

## 방전가공 시간과 품질 예측을 위한 반응표면법과 방전에너지법 비교

정현제<sup>a</sup>, 변재현<sup>a</sup>, 청더준<sup>a</sup>, 오영진<sup>a</sup>, 김수진<sup>a\*</sup>**The Comparison of Response Surface and Discharge Energy Methods in Predicting MRR and Roughness of Sink EDM**Hyun-Je Jeong<sup>a</sup>, Jai-Hyun Byun<sup>a</sup>, De-Jun Cheng<sup>a</sup>, Young-Jin Oh<sup>a</sup>, Su-Jin Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University,  
501, Jinju-daero, Jinju, Gyeongnam-do, 52828, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*Received 17 June 2017  
Revised 28 September 2017  
Accepted 29 September 2017*Keywords:*Discharge energy  
HP4MA  
Material removal rate  
Response surface methodology  
Sink EDM  
Surface roughness**ABSTRACT**

Material removal rate (MRR) and surface roughness (Ra) of sink electric discharge machining (EDM) were investigated using experimental design and discharge energy method. This study is focused on the effects of the peak current, on time, and off time, during the discharging of the HP4MA material. Mathematical models were developed for the prediction of the Ra and MRR based on the response surface methodology (RSM). was proposed using the discharge energy method that was compared to the RSM model and the experimental results. The results indicated that both models can be used to predict the MRR and Ra of the EDM accurately.

**1. 서론**

지금까지 흑연을 이용한 HP4MA 방전가공의 소재제거율(material removal rate)과 표면거칠기에 관한 연구로 반응표면법(response surface methodology)과 방전에너지법(discharge energy methodology)이 있었다.

반응표면은 계획된 실험 데이터를 분석해 실험식을 개발 한 후 이에 따른 소재제거율과 표면거칠기에 관한 연구를 말한다<sup>1-4</sup>. 방전에너지 연구방법은 전류(I), 전압(V), 방전지속시간(t)을 이용한 방법이다. 이는 최소 자승법을 이용하여 방전에너지에 따른 실험식을 개발하여 그에 따른 소재제거율과 표면거칠기에 관한 연구를

말한다<sup>5-7</sup>. 그런데 현재까지 두 연구방법에 대한 비교 분석은 이루어지지 않고 있다.

일반적으로 기업에서는 정삭 가공시 미삭된 부분에 흑연전극을 이용한 방전가공을 이용한다.

방전가공은 주로 사출금형 소재인 HP1A (KP1), HP4A (KP4), HP4MA (KP4M)에 많이 사용된다. 그런데 흑연전극으로 HP4MA를 방전할 때 방전조건이 생산성과 품질에 미치는 영향에 관한 연구는 부족했다.

본 연구에서는 박스-벤켄 디자인(box-behnken desgin)으로 설계된 실험 조건으로 HP4MA를 정삭방전 해 소재제거율과 표면거칠기 데이터를 얻고, 반응표면과 방전에너지 방법으로 비교

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636

Fax: +82-55-772-1577

E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

분석을 하여 생산성과 품질예측을 개선하는 방안을 알아보고자 한다.

## 2. 실험 방법 및 결과

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 실제 기업에서 사용 중인 대한방전의 TURBO 300 CNC장비로 위 장비를 운용하는 작업자가 정삭 방전가공 실험을 하였다. 방전가공이 완료된 시편의 표면거칠기는 휴대용 표면조도 측정기(Mitutoyo사 SJ-210P)를 하이트게이지(height gauge)에 부착하고 바닥면의 수평을 맞춘 후 측정 하였다. 시편의 질량을 측정하기 위해 사용한 전자식 지시저울(CAS사 CUW 420H)의 분해능은 0.01 g이고 측정범위는 0.4~420 g 이다.

### 2.2 실험 방법

15개의 금형강(HP4MA)을 10 mm × 10 mm 크기의 흑연전극(graphite)으로 깊이 0.1 mm만큼 정삭방전 하였다. 금형강의 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다. 정삭 방전가공 시 방전조건에 따라 표면거칠기와 소재제거율 속도의 차이가 발생한다. 그러므로 일반적인 정삭방전 조건의 최대 최소 범위를 설정하여 Table 2와 같이 설정하고 그에 따른 소재제거율과 표면거칠기를 실험계획법 박스-벤켄 디자인을 이용하여 15번의 실험으로 모델링 하였다.

방전이 완료된 시편을 휴대용 표면조도측정기를 이용하여 각 시편의 가공면에 무작위로 6번 반복 측정을 3회에 걸쳐 측정한 값의 평균을 표면거칠기로 사용하였다. 전자식 지시저울로 가공 전 후 시편의 무게를 측정 하여 방전시간과 금형강의 밀도로 나누어 소재제거율을 얻었다<sup>2)</sup>.

### 2.3 실험 결과

박스-벤켄 디자인에 의한 15가지 방전조건과 이에 따른 표면거칠기와 소재제거율 측정결과를 Table 3에 나타내었다. Fig. 2는 10번 실험(run sequence)와 14번 실험으로 방전 휴지시간(off time)이 커지고 지속시간(on time)과 피크전류(peak current)는 고정되어 있는 조건이다. 휴지시간이 3배 커짐에 따라 표면거칠기는 5% 거칠어지고 소재제거율은 19% 감소한다. Fig. 3은 1번과 12번 실험으로 지속시간이 커지고 휴지시간과 피크전류는 고정되어 있는 조건이다. 지속시간이 5배 커짐에 따라 표면거칠기는 57% 거칠어지고 소재제거율은 113% 증가한다. Fig. 4는 3번과 10번 실험으로 피크전류가 커지고 지속시간과 휴지시간은 고정되어 있는 조건이다. 피크전류가 5배 커짐에 따라 표면거칠기는 172% 거칠어지고 소재제거율은 7,750% 증가한다.

Table 1 Composition of HP4MA workpiece

Contents	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Percentage	0.26~0.37	0.15~0.35	0.80~1.00	≤0.025	≤0.020	0.30~0.55	1.65~2.10	0.40~0.50

Table 2 EDM condition range

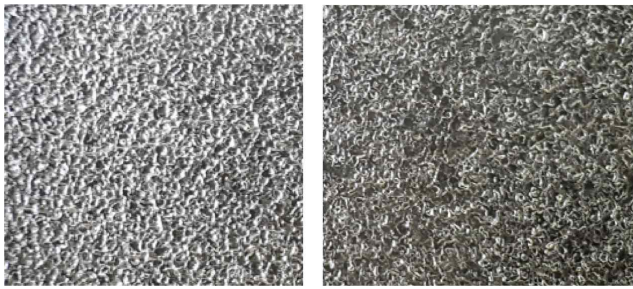
	Min	Max
IP (A)	1	5
On time (μs)	10	50
Off time (μs)	10	30

Table 3 Experiment condition and result

Run sequence	IP (A)	On time (μs)	Off time (μs)	Ra (μm)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)
1	5	10	20	2.33	3.26
2	3	10	30	1.74	0.99
3	1	30	10	1.13	0.08
4	1	50	20	1.20	0.07
5	3	50	30	1.98	0.87
6	1	30	30	1.12	0.03
7	3	30	20	1.99	0.99
8	3	10	10	1.80	1.10
9	3	30	20	1.99	1.28
10	5	30	10	3.08	6.44
11	3	50	10	1.93	0.75
12	5	50	20	3.66	6.92
13	3	30	20	1.98	1.27
14	5	30	30	3.25	5.24
15	1	10	20	1.16	0.05

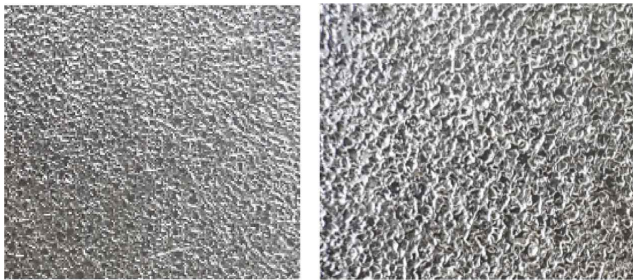


Fig. 1 Turbo CNC 300 workpiece and graphite



(a)  $t_{off}=10 \mu s$   $Ra=3.08 \mu m$  (b)  $t_{off}=30 \mu s$   $Ra=3.25 \mu m$

Fig. 2 Off time effect to roughness



(a)  $t_{on}=10 \mu s$   $Ra=2.33 \mu m$  (b)  $t_{on}=50 \mu s$   $Ra=3.66 \mu m$

Fig. 3 On time effect to roughness



(a)  $I=1 A$   $Ra=1.13 \mu m$  (b)  $I=5 A$   $Ra=3.08 \mu m$

Fig. 4 Peak current effect to roughness

피크전류와 지속시간이 증가함에 따라 표면조도가 거칠어지고 소재제거율도 증가하며 그 중 피크전류가 미치는 영향이 가장 컸다. 휴지시간이 증가함에 따라 표면조도는 거의 동일하지만 소재제거율은 조금 감소한다.

### 3. 반응표면법과 방전에너지법 비교 분석

#### 3.1 반응표면법

방전가공의 생산성과 품질예측의 관한 실험계획법 연구에서 박스-벤켄 디자인으로 실험 한 결과를 모델링 하는 방법으로 반응표면법을 많이 이용한다<sup>1-4)</sup>.

미니탭(Minitab)을 이용해 실험결과를 반응표면법으로 나타내면 Fig. 5와 같이 피크전류가 표면거칠기와 소재제거율에 가장 큰

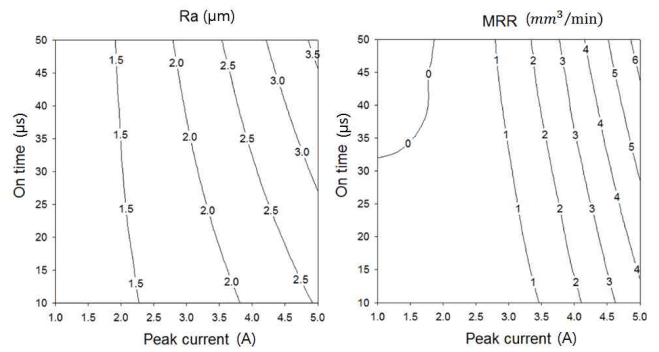


Fig. 5 Response surface graph

영향을 미치고 있다. 소재제거율의 반응표면 그래프에서는 피크전류 2 A 이하 지속시간 30  $\mu s$  이상에서 소재제거율이 0보다 작은 오류가 있다. 반응표면법에서 피크전류(IP)와 지속시간(IN = On time, IP = Off time)에 따른 표면거칠기와 소재제거율 관계는 식 (1), (2)와 같이 실험상수 6개로 표현된다.

$$MRR(mm^3/min) = 2.282 - 1.880IP - 0.0482IN + 0.4093IP * IP + 0.02282IP * IN \quad (1)$$

$$Ra(\mu m) = 1.281 - 0.059IP - 0.01327IN + 0.00176IP * IP + 0.0499IP * IN + 0.00805IP * IN \quad (2)$$

#### 3.2 방전에너지법

방전가공의 생산성과 품질을 방전에너지로 예측하려는 연구가 많이 있었다. 방전에너지법은 전압 V, 전류 I, 방전지속시간 ton의 곱인 방전에너지를 이용하여 표면거칠기와 소재제거율을 모델링하는 방법이다<sup>6,7)</sup>.

본 연구에서는 방전에너지에 기반 한 표면거칠기와 소재제거율 실험식 (3), (4)를 제안한다<sup>6,7)</sup>.

$$R_a = cVT^a t_{on}^b \quad (3)$$

$$MRR = eVT^d \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (4)$$

표면거칠기 실험상수 3개, 소재제거율 실험상수 2개로 모델링 하였다. 실험식과 측정값의 오차를 최소화 하는 실험상수를 최소자승법으로 계산해  $cV = 0.77$ ,  $a = 0.53$ ,  $b = 0.11$ ,  $eV = 0.037$ ,  $d = 3.46$ 를 얻었다. 전압은 고정 값 으로 실험상수에 포함된다. Fig. 6는 방전에너지법으로 얻은 피크전류와 지속시간에 따른 표면거칠기와 소재제거율 그래프이다. 피크전류와 지속시간이 클 때 Fig. 5 반응표면은 표면거칠기가 3  $\mu m$  이상인 반면 Fig. 6 에너지 방법은 3  $\mu m$  미만이다.

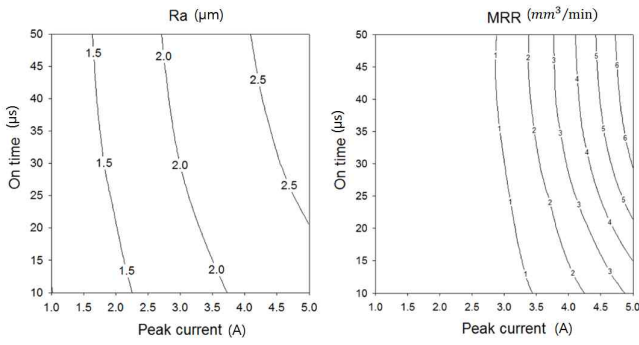


Fig. 6 Energy model graph

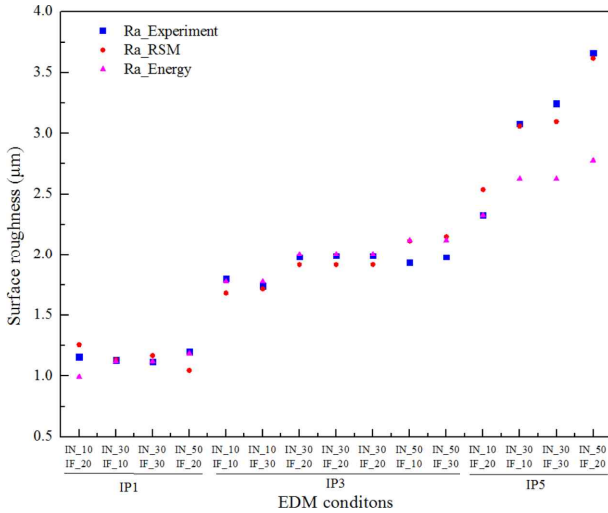


Fig. 7 Roughness of experiment, RSM, energy model

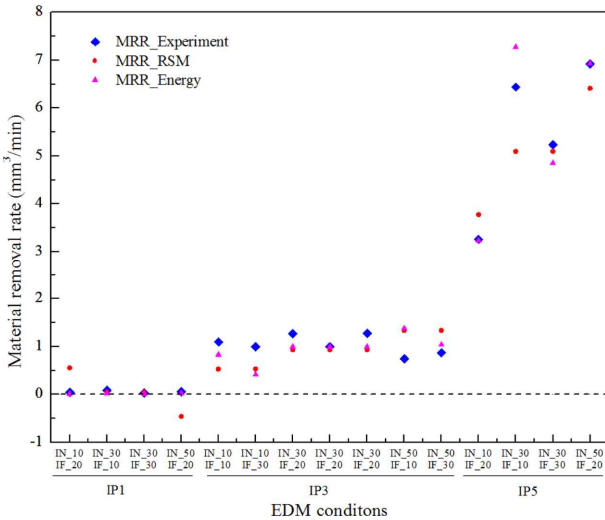


Fig. 8 MMR of experiment, RSM, energy model

### 3.3 비교 분석

반응표면법과 방전에너지법으로 모델링한 표면거칠기와 소재제거율을 실험값과 비교하면 Fig. 7, 8과 같다. Fig. 7 표면거칠기는 전체적으로 두 모델과 실험값이 일치하지만 피크전류 5 A, 지속시간

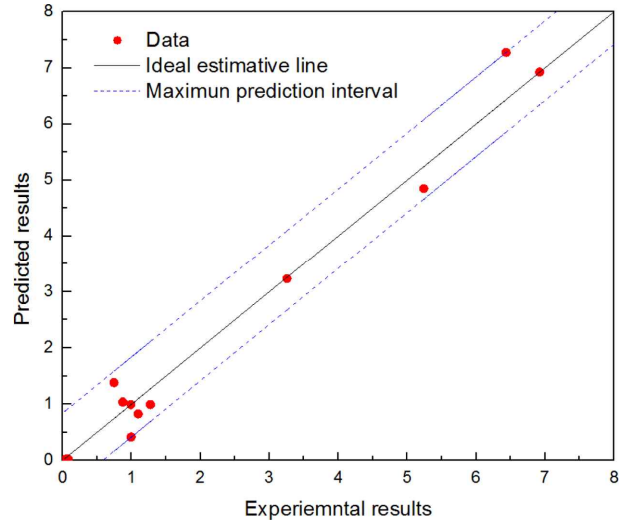


Fig. 9 Error of MRR

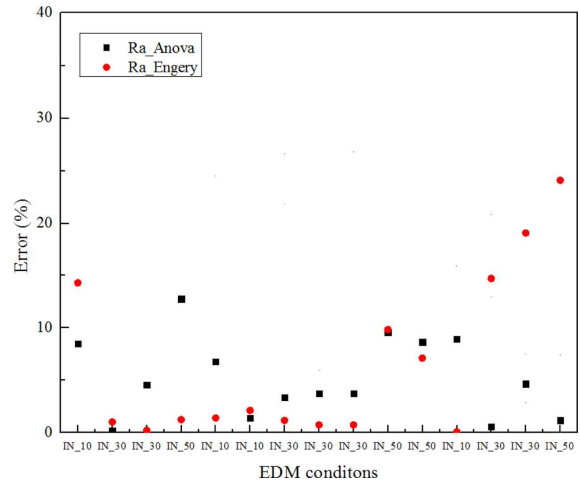


Fig. 10 Error of Ra

간 30 μs 이상에서는 방전에너지법의 모델 값이 실험값보다 작았다. Fig. 8 소재제거율 역시 전체적으로 두 모델과 실험값이 일치하지만 소재제거율이 0에 가까운 피크전류 1 A에서는 지속시간 10 μs, 50 μs 일 때 반응표면법의 모델 값이 비정상적이므로 이 후 정확도를 비교 할 때는 두 데이터를 제외하였다.

모델의 오차를 나타낸 Fig. 9에서 소재제거율 모델의 오차의 범위는 최대 0.84 mm³/min, 최소 0.53 mm³/min 내로 나타났다. Fig. 10에서 반응표면법의 최대오차 13%, 방전에너지법의 최대오차 23%로 나타났다.

이것은 Table 4와 같이 소재제거율 측정 데이터 편차가 표면거칠기 측정 데이터 편차에 비해 크기 때문으로 판단된다. 소재제거율에서 반응표면법의 오차는 34%로 방전에너지법의 오차 33%와 1%의 오차율을 나타내었으며, 표면거칠기에서도 반응표면법의 오차는 5.2%로 방전에너지법의 오차 6.5%와 1.3%의 오차율을 나타

**Table 4 Comparison of company vs. suggested condition**

	IP (A)	On time (μs)	Off time (μs)	Ra (μm)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)
Company	3	30	20	1.99±0.004	1.18±0.16
Suggested	5	10	20	2.29±0.034	2.34±0.44
Compare	-	-	-	15%	98%

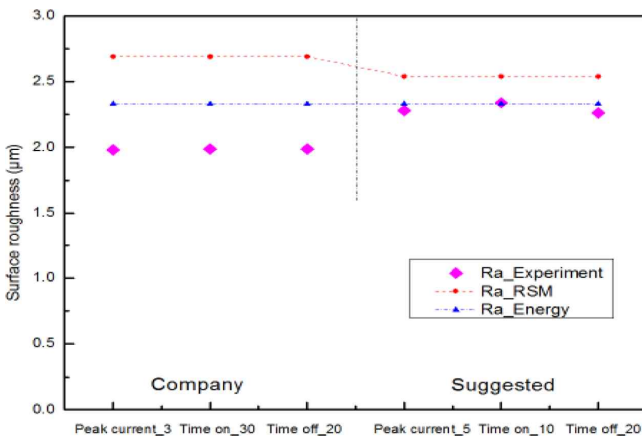


(a) Company Ra = 1.99 μm (b) Suggested Ra = 2.29

**Fig. 11 Comparison of company vs. suggested condition**

**Table 5 Prediction error of verification experiment**

	Exp.	Predict		Error(%)	
		RSM	Energy	RSM	Energy
Ra (μm)	2.29	2.54	2.33	11	2
MRR (mm <sup>3</sup> /min)	2.34	3.36	3.23	37	31



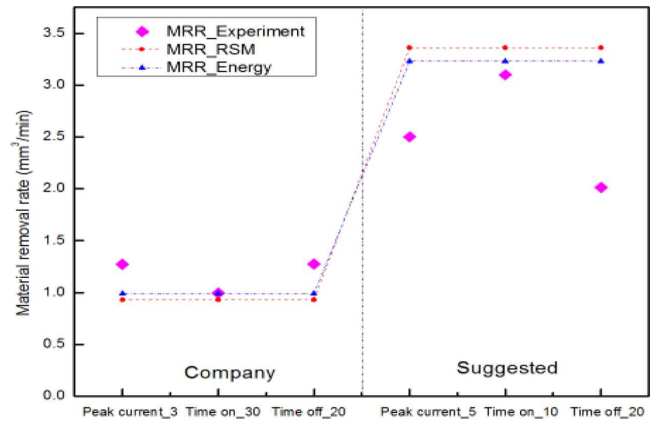
**Fig. 12 Roughness of company vs. suggested condition**

내었다.

6개의 상수를 가진 반응표면법에 비해 3개의 상수를 가진 방전 에너지법은 실험식의 모양이 간단하면서 반응표면법과 거의 동일한 표면거칠기와 소재제거율의 모델 오차를 가진다.

### 3.4 추천조건 검증 실험

기업의 방전조건은 Table 4와 같이 피크전류 3 A, 지속시간 30 μs이고 방전실험 표면 Fig. 11(a)의 거칠기는 1.99±0.004 μm이고



**Fig. 13 MRR of company vs. suggested condition**

소재제거율은 1.18±0.16 mm<sup>3</sup>/min이다.

반응표면법에서는 기업에서 사용하는 정상방전조건에서의 표면 거칠기와 목표 표면거칠기는 2 μm로 같게 하고 목표 소재제거율만 기업의 소재제거율보다 높은 3 mm<sup>3</sup>/min으로 설정 하고, 중요도를 표면거칠기 1, 소재제거율 2로 설정한 후 추천조건을 미니탐으로 얻었다.

방전에너지법에서는 식 (5)와 같이 새로운 조건에서의 표면조도와 소재제거율을 각각 기업조건에서의 값으로 나누어 무차원화 하고, 무차원 소재제거율의 두 배에서 무차원 표면거칠기를 뺀 값을 극대화하는 방전조건을 얻었다.

$$Max\left(-\frac{Ra}{Ra_t} + 2\frac{MRR}{MRR_t}\right) \rightarrow I, t_{on} \quad (5)$$

반응표면법과 방전에너지법의 추천조건은 피크전류 5 A, 방전 지속시간 10 μs동일했다. Table 4와같이 추천조건으로 검증실험 하여 측정된 표면 Fig. 11(b)의 거칠기는 2.29±0.034 μm 소재제거율은 2.34±0.44 mm<sup>3</sup>/min이다. Fig. 12은 기업조건과 추천조건에서 각각 3회 실험한 표면거칠기로 예측과 측정 모두 변화량이 작으면서 Fig. 13 소재제거율은 추천조건에서 크게 증가하였다. 기업의 방전조건에 비해 추천조건 표면거칠기가 15% 거칠어지는 대신 소재제거율은 98%가 증가하였다. 즉 표면거칠기의 변화를 최소화 하면서 생산성을 67% 증가하였다.

Table 5은 검증실험 측정데이터와 두 모델의 예측 값을 비교한 것 이다. Fig. 12은 표면거칠기 측정데이터와 모델의 예측 값을 Fig. 13는 소재제거율 측정데이터와 예측 값을 기업조건과 검증실험에 이용된 추천조건에서 비교하고 있다. Table 5와 Fig. 12의 표면거칠기 검증실험 결과 반응표면법의 예측 오차는 11%이고 방전에너지법의 예측 오차는 2%로 두 예측방법의 차이는 실험 데이터의 표준편차 보다 커서 방전에너지법의 예측결과가 조금 더 정확했다. Table 5와 Fig. 13의 소재제거율 검증실험 결과 반응표면법

의 예측 오차는 37%이고 방전에너지법의 예측 오차는 31%로 표준편차 보다 작아 차이가 없었다.

#### 4. 결론

이 연구는 흑연전극으로 HP4MA 금형강을 방전가공할 때 방전 조건이 생산성과 품질에 미치는 영향을 반응표면법과 방전에너지법으로 비교분석하고 추천조건으로 생산성을 향상시켰다.

6개의 상수를 가진 반응표면법에 비해 3개의 상수를 가진 방전 에너지법은 실험식의 모양이 간단하면서 반응표면법과 소재 제거율에서 1%, 표면거칠기에서 1.3%의 거의 동일한 모델 오차를 가진다.

기업의 방전조건대신 추천조건을 사용해 표면거칠기의 변화를 최소화 하면서 생산성이 67% 증가하였다.

검증실험 측정값을 반응표면법과 방전에너지법을 이용한 예측값과 비교한 결과 두 모델의 예측정확도 차이가 작았다.

또한, 정상 방전조건에서 예측모델을 개발하고 검증했기 때문에 방전범위와 적용가능 소재에 한계점이 있다.

#### 후 기

이 연구는 2017년도 산업핵심기술개발사업(과제번호 1004855)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### References

- [1] Salman, O. Z., Kayacan, M. C.. 2008, Evolutionary programming method for modeling the EDM parameters for roughness, J. of materials processing tech., 200:1-3 347-355.
- [2] Puertas, I., Luis, C. J., Álvarez, L.. 2004, Analysis of the influence of EDM parameters on surface quality, MRR and EW of WC-Co, J. of materials processing Tech., 153-154 1026-1032.
- [3] Habib, S. S.. 2009, Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach, Applied Mathematical Modelling, 33 4397-4407.
- [4] Ryu, C. W., Choi, S. D., Lee, S. K.. 2011, The effect of surface Roughness on Wire-cut Electric Discharge Machining of Discharge Energy in Aluminium Alloy 2024, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:6 714-719.
- [5] Sultan, T., Kumar, A., Gupta, R. D.. 2014, Material Removal Rate, Electrode Wear Rate, and Surface Roughness Evaluation in Die Sinking EDM with Hollow Tool through Response Surface Methodology, International Journal of Manufacturing Engineering, 16.
- [6] Rebelo, J. C., Dias, A. M., Kremer, D., Lebrun, J. L.. 1998, Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels, Journal of Materials Processing Technology, 84 90-96.
- [7] Gostimirovic, M., Kovac, P., Sekulic, M., Skoric, B.. 2012, Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM, Journal of Mechanical Science and Technology, 26 173-179.