

# 방전 드릴을 이용한 미세 홀 관통 공정의 전극 소모량 실시간 예측

최용찬\*, 허은영\*\*, 김종민\*\*, 이철수<sup>+</sup>

(Manuscript received: Sep, 3, 2012 / Revised: Nov, 5, 2012 / Accepted: Nov, 5, 2012)

## Real-Time Prediction of Electrode Wear for the Small Hole Pass-Through by EDM-drill

Yong-Chan Choi\*, Eun-Young Huh\*\*, Jong-Min Kim\*\*, Cheol-Soo Lee<sup>+</sup>

### Abstract

Electric discharge machining drill (EDM-drill) is an efficient process for the fabrication of micro-diameter deep metal hole. As there is non-physical contact between tool (electrode) and workpiece, EDM-drill is widely used to machine the hard machining materials such as high strength steel, cemented carbide, titanium alloys. The electro-thermal energy forces the electrode to wear out together with the workpiece to be machined. The electrode wear occurs inside of a machining hole. and It causes hard to monitor the machining state, which leads the productivity and the quality to decrease. Thus, this study presents a methodology to estimated the electrode wear amount while two coefficients (scale factor and shape factor) of the logarithmic regression model are evaluated from the experiment result. To increase the accuracy of estimation model, the linear transformation method is adopted using the differences of initial electrode wear differences. The estimation model is verified through experiment. The experimental result shows that within minute error, the estimation model is able to predict accurately.

**Key Words** : EDM-drill(electric discharge machining- drill 방전 드릴), electrode wear(전극 소모), real-time prediction(실시간 예측), small hole machining(미세 홀 가공)

## 1. 서론

최근 제조업계의 발전과 야금기술의 발달에 따른 다양한 신소재의 도입과 고정도, 고정밀의 가공방법을 요구하는 사례가 증가하고 있다. 전통적인 소재의 강도와 경도를 상회하는 초경합금, 세라믹, 복합재료 등의 발달로 인하여 신뢰성의 제품개발이 가능하게 되었다<sup>(1,2)</sup>. 강도와 경도가 높은 이러한 소재의 경우 기존의 가공방법으로는 가공이 어렵다는 단점이 있다. 가공

이 어려운 소재에 전통적인 절삭가공용 공구를 이용하는 경우 가공 깊이가 깊어질수록 모재와 공구간의 마찰력이 커져서 공구의 파손을 초래하게 된다. 가공깊이가 깊을수록 특수한 가공법을 적용하지 않는 경우, 가공 자체가 불가능해 지는 일이 발생한다<sup>(1,3,4)</sup>. 깊은 구멍의 가공에 사용되고 있는 특수 가공법으로는, 전기 화학적 방식의 전해가공(electro-chemical machining, ECM)이 있고, 열적 가공방식으로 방전가공(electrical discharge machining, EDM), 레이저 빔 가공(laser beam machining,

\* 주저자, 서강대학교 기계공학과 대학원

+ 교신저자, 서강대학교 기계공학과

주소: 121-742 서울시 마포구 신수동 1번지

\*\* 서강대학교 미래기술연구원

✉ Corresponding Author E-mail: cscam@sogang.ac.kr

LBM), 전자 빔 가공(electron beam machining, EBM) 등이 있다<sup>(5)</sup>. 이러한 가공법 중 방전 드릴은 중공 전극(hollow electrode)을 사용하며 유전체(dielectric)를 가공 액으로 사용하는 가공 방법으로, 최소 5 $\mu\text{m}$ 이하의 홀 가공이 가능하기 때문에 정밀 가공에 가장 효과적인 가공 법 중 하나이다<sup>(6,7)</sup>. 그러나 방전 스파크에 의한 전극의 마모는 전통적인 절삭가공의 공구 마모나 일반적인 형조 방전(die-sinking EDM)의 공구 마모에 비하여 다량이 발생한다.

전극의 마모에 대한 문제는 다양한 방법으로 연구가 수행되었다. Mohri *et al.*은 가공 시 시간의 경과에 따른 로드 형(rod type) 전극의 마모형상에 대하여 연구하였고<sup>(10)</sup>, Jeong *et al.*은 방전드릴링 시 발생하는 전극과 공작물의 기하학적 형상을 예측하는 연구를 하였다<sup>(11)</sup>. Yuan *et al.*은 분진 혼합형(powder mixed) EDM가공에서의 소재 제거율(material removal rate, MRR)과 전극 마모비율(electrode wear ratio, EWR)에 대하여 연구한 바 있다<sup>(12)</sup>. Pham *et al.*은 중실 형과 중공 형 전극을 이용한 방전 드릴가공 시 전극 형태에 따른 전극 마모에 대하여 연구하였다<sup>(13)</sup>.

방전 드릴에서 동일한 홀을 반복하여 가공하는 경우 가공횟수가 증가할수록 전극 소모량이 증가하고, 가공 자체가 미세 홀 내부에서 일어남에 따라 전극의 실제 위치를 정확하게 파악하기 어렵다. 이러한 이유로 방전 드릴시 방전축의 이송량은 작업자가 임의의 값을 예측하여 가공하게 된다. 이 경우 실제 홀 가공에 필요한 가공깊이 이상으로 방전축을 이송하게 되거나, 관통 깊이 이하로 가공이 되는 경우가 발생한다. 불필요한 이송은 가공시간의 증가로 이어지고, 관통이 되지 않은 경우 재가공을 필요로 하게 된다. 이는 생산성을 저하시키는 원인중 하나로 작용한다.

전극 소모량의 예측이 가능한 경우 불필요한 방전축 이송을 방지할 수 있고, 가공 예정인 관통 홀의 개수에 따른 필요 전극 길이 및 전극 교체 시기의 판단이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 방전 드릴링 시 소모되는 전극의 길이와 가공 횟수 사이의 관계를 분석하여 전극 소모량 예측모델을 제시하고, 실시간으로 전극 소모량을 예측할 수 있는 방법을 제안한다. 본 연구에서 제시하는 방법은 상용 방전 드릴기기(EDM-drill machine)를 이용한 실험을 통하여 검증하였다.

## 2. 방전 드릴

### 2.1 방전 드릴

방전 드릴은 일반적인 형조방전(Die-sinking EDM)과는 다르게 전극의 중공을 통한 고압의 방전액과 주축 회전을 이용하여 방전 부스러기(debris)를 제거한다. 방전 부스러기는 방전액의 흐름을 방해하고, 2차 방전에 의한 방전 효율의 감소, 전극

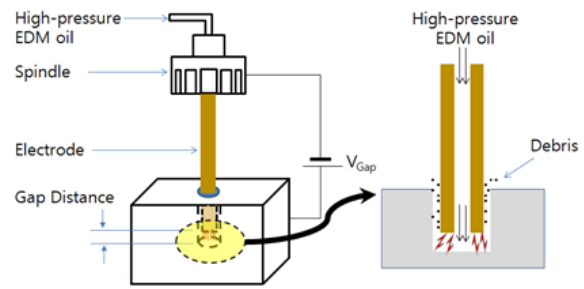


Fig. 1 EDM-drill Illustration

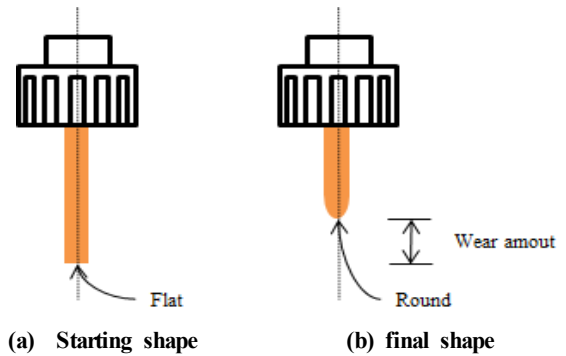


Fig. 2 Bottom shape of electrode according to discharging

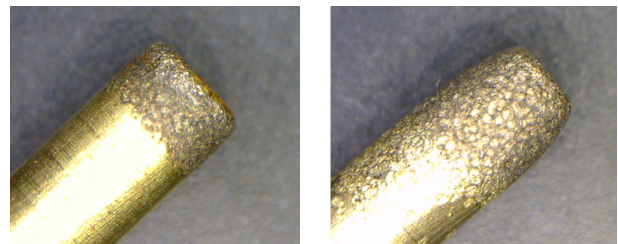


Fig. 3 Bottom shape of electrode according to machining depth

의 마모 증가의 원인으로 작용한다<sup>(7,8)</sup>. 따라서 고압의 유전체 공급과 주축 회전을 통한 방전 부스러기의 효과적인 배출이 가공 효율을 결정하는 주요 인자로 작용한다. Fig. 1은 중공의 전극을 사용하는 방전 드릴의 예를 보여준다.

### 2.2 실험 장치

본 연구에서는 전극 소모량과 가공횟수의 관계 분석 실험을 위하여 KTC사의 상용 방전 드릴기기 EDB-435를 사용하였다(Fig. 4). 방전축의 이송 가능 면적은 720mm×580mm×270mm이다. 전극 회전 시 편심 회전을 방지하기 위한 전극 가이드가 장착되었고, 유전체로는 물, 흑연, 방전유의 사용이 가능하다.

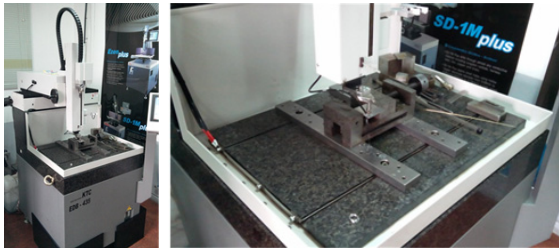
실험은  $\varnothing 0.5$ (중공직경  $\varnothing 0.20$ )와  $\varnothing 0.7$ (중공직경  $\varnothing 0.25$ )의 중공 전극을 사용하였고, 각각 3t, 5t의 SKD-11 공구강 소재를 9회 연속 관통을 1회 실험으로 정의 하고, 5회 반복 실험 하였

**Table 1 Discharge Condition**

Discharge parameters		Values	
		$\phi 0.7(\phi 0.25)$	$\phi 0.5(\phi 0.2)$
Duty ratio	$\tau_{on}(\text{msec.})$	28	20
	$\tau_{off}(\text{msec.})$	10	4
Current (A)		9	10
Discharge voltage range	Min V(V)	10.5	10.5
	Max V(V)	20.7	20.7
Capacitance ( $\mu F$ )		0.18	0.079
Spindle speed (RPM)		1450	1450
Feedrate (mm/min)		60	60
Material (thickness)		SKD-11 (5t)	SKD-11(3t)

**Table 2 The experiment for the electrode wear out ( $\phi 0.5$  with 3t, mm)**

no.	$\phi 0.5$ electrode(3t)					
	exp. 1	exp. 2	exp. 3	exp. 4	exp. 5	Avg
0	0	0	0	0	0	0
1	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.76
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1.1	1.1	1	1.1	1.06
4	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.08
5	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.08
6	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.08
7	1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
8	1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
9	1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1



**Fig. 4 EDB-435 EDM-drill machine**

다. 방전조건은 Table 1과 같다.

### 3. 전극 소모량 예측

#### 3.1 전극 소모량 모델

실험을 통하여 측정한 전극 소모량은 Table 2, 3과 같다. 전극 소모량은 가공 횟수에 비례하여 증가하고, 일정 횟수 이상의 홀 가공 후에는 수렴하게 된다. 이러한 이유는 Fig. 2, Fig. 3에서 보는 바와 같이 일정 횟수 이상에서는 전극의 수직 단면 형상이 반구 형상으로 수렴하여 일정한 소모율을 갖는 것으로 예측되며, 3~4번째 이후의 전극 소모량은 일정 값에 수렴하여 일정하게 유지되는 점에 착안하여 지수함수 형태로 전극 소모량 모델을 정의할 수 있다.

전극 소모량과 가공 횟수의 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 w_1 &= \alpha(1 - e^{-\beta}) \\
 w_2 &= \alpha(1 - e^{-2\beta}) \\
 w_3 &= \alpha(1 - e^{-3\beta}) \\
 &\vdots \\
 w_n &= \alpha(1 - e^{-n\beta}) \\
 \sum_1^n w_n &= \sum_1^n \alpha(1 - e^{-n\beta})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

**Table 3 The experiment for the electrode wear out ( $\phi 0.7$  with 5t, mm)**

no.	$\phi 0.7$ electrode(5t)					
	exp. 1	exp. 2	exp. 3	exp. 4	exp. 5	Avg
0	0	0	0	0	0	0
1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.14
2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.32
3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.36
4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4	1.42
5	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.44
6	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.44
7	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.44
8	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.44
9	1.4	1.5	1.4	1.5	1.4	1.44

여기서,  $n$ 은 가공 횟수,  $w_n$ 은  $n$ 번째 미세 홀 가공시 소모되는 전극 소모량,  $\alpha$ 는 최대 전극 소모량을 결정하는 상수(scale factor),  $\beta$ 는 전극 소모량 곡선의 형상을 결정하는 상수(shape factor)이다.  $n$ 번째 미세 홀 가공시 누적된 전극 소모량은  $\sum_1^n w_n$ 으로 나타낼 수 있다.

전극 소모량 예측 모델을 결정하는 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 전극과 공작물의 재질과 두께, 갭 전압(Gap voltage)과 전류 등 가공조건에 따라서 변화하게 된다. 최대 전극 소모량 상수  $\alpha$ 가 커질수록 전극 소모량이 수렴하는 크기가 커지고, 형상 상수  $\beta$ 가 커질수록 전극 소모량 모델은 더 빠르게 일정 수준으로 수렴하게 된다. Fig. 5는  $\phi 1.0$  전극을 이용하여 관통 깊이를 5t와 10t로 변화 시켰을 때 전극 소모량 모델의 변화를 보여준다. 최대 전극 소모량 상수  $\alpha$ 는 관통깊이가 2배로 증가함에 따라 2.15713에서 4.46397로 약 2배 증가함을 확인할 수 있고, 형상 상수  $\beta$ 는 1.72732에서 1.07842로 변화하며 최대 전극 소모량과 가

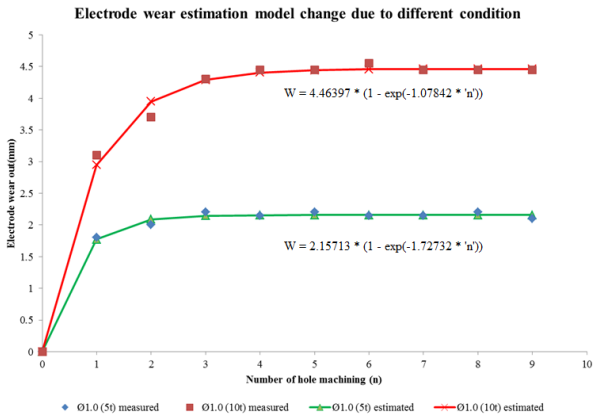


Fig. 5 The estimation factor change due to different condition

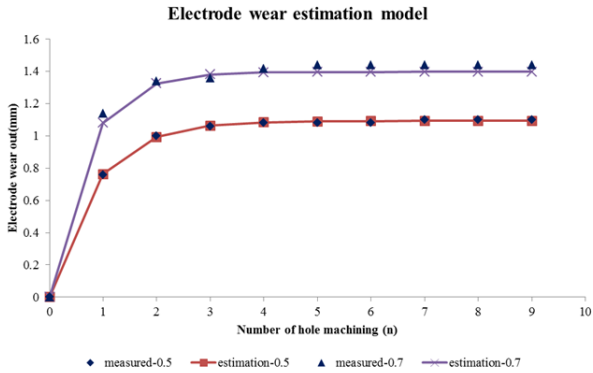


Fig. 6 The estimation model of electrode wear out

공 깊이에 따른 변화가 있는 것으로 추정 된다.

전극 소모량 예측모델은 5회 가공 실험의 전극 소모량 평균 값에 대하여 상용 통계 프로그램인 MINITAB<sup>(14)</sup>을 이용하여 식 (2), (3)과 같이 산출하였다. Fig. 6은 예측모델 선도와 실측 값의 오차가 거의 없음을 보여준다.

$$w_n^{\phi 0.5} = 1.09253 \times (1 - e^{(-1.19761 \times n)}) \quad (2)$$

$$w_n^{\phi 0.7} = 1.42712 \times (1 - e^{(-1.54673 \times n)}) \quad (3)$$

### 3.2 실시간 전극 소모량 예측 방법

방전 드릴시 동일한 방전 조건에서도 전극 소모량의 수렴값의 차이가 발생하게 된다. 이러한 이유는 방전 가공 시 주변 습도나 온도, 방전시의 전해부식 등에 의한 것으로 예측 된다. 그러나 전극 소모량 모델의 형상은 큰 변동이 없다는 것을 확인할 수 있는데, Fig. 7과 Fig. 8은 동일한 방전 조건에서 가공된 두가지 경우의 전극 소모량 차이를 전극 소모량 모델의 선형 이동을 이용하여 조정한 결과를 보여준다. 두 상수값의 변화 없이 예측모델의 함수에 선형이동 요소만을 추가 하는 것으로

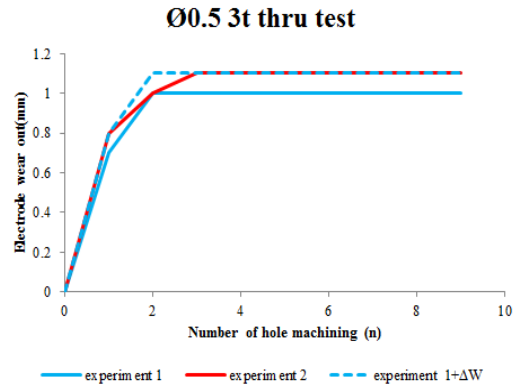


Fig. 7 The linear transformation of electrode wear estimation model(Ø0.5)

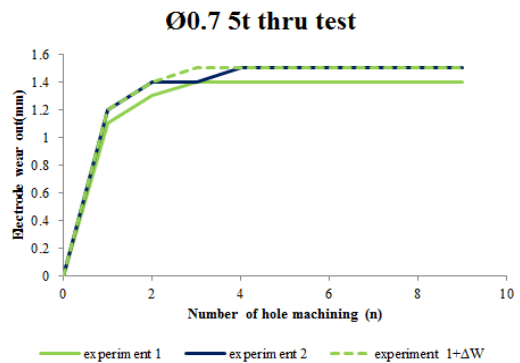


Fig. 8 The linear transformation of electrode wear estimation model(Ø0.7)

두 번째 홀 가공 이후의 더욱 정밀한 전극 소모량 예측을 할 수 있다.

식 (4)는 전극 소모량 실시간 예측 방법을 나타낸다.

$$\begin{aligned} w_{DB} &= \alpha(1 - e^{-n\beta}) \\ w_{realtime} &= \alpha(1 - e^{-n\beta}) + \Delta W \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\Delta w$ 는 첫 번째 홀 가공 후 측정된 소모량 예측모델과 실측된 전극 소모량의 오차값이다.

### 3.3 예측값 비교

Table 4, 5는 추가적인 3회 실험에 대한 전극 소모량 예측모델과 전극 소모량 실시간 예측 방법의 두가지 모델을 적용하여 예측한 전극 소모량을 보여준다.

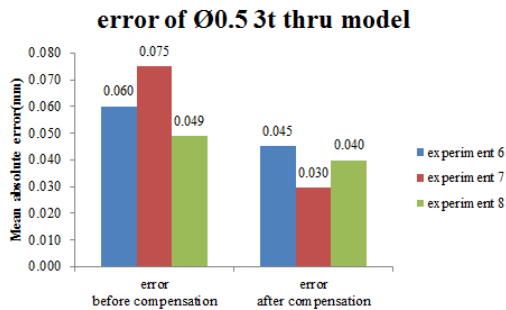
예측 방법의 정확성 판단을 위해 평균 절대값 오차(mean absolute error, MAE)를 구하여 비교하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 예측모델을 선형 이동한 보정된 실시간 예측모델을 적용하

**Table 4 The comparison of measured data and compensated electrode wear model Ø0.5 with 3t workpiece (mm)**

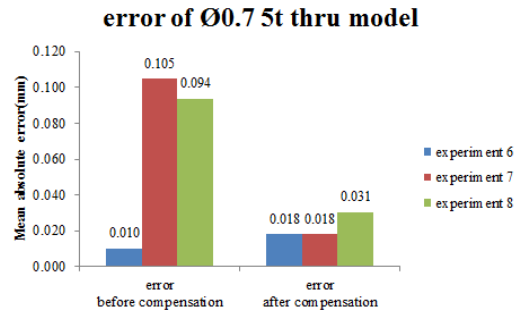
no.	base model	wear amount of experiment 6				wear amount of experiment 7				wear amount of experiment 8			
		measured	error before compensation	compensated	error after compensation	measured	error before compensation	compensated	error after compensation	measured	error before compensation	compensated	error after compensation
1	0.763	0.8	0.037	-	-	0.7	0.063	-	-	0.8	0.037	-	-
2	0.993	1	0.007	1.030	0.030	1	0.007	0.930	0.070	1	0.007	1.030	0.030
3	1.062	1.1	0.038	1.100	0.000	1	0.062	1.000	0.000	1.1	0.038	1.100	0.000
4	1.083	1.1	0.017	1.121	0.021	1	0.083	1.021	0.021	1.1	0.017	1.121	0.021
5	1.090	1.1	0.010	1.127	0.027	1	0.090	1.027	0.027	1.1	0.010	1.127	0.027
6	1.092	1.2	0.108	1.129	0.071	1	0.092	1.029	0.029	1.1	0.008	1.129	0.029
7	1.092	1.2	0.108	1.130	0.070	1	0.092	1.030	0.030	1.2	0.108	1.130	0.070
8	1.092	1.2	0.108	1.130	0.070	1	0.092	1.030	0.030	1.2	0.108	1.130	0.070
9	1.093	1.2	0.107	1.130	0.070	1	0.093	1.030	0.030	1.2	0.107	1.130	0.070

**Table 5 The comparison of measured data and compensated electrode wear model Ø0.7 with 5t workpiece (mm)**

no.	base model	wear amount of experiment 6				wear amount of experiment 7				wear amount of experiment 8			
		measured	error before compensation	compensated	error after compensation	measured	error before compensation	compensated	error after compensation	measured	error before compensation	compensated	error after compensation
1	1.079	1.1	0.021	-	-	1.2	0.121	-	-	1.2	0.121	-	-
2	1.324	1.3	0.024	1.345	0.045	1.4	0.076	1.445	0.045	1.4	0.076	1.445	0.045
3	1.380	1.4	0.020	1.401	0.001	1.5	0.120	1.501	0.001	1.4	0.020	1.501	0.101
4	1.393	1.4	0.007	1.414	0.014	1.5	0.107	1.514	0.014	1.5	0.107	1.514	0.014
5	1.396	1.4	0.004	1.416	0.016	1.5	0.104	1.516	0.016	1.5	0.104	1.516	0.016
6	1.396	1.4	0.004	1.417	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017
7	1.396	1.4	0.004	1.417	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017
8	1.396	1.4	0.004	1.417	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017
9	1.396	1.4	0.004	1.417	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017	1.5	0.104	1.517	0.017



**Fig. 9 The mean absolute error change due to compensation (Ø0.5)**



**Fig. 10 The mean absolute error change due to compensation (Ø0.7)**

기 전과 후의 평균 절대값 오차의 변화를 보여준다. Ø0.5 실험의 경우 최대 평균 절대값 오차량이 0.075mm에서 0.030mm

로, Ø0.7 실험의 경우 최대 평균 절대값 오차량이 0.105mm에서 0.018mm로 감소한 것을 확인 할 수 있다.

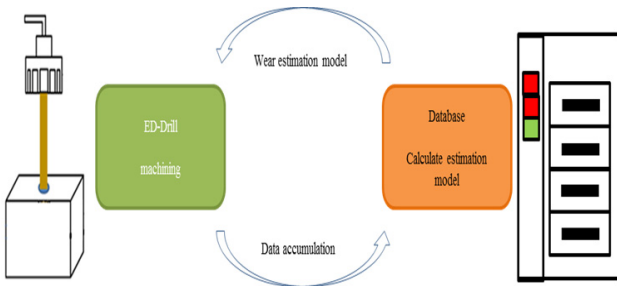


Fig. 11 ED-drill system for using estimation model

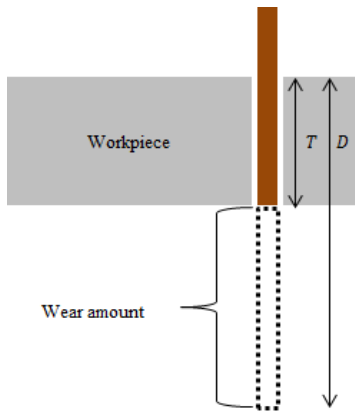


Fig. 12 The calculation of electrode transfer distance

### 3.4 실시간 전극 소모량 보정 시스템

임의의 조건에서 전극 소모량을 결정하는 두가지 상수(최대 전극 소모량 상수  $\alpha$ , 형상 상수  $\beta$ )만을 DB상에 저장한 후 가공 시 이를 불러오고 첫 홀 가공 후의 전극 소모량을 측정하여 보정하는 방법으로 실제 공정의 적용이 가능하다.

Fig. 11은 전극의 직경과 소재의 재질, 두께, 방전 조건들에 대하여 전극 소모량 예측모델을 데이터베이스화 할 수 있음을 보여준다.

Fig. 12는 n번째 미세 홀의 방전 드릴 시 전극 이송거리(D)와 n번째 예측된 전극 소모량( $w_n$ ), 공작물의 두께(T)의 관계를 보여준다. 관통에 필요한 방전축 이송거리(D)는 식 (5)을 이용하여 산출 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= D - W_n \\ D &= T + \{ \alpha(1 - e^{-n\beta}) + \Delta w \} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 전극 여유길이가 관통에 필요한 방전축 이송거리를 충족시키지 못하는 경우, 전극 교환이 필요함을 확인 할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 방전 드릴링 시 전극 소모량이 가공횟수의 증가에 따라 일정하게 수렴한다는 점에 착안하여 전극 소모량 예측 모델을 제시하였다.

- (1) 실험을 통하여 처음 3~4회 이후의 전극의 소모량은 일정 수준으로 수렴하는 것을 확인 하였고, 이를 지수함수 형태의 기본 식으로 정의 하였다. 보다 정밀한 예측을 위하여 선형이동요소를 추가하여 정밀한 예측을 위한 방법을 제시 하였다.
- (2) 전극 소모량 예측모델은 수렴하는 전극 소모량의 크기를 결정하는 상수(scale factor,  $\alpha$ )와 곡선의 형태를 결정하는 상수(shape factor,  $\beta$ )로 구성된다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 값을 데이터 베이스 화 하고, 전극 소모량을 고려한 방전축 이송거리를 산출 하여 실제 공정에 적용하는 방법을 제시하였다.
- (3) 본 연구에서 제시한 실시간 전극 소모량 예측 방법을 실험 을 통하여 검증 하였고, 실험결과, 미세한 오차( $\leq 0.05$ ) 내 에서 정확하게 예측할 수 있음을 확인 하였다.

본 연구 결과는 전극 소모량의 정확한 예측을 통하여 가공 시간 단축과 전극 교환시기의 정확한 예측을 통한 생산성 향상에 이바지할 수 있을 것이라 판단된다. 추후 최대 전극 소모량 상수  $\alpha$ , 형상 상수  $\beta$ 를 실시간 추정하는 전극 소모량 예측모델에 관한 연구와 마이크로 단위의 전극 소모량 예측을 통한 마이크로 블라인드 홀 가공에 관한 연구가 있을 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 첨단의료기기사업본부-신기술융합형성장동력사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: 2012K001487).

## References

- (1) Jawaid, A., Che-haron, C. H., and Abdullah, A., 1999, "Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti-6246," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.92/93, pp. 329~334.
- (2) Maeng, H. Y., Park, K., and Shin, S. H., 2006, "Improvement of electro discharge machining process using side flushing devices," *Trans. of Korean Soc. of Mach. Tool Eng.*, Vol. 15, No. 1, pp. 23~31.
- (3) Park, M. S., Chung, D. K., Lee, K. H., and Chu, C.

- N., 2011, "Micro hole machining by EDM using insulated tool combined with ultrasonic vibration of dielectric fluid," *Trans. of Korean Soc. of Mach. Tool Eng.*, Vol. 20, No. 2, pp. 180~186.
- (4) Oh, S. H., 2003, "Machining technic and researching trend of hard machining material," *J. of KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 25~31.
- (5) Snoeys, R., Staelens, F., and Dekeyser, W., 1986, "Current trends in non-conventional material removal processes," *Annals of the CIRP*, Vol. 35, pp. 467~480.
- (6) Masuzawa, T., 2000, "State of the art micromachining," *Annals of the CIRP*, Vol. 49, pp. 473~488.
- (7) Yeo, S. H., and Tan, L. K., 1999, "Effects of ultrasonic vibrations in micro-electro-discharge machining of microholes," *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9, No 4 pp. 345~352.
- (8) Masuzawa, T., Cui, X., and Taniguchi, N., 1992, "Improved Jet Flushing for EDM," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 239~242
- (9) Koch, O., Ehrfeld, W. Michel, F., and Gruber, H. P., 2001, "Recent Progress in Micro-Electro Discharge Machining -Part 1 : Technology," *Proceedings of ISEM*, Vol. XIII, pp. 737~745
- (10) Naotake, M., Masayuki, S., Masanori, F., Nagao, S., and Akira, K., 1995, "Electrode Wear Process in Electrical Discharge Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 165~168.
- (11) Jeong, Y. H., and Min, B. K., 2007, "Geometry prediction of EDM-drilled holes and tool electrode shapes of micro-EDM process using simulation," *J. of Mach. Tools & Manu.*, Vol. 47 No.12-13, pp. 1817~1826.
- (12) Kung, K., Tsong, J., and Chiang, K., 2009, "Material removal rate and electrode wear ratio study on the powder mixed electrical discharge machining of cobalt-bond tungsten carbide," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 40 No.1-2, pp. 95~104.
- (13) Pham, D. T., Ivanov, A., Bigot, S., Popov, K., and Dimov, S., 2007, "An Investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 33, pp. 103~109.
- (14) Minitab, <<http://www.minitab.com>>