

방전 드릴링에서 전극 소모량 예측 및 보정

이철수¹ · 최인휴² · 최용찬¹ · 김종민³ · 허은영^{3*}

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

A Study of Electrode Wear Estimation and Compensation for EDM Drill

Cheol-Soo Lee¹ · In-Hugh Choi² · Young-Chan Choi¹ · Jong-Min Kim³ · Eun-Young Heo³

¹Department of Mechanical Engineering, Sogang University

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

³Sogang Institute of Advanced Technology, Sogang University

Electric discharging machining (EDM) is commonly adopted to machine the precise and tiny part when it is difficult to meet the productivity and the tolerance by the conventional cutting method. The die-sinking EDM method works well to machine the micro-parts and the perpendicular wall of die and mould, whereas EDM drilling, called super drill, is excellent to machine the deep and narrow hole regardless the material hardness and the hole location. However, the electrode wear is rapid compared to the conventional cutting tool and makes it difficult to control the electrode feeding and to machine precisely. This paper presents an efficient method to estimate the electrode wear using hole pass-through experiment while the stochastic method is used to compensate for the estimation model. To validate the proposed method, the commercial EDM drill machine is used. The experiment result shows that the electrode wear amount can be predicted very precisely.

Keywords: EDM Drilling, Electrode Wear, Electrode Wear Estimation, Stochastic Compensation, Hole Machining

1. 서론

방전가공은 소재와 전극 사이의 방전을 이용하여 불필요한 소재를 제거하며, 일반적인 절삭공구로 가공이 어렵거나 생산 효율이 떨어지는 경우 사용한다. 급형의 코너 부위의 직각벽 가공은 방전가공의 좋은 예이며, 방전가공은 형상을 갖는 전극을 이용한 형조방전(die sinking EDM)과 미세 홀 가공을 위한 방전 드릴링(EDM drilling)으로 구분할 수 있다.

최근 방전관련 연구는 방전 조건의 최적화에 대한 연구와 이를 바탕으로 하는 마이크로 형상 가공에 대한 많은 연구가

수행되어졌다. Lee *et al.*(2000; 2000)은 micro-EDM을 이용한 채널 및 홀 가공에서 RPM, 방전유, 방전 조건이 가공품질에 주는 영향에 대하여 연구하였으며, 방전 조건의 최적화를 위해 다투지 방법을 사용하거나(Marafona, *et al.*, 2000), 퍼지 이론을 적용한 연구(Lin *et al.*, 2000)들이 수행되었다. 마이크로 형상 관련한 연구로서는 Masuzawa *et al.*(1985, 1994)와 Yu *et al.*(1998)가 마이크로 핀가공, 마이크로 노즐, 마이크로 캐버티 형상관련 연구를 수행하였다.

방전 조건의 최적화와 아울러 방전효율을 극대화하기 위해서 EDM 장비의 전기적 신호를 모니터링함으로써 가공효율을

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 첨단과학기술사업본부-신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 2012 K001051).

* 연락처 : 허은영, 121-742 서울시 마포구 신수동 1번지 서강대학교 미래기술연구원, Tel : 02-705-7875, Fax : 02-705-7968,

E-mail : heypi@sogang.ac.kr

2012년 4월 18일 접수; 2012년 10월 29일 1차 수정본 접수; 2012년 11월 22일 2차 수정본 접수; 2013년 1월 5일 3차 수정본 접수; 2013년 1월 6일 게재 확정.

높이고자 하는 연구(Lee *et al.*, 2012), 레이저와 EDM의 장점을 혼합한 가공방법(Jia *et al.*, 1997), 초음파와 EDM을 혼합한 방법(Kremer *et al.*, 1991; 1989) 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 *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2005; Lim *et al.*, 2003)이 연구되었다.

특히 미세한 홀 가공에 있어 방전드릴(EDM drill)은 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 방전드릴링을 위해서는 가공 중 생성되는 가공 부스러기(debris) 제거가 필수적이다. 방전 부스러기(debris)들은 전극과 공작물 사이에서 쇼트(short)를 일으키거나 2차 방전을 일으켜 정상 방전가공을 방해한다. 이는 가공속도를 저하시킬 뿐만 아니라 가공 형상과 표면 거칠기에도 영향을 미친다. 따라서 가공 부스러기의 특성과 이의 제거와 관련한 연구가 수행되었다(Kalpajian *et al.*, 2003; Lonardo *et al.*, 1999). 가공부스러기의 효율적 제거를 위해 전극 형상을 스크류 형상(Kim *et al.*, 1999)을 이용하거나 방전가공 중에 축전용량을 순간적으로 높임으로써 그 폭발력을 이용한 가공 부스러기 배출로 가공 속도를 높이는 방법 등이 연구되었다(Masuzawa *et al.*, 1990).

이러한 방전조건 최적화 연구와 방전드릴의 효율적 가공을 위해서는 전극소모량에 대한 연구가 진행되어진 바(Mohri *et al.*, 1995; 2000) 전극 소모 비율에 대한 정확한 예측이 필요하다. 전극 소모 예측은 오프라인(off-line)에서 실험을 통하여 기준 모델을 만들고 예측하는 방법과 온라인(on-line)상에서 갭전압을 이용하거나(Chang and Chiu, 2004), 방전 펄스를 모니터링하여 실시간(real time)으로 전극 소모량 보정하는 방법(Bleys *et al.*, 2002)이 있다. 방전 밀링(EDM milling)의 경우 전극을 가공면에 이동할 때 발생하는 갭전압 및 방전 펄스 변화를 이용하여 온라인 전극 보정이 가능지만, 방전 드릴의 경우 실시간 전극 소모량 측정이 매우 어렵다. 방전가공을 통해 소모되는 전극은 가공 진행상황을 예측하기 어렵게 만들고, 블라인드 홀 가공의 경우 정밀한 가공 및 품질을 향상시키기 위해 전극 소모량에 대한 정보가 필요하다. 전극 소모 예측은 생산계획 및 공정계획의 기초자료로 사용될 수 있는 바 홀 관통 순간의 전극 소모량을 이용하여 예측할 수 있다. 본 연구에서는 오프라인상에서 홀이 관통되는 순간의 전극 소모 실험을 통하여 전극소모량을 예측하는 모델을 제시하고, 상용 방전드릴링 장비를 이용하여 제안한 방법을 검증한다. 이후 본 연구의 기술은 제 2장에서 전극 소모량에 대한 수리적 모델을 제시하며, 제 3장에서 홀 관통을 이용한 추계적 전극소모량 예측 모델의 보정방법을 제안한다. 제 4장에서는 본 연구에서 제시한 예측 모델을 상용 방전드릴을 이용하여 실제 방전가공실험을 통하여 검증하고, 결론 및 추후연구는 제 5장에서 기술한다.

2. EDM(Electrical Discharge Machining)

2.1 EDM Drill

방전 드릴은 일반적인 형조방전(Die-sinking EDM)과는 다르게 전극의 중공을 통한 고압의 방전액과 주축 회전을 이용하여 가공 부스러기(debris)를 제거한다. 방전 부스러기는 방전액의 흐름을 방해하고, 2차 방전에 의한 방전 효율의 감소 및 전극의 마모를 촉진한다(Marafona, *et al.*, 2000; Lin *et al.*, 2000). 따라서 고압의 방전액 공급과 주축 회전을 통한 방전 부스러기(debris)의 효과적인 배출이 가공 효율을 결정하는 주요 인자로 작용한다. <Figure 1>은 중공의 전극을 사용하는 EDM 드릴의 예를 보여준다.

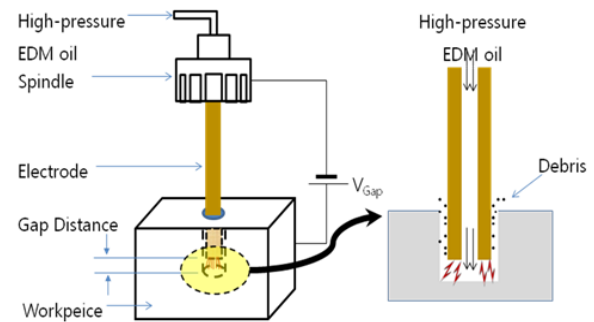


Figure 1. EDM drilling illustration

2.2 Electrode Wear Estimation Model

방전 드릴링은 일반 절삭공구를 사용하는 가공과 달리 중공 전극과 공작물 사이의 비접촉식 방전에 의하여 가공이 된다. 방전 프로세스는 전기적 에너지가 열 에너지로 변환되고 이때 생성되는 플라즈마 채널 내에서 소재가 용융/증발되며(Masuzawa *et al.*, 1985; 1994; Yu, *et al.*, 1998) 가공물 뿐 아니라 공구인 전극 자체도 마모된다. 전극의 마모는 EDM 조건과 방전 시간에 따라서 결정된다. 초기의 전극의 수직 단면형상은 <Figure 2>(a)와 같으나 방전이 이뤄짐에 따라 <Figure 2>(b)와 같은 반구형상으로 변한다.

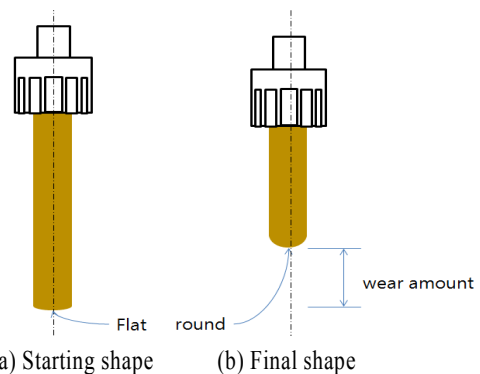


Figure 2. Bottom shape of electrode according to discharging

일반적으로 전극 소모율(electrode wear ratio, EWR)은 <Figure 3>에서 보는 바와 같이 홀 관통 시점에 홀 두께(T)를 전극이 이송된 길이(D)로 나눈 값으로 표현할 수 있다.

$$\text{electrode wear ratio (EWR)} = \frac{D-T}{T} \times 100 [\%] \quad (1)$$

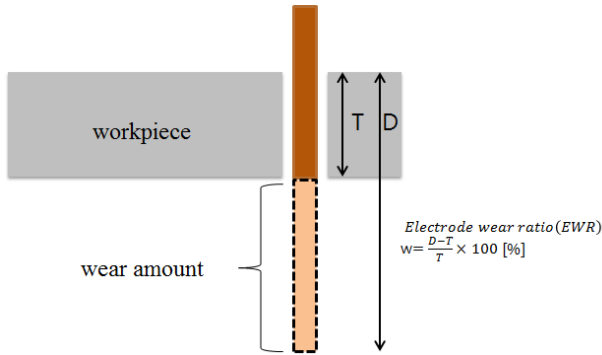
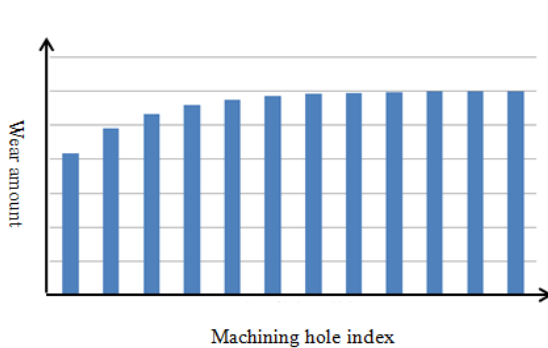


Figure 3. Electrode wear out calculation

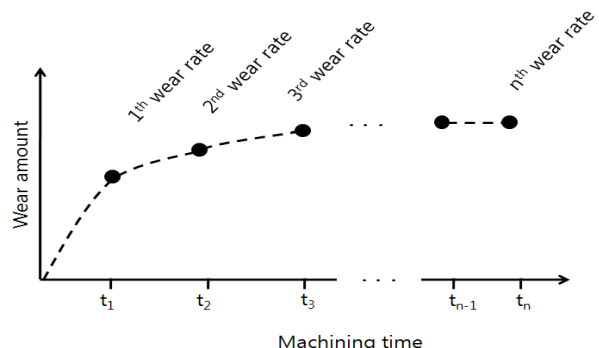
그러나 가공시간에 따라서 전극 소모율은 달라지는 바 <Figure 4>와 같은 곡선을 갖는다. 즉, 전극 소모량은 가공 횟수에 비례하며 수렴하게 되고 일정 횟수 이상의 홀 가공 후에는 수렴하게 된다. 이러한 이유는 <Figure 2>에서 보는 바와 같이, 일정 횟수 이상에서는 전극의 수직 단면 형상이 반구 형상으로 수렴하여 일정한 소모율을 갖는 것으로 예측 된다. 전극 소모량은 가공 횟수 n 에 대하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있고, n 번째 홀까지 가공에 소모된 총 전극 소모 길이는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 여기서 α_n 와 λ_n 는 상수이고, n 은 가공 횟수이다. w_n 는 n 번째 홀 가공에 소모된 전극 길이이고, W 는 n 번째 홀 가공까지 소모된 총 전극 길이이다.

$$w_n(n) = \alpha_n(1 - e^{-\lambda_n n}) \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} W(n) &= \sum_{i=1}^n w_n(i) \\ &= \sum_{i=1}^n \alpha_n(1 - e^{-\lambda_n i}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



(a) Electrode wear amount



(b) Electrode wear rate

Figure 4. Electrode wear amount and wear ratio

만약 각 홀 가공에 소모된 전극을 가공시간(ΔT)으로 나누면 i 번째 홀 가공에 소모된 전극은 단위시간당 소모율로 환산할 수 있다(<Figure 4>(b) 참고). 식 (2)는 시간축 상의 함수(식 4)로 표현할 수 있고, 식 (3)의 n 번째 홀 가공까지 소모된 전극은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$w_t(n) = \alpha_t(1 - e^{-\lambda_t t}) \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{aligned} W(n) &= \sum_{i=1}^n \int_{t_{i-1}}^{t_i} w_t(n) dt \\ &\approx \int_0^T \alpha_t(1 - e^{-\lambda_t t}) dt + \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

전극의 길이가 충분하다고 가정할 경우, n 번째 홀 가공에 소모된 전극 길이 $w_t(n)$ 은 n 번째 홀 가공까지 소모된 총 전극 길이($W(n)$)에서 $n-1$ 번째 홀 가공까지의 소모된 전극 길이($W(n-1)$)의 차로 표현할 수 있다. 여기서, $\delta(n) = \sum_{i=1}^n \delta_i$, δ_i 는 i 번째 홀 가공에 소요된 시간이며, ϵ 은 오차 상수이다.

$$\left\{ \begin{aligned} w(n) &= W(n) - W(n-1) \\ &\approx \int_0^{\delta(n)} w_t(n) dt - \int_0^{\delta(n-1)} w_t(n) dt \\ &= \int_{\delta(n-1)}^{\delta} w_t(n) dt + \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3. Stochastic Compensation Method

방전가공 중 전극의 소모량을 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 가공 상황을 판단하기 위하여 시편의 홀 가공 예비 실험을 통하여 전극소모율 예측 모델을 구한다. 그러나 식 (2), 식 (4)의 예측 모델은 전극의 형상 및 다양한 방전가공 환경에 따라 오차를 수반하게 되므로 이의 보정이 필요하다

전극 소모량은 전극 형상과 밀접한 관계가 있으며 과거 홀 가공을 통한 전극 형상변화 이력에 관계없이 직전의 홀 가공 후 전극형상에 영향을 받는다. 따라서 예측 모델의 보정은 이

전 홀 가공까지 소요된 시간(T_s)과 현재 홀(n번째 홀) 가공에 소요된 시간(t_m)을 이용하여 보정할 수 있다. 식 (7), 식 (8)에서 보는 바와 같이 $\alpha(\alpha_n', \alpha_t')$ 상수를 보정하여 후속 홀(n+1) 가공의 전극 소모량($w(n)$) 예측한다. 즉, 홀 가공에 소요된 시간(T_s, t_m)을 이용하여 식 (7), 식 (8)의 α 상수를 다시 추정하고, 같은 방법으로 다음 홀 가공의 전극 소모량 예측에 적용한다.

$$\left\{ \begin{array}{l} w_n(n) = \alpha_n'(1 - e^{-\lambda_n n}) \\ \alpha_n' = \frac{w_n(n)}{(1 - e^{-\lambda_n n})} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} w_t(T_s + t_m) = \alpha_t'(1 - e^{-\lambda_t(T_s + t_m)}) \\ \alpha_t' = \frac{w(T_s + t_m)}{(1 - e^{-\lambda_t(T_s + t_m)})} \end{array} \right\} \quad (8)$$

4. Experimental Results

본 연구에서 제안한 전극 소모량 예측 방법을 검증하기 위해 KTC사의 상용 방전 드릴(EDB-435F)을 사용하여 방전가공 실험을 하였다(<Figure 5> 참고). 구리 재질의 외(내)경이 $\phi 0.7$ ($\phi 0.25$)의 전극을 사용하였고, 방전조건은 <Table 1>과 같다. <Figure 5>에서 보는 바와 같이 예측 모델을 위해 10회의 동일한 홀 10개를 반복 가공하였고, 예측 모델에 전극 사용시간을 반영하기 위해 새로운 전극으로 교체하여 반복실험을 하였다. 데이터 수집의 편의를 위한 11개의 홀 가공 패턴을 이용하여 전극 소모량을 자동 측정하였다. 가공 실험 결과 전극 소모량과 가공시간은 <Table 2>에서 보는 바와 같이 홀 가공이 진행될수록 평균 소모량(amount average)과 소모비율(wear rate)이 수렴하는 것을 볼 수 있다.

홀 가공 예비실험을 통해 식 (2), 식 (4)를 이용한 예측 모델은 식 (9), 식 (10)과 같이 얻을 수 있으며, 이 때 예측 모델의 오차

제공합은 각각 0.0243과 0.0003이다(<Figure 6> 참고).

$$w_n(n) = 2.497(1 - e^{-1.132n}) \quad (9)$$

$$w_t(t) = 0.238(1 + e^{0.09893t}) \quad (10)$$

Table 1. Discharge condition

Discharge parameters		Values
		$\phi 0.7(0.25)$
Duty ratio	τ_{on} (mSec.)	28
	τ_{off} (mSec.)	10
Current(A)		12.2
Discharge voltage range	Min(V)	10.5
	Max(V)	20.7
Capacitance(μF)		0.18
Spindle speed(RPM)		1450
Feedrate(mm/min)		60
Material(thickness)		SKD-11(5t)

본 연구에서 제안하는 전극 소모량 예측 모델의 실시간 보정 방법의 검증을 위해 동일한 전극과 방전조건으로 10t의 SKD-11시편을 3회 가공하였다. 식 (3), 식 (5)에 의한 전극 소모 예측값은 <Table 3>의 실제 소모량(electrode wear)과 큰 오차가 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 홀 내벽과 전극사이의 방전이 전극 소모량에 영향을 주며, 동일한 소재라도 가공 두께에 따라서 달라짐을 보여준다(<Figure 7>(b) 참고). 따라서 전극 소모율 예측 모델의 보정을 위해 본 연구에서 제안하는 추계적(stochastic) 보정 방법을 적용하였다. 홀 가공횟수(식 (3))에 의한 모델과 전극 소모비율에 의한 모델(식 (5))에 대하여 적용하였으며, <Table 3>의 보정 후 예측값(after compensation)에서

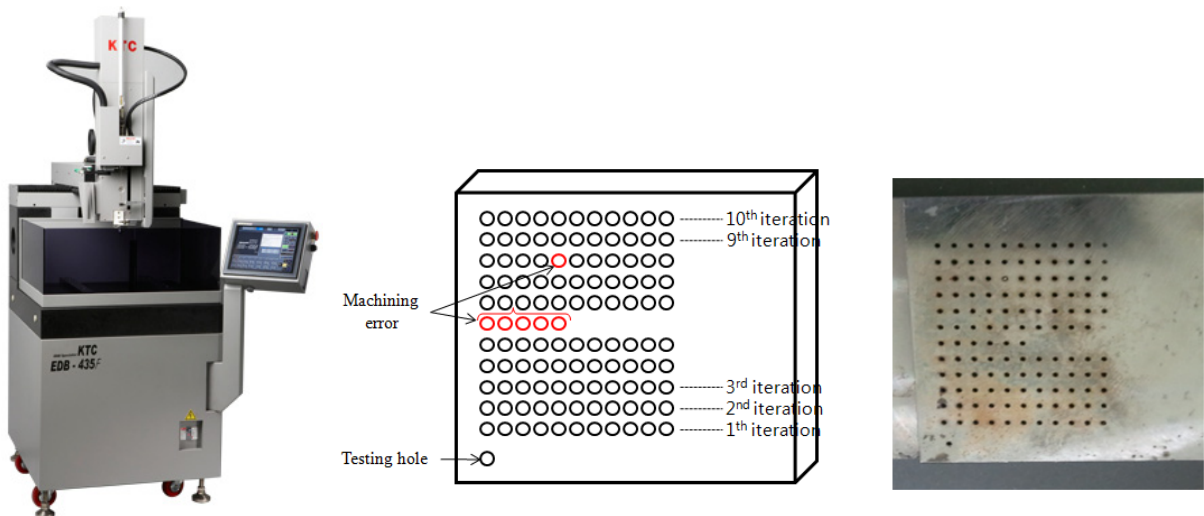


Figure 5. EDB-435F EDM machine and experimental result for estimator

Table 2. The experiment for the electrode wear out

Iteration Hole Index	Machining time(electrode wear)										amount average	wear ratio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	10.91 (1.7)	11.63 (1.8)	10.77 (1.8)	10.5 (1.8)	9.45 (1.6)	10.24 (1.6)	10.18 (1.7)	10.2 (1.6)	10.63 (1.6)	10.4 (1.8)	10.49 (1.70)	0.162
2	11.31 (2.1)	11.02 (2.2)	10.53 (2.0)	10.65 (2.2)	10.11 (2.4)	10.34 (2.2)	10.26 (2.2)	12.33 (2.4)	14.5 (2.3)	10.47 (2.2)	11.15 (2.22)	0.199
3	10.63 (2.3)	10.77 (2.4)	11.8 (2.6)	10.89 (2.5)	10.33 (2.5)	10.56 (2.5)	10.31 (2.4)	11.15 (2.4)	10.44 (2.5)	10.72 (2.6)	10.76 (2.47)	0.230
4	10.79 (2.3)	10.58 (2.4)	10.59 (2.3)	10.54 (2.2)	10.26 (2.4)	9.98 (2.4)	11.09 (2.4)	10.24 (2.4)	10.42 (2.5)	10.42 (2.5)	10.49 (2.38)	0.227
5	10.52 (2.3)	10.26 (2.4)	10.34 (2.4)	10.43 (2.3)	10.45 (2.7)	10.44 (2.5)	10.21 (2.4)	10.24 (2.5)	10.6 (2.5)	10.33 (2.4)	10.38 (2.44)	0.235
6	10.57 (2.4)	10.46 (2.5)	10.37 (2.3)	10.26 (2.4)	10.24 (2.6)	10.21 (2.5)	10.58 (2.4)	9.99 (2.2)	10.43 (2.6)	10.17 (2.6)	10.33 (2.45)	0.237
7	10.83 (2.4)	10.29 (2.6)	11.6 (2.7)	10.34 (2.5)	10.2 (2.5)	10.18 (2.6)	10.15 (2.6)	10.64 (2.8)	10.64 (2.5)	10.32 (2.6)	10.52 (2.58)	0.245
8	10.42 (2.4)	10.45 (2.5)	10.63 (2.5)	10.54 (2.4)	10.09 (2.6)	10.41 (2.5)	10.31 (2.5)	10.42 (2.6)	11.1 (2.7)	10.52 (2.3)	10.49 (2.50)	0.238
9	10.41 (2.5)	10.24 (2.6)	10.26 (2.3)	10.45 (2.5)	10.28 (2.5)	11.0 (2.5)	10.45 (2.6)	10.22 (2.5)	10.39 (2.5)	10.91 (2.8)	10.46 (2.53)	0.242
10	10.46 (2.4)	10.39 (2.4)	10.53 (2.6)	10.45 (2.5)	10.61 (2.4)	11.0 (2.5)	10.54 (2.3)	10.31 (2.6)	10.42 (2.8)	10.36 (2.6)	10.51 (2.51)	0.239

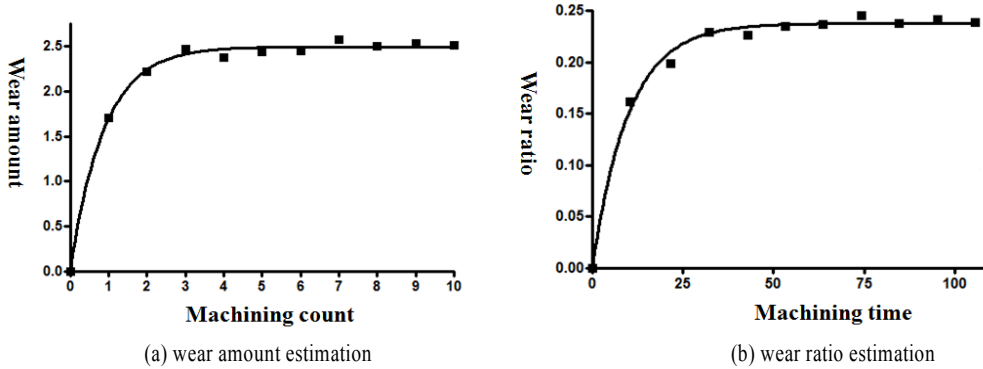


Figure 6. The electrode wear estimators : dots are the actual wear amounts(ratios) and solid lines are fitted curves

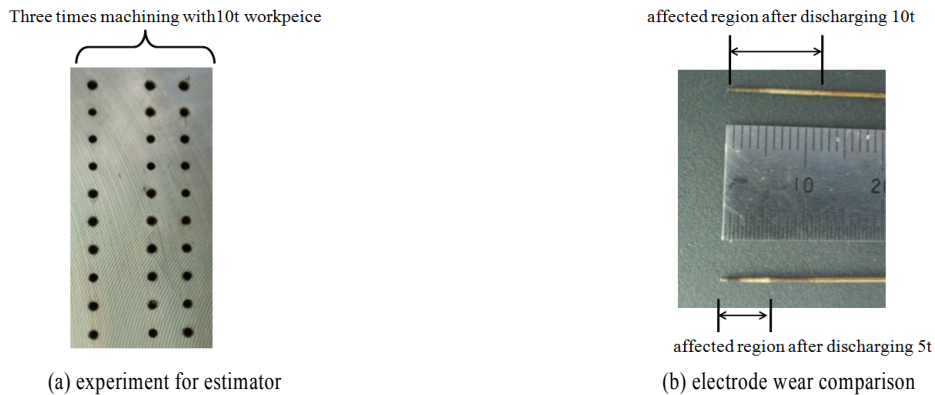


Figure 7. Three times discharging are carried out to compensate the estimation model and the electrodes are compared after 5t and 10t workpieces are machined

Table 3. The estimation model compensation with electrode wear amount(10t thickness workpeice)

Iteration	Errors	Cumulated machining time	electrode wear		Estimation model and its compensation					
			amount	ratio	Estimator error amount			Electrode wear ratio		
					adjusted α_n'	after compensation	difference	adjusted α_t'	after compensation	difference
1	1	21.24	5.4	0.254	7.9692	1.6920	3.7080	0.2897	0.2089	0.0453
	2	42.21	6.5	0.310	7.2539	7.1409	0.6409	0.3148	0.2852	0.0248
	3	63.01	6.5	0.313	6.7253	7.0109	0.5109	0.3131	0.3142	0.0017
	4	86.56	7.1	0.301	7.1775	6.6527	0.4473	0.3015	0.3131	0.0116
	5	106.63	7.4	0.369	7.4259	7.1525	0.2475	0.3687	0.3015	0.0672
	6	126.61	7.3	0.365	7.3082	7.4175	0.1175	0.3654	0.3687	0.0034
	7	146.50	7.3	0.367	7.3026	7.3056	0.0056	0.3670	0.3654	0.0017
	8	166.64	7.4	0.367	7.4009	7.3018	0.0982	0.3674	0.3670	0.0004
	9	186.23	7.3	0.373	7.3003	7.4006	0.1006	0.3726	0.3674	0.0052
	10	205.97	7.3	0.370	7.3001	7.3002	0.0002	0.3698	0.3726	0.0028
2	1	22.27	5.5	0.247	8.1167	1.6920	3.8080	0.2776	0.2117	0.0353
	2	48.97	6.5	0.243	7.2539	7.2731	0.7731	0.2454	0.2754	0.0320
	3	71.55	6.9	0.306	7.1392	7.0109	0.1109	0.3058	0.2452	0.0604
	4	94.11	7.4	0.328	7.4808	7.0621	0.3379	0.3280	0.3058	0.0222
	5	116.28	7.5	0.338	7.5262	7.4548	0.0452	0.3383	0.3280	0.0103
	6	138.69	7.4	0.330	7.4083	7.5178	0.1178	0.3302	0.3383	0.0081
	7	161.59	7.4	0.323	7.4027	7.4056	0.0056	0.3231	0.3302	0.0071
	8	184.39	7.7	0.338	7.7009	7.4018	0.2982	0.3377	0.3231	0.0146
	9	206.31	7.2	0.328	7.2003	7.7006	0.5006	0.3285	0.3377	0.0093
	10	229.13	7.6	0.333	7.6001	7.2002	0.3998	0.3330	0.3285	0.0046
3	1	20.84	5.4	0.259	7.9692	0.2579	5.1421	0.2969	0.2077	0.0514
	2	44.40	6.4	0.272	7.1423	7.1409	0.7409	0.2750	0.2932	0.0216
	3	65.71	6.5	0.305	6.7253	6.9030	0.4030	0.3055	0.2746	0.0304
	4	87.17	6.8	0.317	6.8743	6.6527	0.1473	0.3169	0.3054	0.0114
	5	108.80	7.3	0.337	7.3255	6.8503	0.4497	0.3375	0.3169	0.0206
	6	130.31	7.1	0.330	7.1080	7.3173	0.2173	0.3301	0.3375	0.0074
	7	152.81	7	0.311	7.0025	7.1054	0.1054	0.3111	0.3301	0.0190
	8	174.67	7.3	0.334	7.3009	7.0017	0.2983	0.3339	0.3111	0.0228
	9	196.35	7.1	0.327	7.1003	7.3006	0.2006	0.3275	0.3339	0.0065
	10	217.94	7.3	0.338	7.3001	7.1002	0.1998	0.3381	0.3275	0.0106

보는 바와 같이 전극 소모비율에 의한 방법이 실제 소모량에 빠르게 수렴함을 볼 수 있다. 전극 소모비율에 의한 방법의 경우 4회의 보정 후에는 3% 이내의 예측오차율을 보였다.

5. Conclusion

방전가공(Electric Discharge Machining)은 항공우주 산업(Aero-Space Industry), 몰드(Molds)와 다이(Die)제작, 자동차 산업, 반도체 장비 등 다양한 정밀 부품의 가공에서 사용된다. 전통적

인 기계 가공법과는 다르게, 방전가공은 공구와 소재의 직접적인 접촉 없이 가공이 된다는 장점이 있지만 방전에 의한 열로 인하여 공구인 전극의 소모가 발생하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 방전 드릴링에서 전극 소모량을 예측하기 위해 홀 관통 실험을 통한 전극 소모예측 모델과 실시간 보정 방법을 제시하였다.

본 연구에서 제안하는 전극 소모량 예측 모델은 소모량이 가공 시간에 따라 일정하게 수렴한다는 점에 착안하여 홀 가공 회수와 전극 소모비율에 의한 두 가지 예측 방법을 제시하였다. 그러나 변화하는 방전 환경에 따라서 예측 모델은 실시

간으로 보정할 수 있는 방법이 필요한 바 추계적 보정 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제안하는 예측 및 보정 방법의 검증 을 위해 상용 EDM 드릴을 이용하여 예측 모델을 수립하였다. 실시간 예측 보정의 정확도를 측정하기 위해 두께가 다른 소재의 가공실험을 하였으며, 전극 소모비율에 따른 보정 방법 이 보다 빠르게 수렴함을 보였다. 4회의 실시간 보정 후에 3% 이하의 전극 소모 예측이 가능함을 보였다. 본 연구 결과는 블라인드 홀 가공에 적용이 가능하며, 추후 갭 전압(gap voltage), 전류, 커패시턴스 등의 방전 조건에 따른 예측 모델의 변화에 대한 추가적인 연구가 있을 수 있다.

참고문헌

- Bleys, P., Kruth, J. P., Lauwers, B., Zryd, A., Delpretti, R., and Tricarico, C. (2002), Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, **51**(1), 157-160.
- Chang, Y.-F. and Chiu, Z.-H. (2004), Electrode wear-compensation of electric discharge scanning process using a robust gap-control, *Mechatronics*, **14**, 1121-1139.
- 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, Y. T., Park, S. J., and Lee, S. J. (2005), Micro/Meso-Scale Shapes Machining by Micro EDM Process, *International Journal of Precision Engineering 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., Choi, I. H., Heo, E. Y., and Kim, J. M. (2012), A Method of Hole Pass-Through Evaluation for EDM Drilling, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **38**(3), 220-226.
- 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*, TAIWAN, 409-414.
- 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*, TAIWAN, 401-408.
- Lim, H. S., Wong, Y. S., Rahman, M., and Lee, M. K. F. (2003), A Study on the machining of high-aspect ration 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 Tarnq, 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., Ku, 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 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.