

여기서, α , λ 는 실험 상수로서, 최소 자승법에 의해 구한다.

Figure 3. The electrode wear varies according to the machining time

정확한 전극 소모 예측 모델을 구하는 것과 전극의 형상을 실시간적으로 방전드릴링에 반영한다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 전극 소모 변화를 홀 관통 예측에 반영하기 위해서 충분한 전극 소모량을 반영해야한다. 이러한 홀 관통 예측 방법은 홀 관통 이후 전극 채류로 인한 가공시간 증가와 품질 저하로 연결되는바 방전가공 상태를 모니터링하여 홀 관통을 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

3. 홀 관통 평가

3.1 홀 관통 평가

전극 소모량을 이용한 홀 관통 예측은 정확성이 떨어지며, 다양한 방전조건, 소재, 홀 형상 등을 반영한 전극 소모 예측 모델을 구하기는 더더욱 어렵다. 따라서 본 연구에서는 간극 전압(gap voltage), 방전 변압기 전류(transducer current) 및 w 축 엔코더 펄스(w -axis encoder pulse)를 모니터링 함으로써 홀 관통을 평가할 수 있는 방법을 제시한다.

Method 1 : 간극 전압을 이용한 평가

<Figure 4(a)>에서 보는 바와 같이 방전가공 중 전극(electrode)과 소재(workpiece) 사이의 전압은 간극(gap distance)에 따라서 변화하는 바, 효율적 방전가공을 위해서는 일정한 간극 유지가 필수적이다. 방전 제어기는 사용자가 입력한 최저 기준 전압(V_{under})과 최대 간극 전압(V_{over})을 유지하기 위해 전극을 상하로 이동시킨다. 즉, 방전가공에 의해 소재가 충분히 제거되어 간극전압이 최대 기준 전압(V_{over})을 넘게 되면, 전극을 하강시킨다. 반대로 전극과 소재와의 간격이 좁아져 간극 전압이 최저 기준 전압보다 떨어질 경우 쇼트(short circuit)를 방지하기 위해 전극을 상승시킨다. 이러한 방전가공기의 제어 특성으로부터 홀이 관통된 순간부터 간극 전압이 변화함을 알 수 있고, 이러한 변화는 홀 관통 평가에 사용될 수 있다.

Method 2 : 방전에너지에 의한 평가

방전 중 대부분의 에너지는 전극 바닥면과 소재사이의 방전에 의해 소모되며, 반경방향의 소모는 무시할 수 있다(Kim, 2005). 따라서 방전에 사용되는 방전 변압기의 축전 전류량은 방전이 발생하면 일정 수준 이하로 떨어졌다 상승하는 것을 반복하게 된다.

<Figure 5>는 이와 같은 현상을 나타내고 있다. <Figure 5(b)>에서와 같이 방전 변압기(trans)에서는 방전전원을 공급하며, 이때 방전 기간에 사용된 방전 에너지는 식 (3)에 의해 구할 수 있고, 방전에너지는 <Figure 5(a)>와 같이 일정한 패턴을 갖게 된다. 따라서 방전에너지가 일정 수준 이상 지속되면 홀이 관통된 것으로 평가할 수 있다.

$$\epsilon_g = \int_0^{\Delta T} V(t) \cdot I(t) dt \quad (3)$$

Method 3 : 엔코더 펄스 변화에 의한 평가

방전 제어축인 w 축은 방전 가공 중 <Figure 4(b)>에서 보는 바와 같이 간극을 조절하기 위해 상승하강(Up/Down)을 반복하며 방전조건에 따라서 일정한 기울기를 갖으며 하강한다. 그러나 관통되는 순간 간극 전압의 변화는 홀 가공 중의 엔코더 펄스와 다른 패턴을 유발 한다. 따라서 홀 가공 중의 w 축 엔코더 변화와 다른 패턴이 감지될 때 홀이 관통된 것으로 평가할 수 있다.

Figure 4. The gap voltage variation during discharge

Figure 5. The discharge energy oscillates during discharging (T1 : discharge ready time, T2 : discharging time, T3 : discharge stop, ΔT : discharge cycle, τ_{on} : discharge on, τ_{off} : discharge off)

3.2 혼합 홀 관통 평가

방전드릴 가공에서 홀 관통 평가 모델은 전극 소모량을 계산할 수 있는 중요 파라미터인 동시에 홀 가공의 생산성과 정밀도를 높일 수 있는 기초 자료이다. 홀 관통 순간은 다양한 방법으로 측정 가능한 바, 측정의 정밀도를 높이기 위해서 본 연구에서는 간극 전압 변화와 w축 엔코더 펄스 변화 특성을 이용한다.

간극 전압 패턴 : 전극은 <Figure 4(b)>에서 보는 바와 같이 방전 중에 간극 전압에 의해 Up/Down을 반복한다. 이론적으로 홀이 관통되면 간극 전압의 상승으로 전극이 지속적 하강하지만, 홀 관통에 따른 홀 내부에 있는 가공부스러기의 바닥면 배출은 전극과 2차 방전을 발생시키며, 홀 바닥면과의 전극의 방전에 의해 전극은 다시 일정시간 Up/Down을 반복한다. 따라서 홀이 관통되는 순간은 일정시간($n \times \Delta T$) 동안 간극 전압 패턴이 <Figure 6>과 같이 변한다.

엔코더 펄스 패턴 : 엔코더 펄스는 전극의 상승(하강)에 따라서 증가(감소)를 반복하게 된다. 방전 가공 중의 간극 전압은 전극의 Up/Down을 반복시키고 이는 엔코더 펄스를 변화시킨다. 그러나 홀 관통 순간 전극은 일정시간($n \times \Delta T$) 동안 Up/Down 없이 감소하다 다시 상승하여 Up/down을 반복한다.

방전 가공 중의 간극 전압 파형은 매우 빠르게 변화하며 홀 관통 순간의 패턴과 유사한 패턴의 구분을 위해 본 연구에서는 엔코더 펄스 변화를 동시에 모니터링 한다. 홀 관통 평가 모델의 전체 흐름도는 <Figure 7>에서 보는 바와 같다. 간극 전압과 엔코더 펄스변화 패턴을 모니터링하여 홀 가공시의 패턴과 다른 패턴이 감지될 때 홀 관통으로 평가한다. 즉, n회의 샘플링 주기 동안 간극 전압이 증가하고 엔코더 펄스가 지속적으로 감소하면 홀 관통으로 평가한다.

Figure 6. The gap voltage and encoder pulse pattern illustration (V_{Upper} (V_{lower}) : the maximum (minimum) base gap voltage, V_{Gap} : voltage between electrode and work-piece)

Figure 7. Hole pass through evaluation using gap voltage and encoder pulse

4. 실험 및 구현 사례

본 연구에서 제안한 홀 관통 평가 모델의 검증에 위해 KTC사의 세척방전기를 이용하여 간극 전압과 w축 엔코더 펄스를 모니터링 하였다. 방전가공에 사용된 소재는 금형특수 강인 SKD-11 (10t)이고, 전극은 외경 0.8ϕ (중공 내경 = 0.25ϕ)인 구리 소재의 전극을 사용하였다. 사용된 방전조건은 피크 방전 전류 = 23.65 A, 최소 방전 기준전압 = 10.5 V, 최대 방전 기준전압 = 23.5 V 이고(무부하 전압 = 108 V), 캐패시턴스 = 327 pF이다. <Figure 4(b)>에서 보는 바와 같이 측정된 간극 전압이 최소전압 이하이면 방전회로는 쇼트(short)로 인식하여 전극을 후퇴시키고, 최대

전압 이상이며 방전을 위해 전극을 전진시킨다. 따라서 기준전압과 간극 전압의 측정은 <Figure 8>의 방전 제어 회로에서 3개의 점을 측정하였다. 방전조건과 함께 전극 이송속도를 60 mm/min, 전극 회전속도 200 RPM을 주었을 때 가공에 소요된 시간은 33초였다.

<Figure 9(a)>는 방전가공이 일어나지 않은 상태에서 기준전압(최대)과 간극 전압 파형을 보여주고 있다. 휴지기간 중의

파형은 방전이 시작될 때 <Figure 9(b)>와 전이 상태를 거쳐, <Figure 9(c)>와 같은 안정한 상태에 도달한다. 홀이 관통되는 순간 <Figure 9(d)>에서 보는 바와 같이 간극 전압이 상승하며, 이때 홀 내부의 가공부스러기들에 의한 2차 방전에 의해 짧은 시간 동안 간극 전압이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이러한 과정은 홀 내부의 가공부스러기가 모두 배출될 때까지 반복된다. 관통이후 전극은 <Figure 9(d)>에서 보는 바와 같이 홀 바닥면

Figure 8. The voltage are monitored at the three observing points

(a) before discharging

(b) discharge start and transient period

(c) steady-state discharging period

(d) hole pass through moment

Figure 9. The voltages patterns during discharging

Figure 10. The change pattern of the encoder pulse

(a) The current peak is changed to 20.96 A

(b) When the electrode is changed from 0.8 to 1.7 ϕ

Figure 11. The encoder pulse varies with the same pattern regardless discharging condition and electrode size

과 전극사이의 방전이 일전시간 지속된다.

방전 가공 중의 w축 엔코더 펄스는 <Figure 9>의 간극전압 파형 변화와 동일한 패턴을 갖고, <Figure 10>에서 보는 바와 같다. 방전가공 시작과 함께 방전회로는 전극을 이동(하강) 시킨다. 방전이 안정화 상태에 이르기 전에 <Figure 10> ㉠와 같은 전이상태 (transient period)를 지나, ㉡에서와 같은 안정화 상태에 이른다. 이 때 전극은 시간 축 상에서 국부적인 up/down을 반복하며 전반적으로 일정한 기울기를 갖고며 하강한다. 홀이 관통된 후 <Figure 10> ㉢에서 보는 바와 같이 전극은 일시적으로

상승한다. 이러한 이유는 전극과 홀 사이에 존재하는 가공 부스러기(debris)들이 배출되지 못하고 모두 홀 바닥면으로 배출되면서 일시적인 쇼트가 발생하게 되고, 이에 따라서 방전회로는 쇼트들 방지하기 위해 전극을 후퇴시키는 것으로 판단된다. 홀 관통 순간의 엔코더 펄스 패턴은 <Figure 9(d)>의 간극전압 파형변화를 반영한다. 따라서 엔코더 펄스 구간 ㉢에서는 가공 부스러기들의 배출과 함께 홀 바닥면과 전극의 방전에 의해 일시적인 전극 하강/상승이 반복된다.

<Figure 11>은 홀 관통 순간의 엔코더 펄스가 전극의 크기 및

방전 조건의 변화에 관계없이 일정한 패턴으로 변화하는 것을 보여준다. 홀 관통시간의 간극전압과 w축 엔코더 펄스를 모니터링 한 실험결과 요약은 다음과 같다.

1. 홀 관통 후 홀 내부에 있는 가공 부스러기에 의한 2차 방전은 전극의 후퇴를 유발한다.
2. w축 엔코더 펄스는 홀 관통 순간에 전극의 쇼트로 인해 일시적으로 상승한다. 이 후 일정기간 동안 전극과 가공 부스러기의 2차 방전 및 전극과 공구 바닥면과의 방전이 진행된다.
3. 엔코더 펄스의 변화 패턴은 전극의 크기 및 방전 전류에 관계없이 유사한 패턴을 갖는바, 홀 관통 순간은 간극 전압과 w축 엔코더 펄스를 모니터링 함으로써 알 수 있다.

5. 결 론

방전 가공은 형조방전에서 미세 홀 가공까지 기계부품, 항공기 부품 및 반도체장비 등의 정밀가공에 사용된다. 일반 절삭가공의 한계 및 효율성을 보완할 수 있는 가공방법으로 전극과 소재의 방전에 의해 가공된다. 효과적인 방전 가공의 제어를 위해서는 가공 중 발생하는 전극 소모를 예측해야 하는 바 절삭공구와 다른 급속한 마모를 수반한다. 이러한 전극 소모의 예측은 방전 가공 중에 실시간으로 파악하기가 불가하며, 생산성과 가공품 질을 높이기 위해서는 홀 관통 순간을 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 홀 관통 평가를 위한 방법들을 제시하였고, 예측 정밀도를 높이기 위해 간극 전압과 z축 엔코더 펄스 패턴의 변화를 이용한 홀 관통을 평가 모델을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해서 상용 방전 드릴링 장비를 이용하여 홀 관통 실험을 하였다. 관통 후에 가공 부스러기에 의한 쇼트로 간극 전압이 떨어지는 것을 실험적으로 알 수 있었고, 이에 따른 엔코더 펄스 변화 패턴은 방전 전류의 세기나 전극의 크기에 관계없이 유사한 패턴을 갖는 것을 보였다. 실험결과는 본 연구에서 제시한 평가 방법의 타당함을 보여준다.

참고문헌

- Jia, Z. X., Zhang, J. H., and Ai, X. (1997), Study on a New Kind of Combined Machining Technology of Ultrasonic Machining and Electrical Discharge Machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **37**(2), 193-197.
- Kalpajian, S. and Schmid, S. R. (2003), Material removal processes : Abrasive, Chemical, Electrical and High-Energy Beam, in : *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Prentice Hall, New Jersey.
- Kim, B. H. (1999), Micro Hole Machining Using MEDM with Screw-Type Electrode, Master Thesis, Seoul University.
- Kim, D. J., Yi, S. M., Lee, Y. S., and Chu, C. N. (2005), Control of Taper Shape in Micro-Hole Machining by Micro-EDM, *Journal of the KSPE*, **22**(4), 52-59.
- Kim, Y. T., Park, S. J., and Lee, S. J. (2005), Micro/Meso-Scale Shapes Machining by Micro EDM Process, *International Journal of Precision and Manufacturing*, **6**(2), 5-11.
- Kremer, D., Lebrun, J. L., Hosari, B., and Moisan, A. (1989), Effects of Ultrasonic Vibrations on the Performances in EDM, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **38**(1), 199-202.
- Kremer, D., Lhiaubet, C., and Moisan, A. (1991), A Study of the Effect of Synchronizing Ultrasonic Vibrations with Pulses in EDM, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **40**(1), 211-214.
- Lee, C. S., Heo, E. Y., Hong, M. S., and Kim, J. M. (2011), A Study on the Optimal Machining Condition of the Micro Hole In Micro-EDM Process, *The 21st International conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, 409-414, TAIWAN.
- Lee, C. S., Kim, J. M., Heo, E. Y., Kim, B. M., and Kim, D. W. (2011), A Study on the Machinability of Micro Channel using Micro-EDM, *The 21st International conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, 401-408, TAIWAN.
- Lim, H. S., Wong, Y. S., Rahman, M., and Lee, M. K. F. (2003), A Study on the Machining of High-Aspect Ratio Micro Structures using Micro-EDM, *Journal of Materials Processing Technology*, **140**(1-3), 318-325.
- Lin, J. L., Wang, K. S., Yan, B. H., and Tarng, Y. S. (2000), Optimization of the Electrical Discharge Machining Process Based on the Taguchi Method with Fuzzy Logics, *Journal of Materials Processing Technology*, **102**, 48-55.
- Lonardo, P. M. and Bruzzone, A. A. (1999), Effect of Flushing and Electrode Material on Die Sinking EDM, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **48**(1), 123-126.
- Marafona, J. and Wykes, C. (2000), A New Method of Optimising Material Removal Rate using EDM with Copper-Tungsten Electrodes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**(2), 153-164.
- Masuzawa, T., Fujino, M., and Kobayashi, K. (1985), Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **34**(1), 431-434.
- Masuzawa, T., Kuo, C. L., and Fujino, M. (1990), Drilling of Deep Microholes by EDM Using Additional Capacity, *Int. J. of the Japan Society of Precision Engineering*, **23**(4), 275-276.
- Masuzawa, T., Kuo, C. L., and Fujino, M. (1994), A Combined Electrical Machining Process for Micro Nozzle Fabrication, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **43**(1), 189-192.
- Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M., and Asito, N. (1995), Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machining, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **44**, 165-168.
- Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M., and Saito, N. (1995), Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machining, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **44**(1), 165-168.
- Mohri, N., Takezawa, H., Furutani, K., Ito, Y., and Sata, T. (2000), A New Process of Additive and Removal Machining by EDM with a Thin Electrode, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **49**(1), 123-126.
- Yu, Z. Y., Masuzawa, T., and Fujino, M. (1998), Micro-EDM for Three Dimensional Cavities Development of Uniform Wear Method, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, **47**(1), 169-172.