

Taguchi법에 의한 방전가공의 공정변수 최적화

최만성[†]

[†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Optimization of Process Parameters for EDM using Taguchi Design

Man Sung Choi[†]

[†]School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

The method of electrical discharge machining (EDM), one of the processing methods based on non-traditional manufacturing procedures, is gaining increased popularity, since it does not require cutting tools and allows machining involving hard, brittle, thin and complex geometry. Modern ED machinery is capable of machining geometrically complex or hard material components, that are precise and difficult-to-machine such as heat treated tool steels, composites, super alloys, ceramics, etc. This paper reports the results of an experimental investigation by Taguchi method carried out to study the effects of machining parameters on material surface roughness in electric discharge machining of SM45C. The work material was ED machined with graphite and copper electrodes by varying the pulsed current, voltage and pulse time. Investigations indicate that the surface roughness is strongly depend on pulsed current.

Key Words : Discharge machining (EDM); SM45C; Taguchi method, Optimization

1. 서 론

방전가공은 비절삭가공으로 절삭공구를 사용하지 않고, 생산비용이 저렴한 가공법이다. 또한 이 가공법은 재료의 경도에 무관하게 가공할 수 있으며, 매우 복잡한 형상의 부품을 저렴한 방전전극을 사용하여 고정도의 부품을 가공할 수 있으므로 산업체에서 선호하는 가공법 중 하나이다[1-4]. 이 공정의 가장 중요한 장점은 고경도, 고취성, 고강도의 난삭재를 원하는 형태대로 가공할 수 있다는 것이다[5]. 방전가공기는 플라스틱 사출금형, 다이캐스팅, 반도체 장비제작 등을 생산하는 산업체에 주로 사용되는 기계로 이 분야에 필수 불가결한 장비로 보편화되어 있다. 아울러 재료과학의 응용 분야에 있어서는 우수한 기계적 성질과 열적인 특성, 만족할만한 전기전도율을 갖고 있는 금속재료, 복합재료 및 세라믹재료의 가공[6-10]에도 널리 이용

되고 있다. 방전가공기는 가공속도와 가공 정밀도가 매우 중요하고, 이러한 요소는 대개 가공 조건, 전극의 재질, 방전액 등에 영향을 받는다. 가공 조건이란 기계의 제어회로에 내장되어있는 기능 중 가공속도와 정밀도를 제어하는 요소를 포함하고 있다. 본 연구에서는 펄스전류, 펄스전압, 통전시간의 가공조건과 그래파이트 및 구리 전극을 사용하여 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보았다. 실험의 효율적인 결과도출을 위해 실험계획법 중의 하나인 Taguchi법을 사용하였다. Taguchi법[11-15]은 기계, 화학, 전기, 전자 등 산업전반에 걸쳐 생산공정의 공정조건을 최적화 하고 품질손실 비용을 줄일 수 있는 최적화 설계 기법이다. 따라서 방전가공기의 가공공정의 특성 치를 최적화시키고 생산성과 정밀도를 향상시키기 위해 직교배열에 의한 실험계획과 S/N비를 도출하고 분산분석(ANOVA)을 통해 가공변수의 유의성을 검증하였으며 특성치인 표면거칠기에 대한 최적 방전조건을 구하였다.

[†]E-mail : mschoi@koreatech.ac.kr

2. Taguchi법

가공공정에서 많은 가공변수들에 특성치가 영향을 받을 때 많은 실험을 수행하여야 한다. 또한 변수의 조합은 실험으로부터 얻어지는 분석결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 신중하게 선택되어야 한다. 다구찌 이전의 실험계획법에서는 총 변수조합(full factorial)에 대한 실험을 선택하였다. 이러한 방법은 수 많은 실험을 수행하여야 한다. 다구찌는 직교배열표를 이용하여 각 변수의 영향을 분석하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 따르면 총 변수조합에 비하여 현저히 감소된 실험만으로 각 변수의 영향을 확인할 수 있게 되었다. 또한 변수들을 현실적으로 제어가 가능한 제어변수와 제어가 어려운 잡음변수로 구분하여 최적 제어변수의 조합을 찾는 방법을 제안하였다. 이는 복잡한 통계 이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단하고자 하는 종래의 실험계획법에 비하여 훨씬 더 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강건설계의 기본적인 수단을 이루고 있다. 강건설계는 제품의 사용환경, 작업자의 숙련도, 소비자의 수준 등과 같은 잡음변수의 영향 하에서 생산 및 소비 비용이 최소화된 제품을 최단 시간에 시장에 공급 하는 것을 목적으로 한다. 다구찌법은 제품의 개발 초기 단계에서 각 설계변수의 영향을 신속하게 파악 하고 발생 가능한 문제를 예방하는 수단을 제공 하므로 강건설계의 유력한 수단이다. Taguchi 기법의 목적은 잡음에 강한 설계를 하는 것이다. 생산 현장은 재료의 다양함, 작업자의 부주의, 통제 불가능한 외부환경 등이 있다. 따라서 Taguchi 기법은 잡음의 영향을 최소화하고 제어가 가능한 영향력 이 강한 인자를 찾아내어 잡음의 영향력을 최소화 하는 강건설계(robust design)가 핵심이다. 이러한 강건설계에 필요한 기법이 S/N(signal and noise) 비이다. 망소특성은 음수 값을 갖지 않고 작을 수록 좋은 특성으로인 S/N는 다음과 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

망대특성(higher the better characteristics)은 음수 값을 갖지 않고 클수록 좋은 특성으로 S/N비는 다음 식으로 주어진다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (2)$$

망목특성(nominal the best)은 유한 목표 값이 최적이며 어느 쪽으로도 산포되어도 바람직하지 않은 특성

으로 S/N비는 다음과 같다.

$$SN = \log_{10} \frac{1}{n} \left[\frac{\bar{y}}{s} \right] \quad (3)$$

여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이고 n 은 실험의 횟수를 의미하며, s 는 표본표준편차이다.

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 재료는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였으며, 화학적인 조성과 기계적성질은 Table 1과 Table 2와 같다. Fig. 1은 실험에 사용된 방전가공기의 본체를 나타내었다. 실험에 앞서 방전가공에 필요한 시편 제작과 전극 제작을 하였다. 방전전극의 치수는 그래파이트(graphite)가 가로 10.5 mm 세로 9.5 mm이고, 구리(copper)가 Ø10 mm로 제작하였다. 시편준비로 SM 45 C 연강을 각 1개씩 두 개를 준비하였다. 준비된 시편과 전극을 이용하여 각 3가지 요인과 3 수준에 따른 표면거칠기를 측정하였다. Table 3은 실험에 사용된 장비와 측정기의 제원을 나타낸 것이다.

Table 4는 실험에 사용된 제어인자와 각 수준에 따른 가공조건을 나타내었다. 실험방법은 SM45C에 필스전류, 방전시간, 전압을 바꾸어가며 깊이 1 mm로 방전필스를 실시하였다. 각 인자의 수준은 3수준으로 총 9번

Table 1. Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
0.45	0.19	0.70	0.016	0.021	0.008	Bal

Table 2. Mechanical properties

Tensile strength (Mpa)	Bending strength (Mpa)	Elongation (%)
645	1780	17



Fig. 1. EDM set-up.

Table 3. Specification of experiment device

Name	Model	Co. Ltd
EDM M/C	JCE-50C	HWACHEON
Electronic Scale	HF-300GD	AND
Roughness Measurement Device	SURF 5000	MAHR

Table 4. Codes, parameters, and level values used for orthogonal array

Factors	Symbol	Parameter	Unit	Levels		
				1	2	3
Control factor	A	I (current)	A	5	9	13
	B	t (time)	μm	87	125	280
	C	U (voltage)	V	50	50	70
Noise	N ₁	Copper	-			
	N ₂	Graphite	-			

의 가공을 실시하고, 이를 반복한다. 전극은 그래파이트와 구리를 이용하였다. 한번 가공을 하고 가공이 끝나면 가공시간을 결과표에 작성 하였고, 이후 시편을 빼내고, 절삭유를 잘 빼낸 후 표면거칠기를 측정하였다. 여기서 원점을 매번 맞추는 것을 줄이기 위해 X축과 Y축을 고정시키기 위해 다른 시편을 이용해 표시를 해두었다. Z축은 매번 다른 시편을 이용해 표시를 해두었다. Z축은 매번 원점을 맞추어야 하는데 이유는 전극의 소모량으로 인해 1mm보다 더 적게 파이는 것을 대비하였다. 이런 방식으로 총 36번의 실험을 하고 총 36개의가공 결과물에 대해 표면 거칠기 측정기로 표면 거칠기를 측정하였다, 정밀도가 높은 저울을 이용하여 총 가공 후 시편의 질량을 측정하고, 피삭재 (SM45C)의 비중을 고려하여 단위시간당 가공된 양을 측정하였다. 이러한 측정값들을 통계적 기법을 이용하여 방전가공의 최적조건을 선정하였다. 실험 조건은 Table 4와 같다. 여기서 I는 방전전류, t_{on} 는 방전시간, V는 펄스전압을 나타낸다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 구리전극에 따른 표면거칠기

Table 4의 조건에 따라 구리전극을 사용하고 방전조건인 펄스전류, 방전시간, 방전전압을 변화 시켜 실험한 후 표면거칠기를 구하고, 그에 따른 S/N비를 구한 것이 Table 5이다. Table 5는 $L_9(3^3)$ 의 실험배치법에 의한 것으로 표면거칠기의 단위는 마이크로미터(μm)

Table 5. Experimental results for R_a and their corresponding S/N ratio of copper

Run No.	Inner array				Outer array		
	A	B	C	e	R ₁	R ₂	S/N
1	1	1	1	1	5.503	5.070	-14.47
2	1	2	2	2	6.397	4.236	-16.46
3	1	3	3	3	6.026	6.147	-15.69
4	2	1	2	3	5.629	3.094	-13.14
5	2	2	3	1	6.790	7.022	-16.79
6	2	3	1	2	6.039	6.765	-16.14
7	3	1	3	2	9.067	3.132	-16.63
8	3	2	1	3	8.788	7.824	-18.40
9	3	3	2	1	12.568	8.457	-20.60

Table 6. ANOVA analysis for roughness R_a of copper

Factor	df	SS	MS	F	P
A	2	19.20	9.60	5.37	0.157
B	2	13.59	6.80	3.80	0.208
C	2	0.29	0.15	0.08	0.925
Error	2	3.58	1.79		
Ttotal	8	36.67			

이다. Table 5의 자료에 의해 분산분석(ANOVA)을 하면 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 분산분석은 공정의 파라미터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 특성치에 미치는 유의성을 검정할 수 있다.

Table 6에서 P의 값을 살펴보면 방전전류가 대체로 유의하다. 즉 수준 간에 차이가 있다는 의미이다. 여기서 기여율 R^2 은 90.24%이고, 수정 R^2 은 60.9%로 나타났다. 따라서 실험결과가 적합한 것으로 보인다. P-값의 유의성이 큰 순서는 A, B, C 순서이다. Fig. 2는 그래파이트 전극의 표면거칠기에 각 요인의 수준에 대해 각 반응특성의 평균을 나타낸 것으로, 이 표에는 델타 통계량에 따른 주효과의 상대적 크기를 비교할 수 있는 순위를 나타내었다. 그림에서 볼 때 펄스전압의 평균적인 차이가 매우 크며, 방전전류와 방전시간의 순으로 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 Table 6의 P-값과 차이가 있다.

Fig. 3은 그래파이트전극의 표면거칠기에 대한 망소 특성치인 S/N 비의 반응 값을 나타낸 것이다. 방전전류의 델타 값은 3.19, 방전시간은 2.73, 그리고 고 펄스전압은 0.40으로 나타났다. 따라서 방전전류, 방전시간, 펄스전압의 순으로 표면거칠기에 큰 영향을 미침을

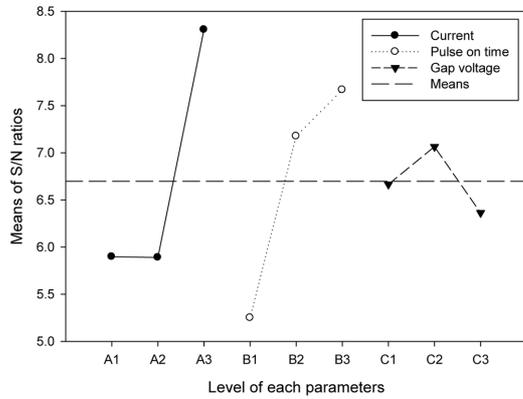


Fig. 2. Main effects plot for Means.

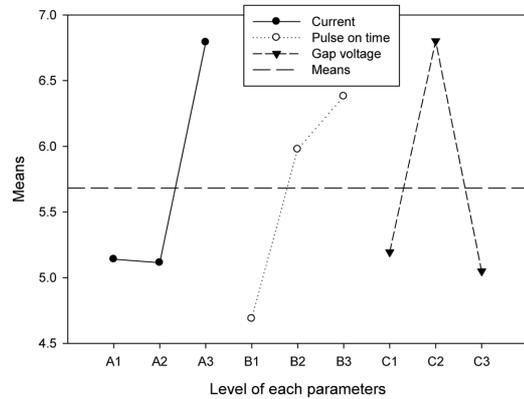


Fig. 4. Main effects plot for Means.

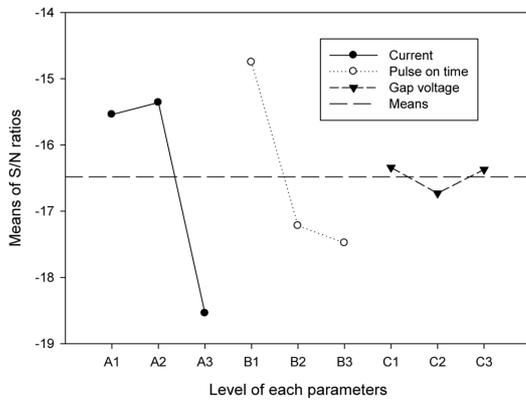


Fig. 3. Main effects plot for S/N ratios.

알 수 있다. 최적조건은 $A_2B_1C_1$ 이 된다.

4.2. 그래파이트 전극에 의한 표면거칠기

Table 5에 따라 그래파이트 전극으로 실험한 표면거칠기와 망소특성에 의한 S/N비는 Table 7과 같다. Table 7의 자료에 의해 S/N비에 대한 분산분석(ANOVA)을 하면 Table 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 분산분석은 공정의 파라미터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 표면거칠기에 미치는 유의성을 검정할 수 있다. Table 8에서 P의 값을 살펴보면 10% 유의수준에서 모든 가공변수가 유의하지 않다. 즉 수준 간에 차이가 없다는 의미이다. 여기서 기여율 R^2 은 69.98 %으로 나타났으므로 실험결과가 적합한 것으로 보인다. P-값의 유의성이 큰 순서는 C, B, A의 순서이다.

Fig. 4는 그래파이트 전극의 표면거칠기에 대한 각 요인의 수준에 대해 반응특성의 평균을 나타낸 것으로, 이 표에는 델타 통계량에 따른 주효과의 상대적 크기

Table 7. Experimental results for R_a and their corresponding S/N ratio of graphite

Run No.	Inner array				Outer array		
	A	B	C	e	R_1	R_2	S/N
1	1	1	1	1	4.852	5.455	-14.26
2	1	2	2	2	5.564	6.438	-15.59
3	1	3	3	3	4.774	3.758	-12.66
4	2	1	2	3	5.349	3.251	-12.92
5	2	2	3	1	6.855	5.686	-15.98
6	2	3	1	2	4.857	4.684	-13.57
7	3	1	3	2	5.695	3.526	-13.51
8	3	2	1	3	9.448	1.873	-16.66
9	3	3	2	1	8.765	11.446	-20.17

Table 8. ANOVA analysis for roughness R_a of graphite

Factor	df	SS	MS	F	P
A	2	13.688	6.844	0.97	0.507
B	2	10.334	5.167	0.73	0.577
C	2	7.275	3.638	0.52	0.659
Error	2	14.075	7.037		
Ttotal	8	45.372			

를 비교할 수 있는 순위를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 때 펄스전압의 평균 차이가 매우 크며, 방전전류와 방전시간의 순으로 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 Table 5의 P-값과는 차이가 있다.

Fig. 5는 그래파이트 전극의 표면거칠기에 대한 망소특성치인 S/N 비의 반응 값을 나타낸 것이다. 방전전류의 델타 값은 2.62, 방전 시간은 2.52, 그리고 펄스전

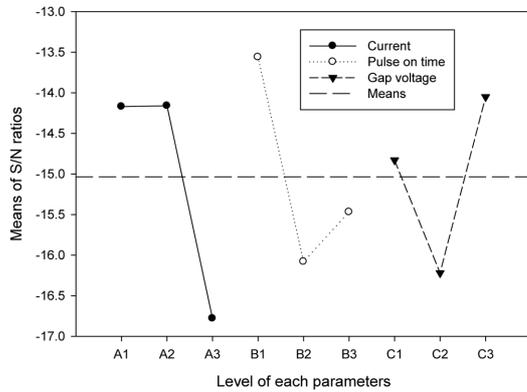


Fig. 5. Main effects plot for S/N ratios.

압은 2.17으로 나타났다. 따라서 방전전류, 방전시간, 펄스전압의 순으로 표면거칠기에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이것은 구리전극의 경향과 유사하다. 최적조건은 $A_2B_2C_2$ 가 된다.

4.3. 표면거칠기의 다중회귀분석

다중회귀분석(multiple regression analysis)은 두 개 이상의 예측변수와 한 개의 반응변수와의 관계를 직선으로 가정하는 회귀분석을 말한다. 회귀함수가 얼마나 유효한가는 분산분석표를 작성하여 t-검정을 실시하거나, 실험에서 얻어지는 총 편차의 제곱 합과 회귀제곱 합으로부터 구해지는 결정계수 R^2 을 이용하여 평가한다. 각 인자들로부터 표면거칠기를 예측하기 위한 방법으로 Table 4의 자료를 이용하여 구리전극을 이용한 방전가공에 있어서 가공변수와 표면거칠기의 다중회귀식을 구하였다.

$$\hat{R}_a = 2.17 + 1.20A + 1.21B - 0.15C \quad (4)$$

여기서 \hat{R}_a 는 표면거칠기의 추정식이다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 표면거칠기를 최소화하기 위해서는 방전전류 A를 높이면 된다. 펄스전압 C는 표면 거칠기와 음의 상관관계가 있으므로 큰 값일수록 표면거칠기가 좋아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 회귀분석을 한 결과 표면거칠기의 결정계수 R^2 의 값은 69%로 나타났는데 전체변동 중 회귀식에 의해 설명되는 부분이 꽤 높은 편이다. Table 4의 자료를 이용하여 그래파이트전극을 이용한 방전가공에 있어서 가공변수와 표면거칠기의 다중회귀식 식 (5)와 같이 구하였다.

$$\hat{R}_a = 2.48 + 0.83A + 0.85B - 0.07C \quad (5)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 표면거칠기를 최소화하기 위해서는 방전전류 A와 방전시간 B를 낮추면 된다. 펄스전압 C는 표면 거칠기와 음의 상관관계가 있으나 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그리고 회귀분석을 한 결과 표면거칠기의 결정계수 R^2 의 값은 32%로 나타났는데 전체변동 중 회귀식에 의해 설명되는 부분이 매우 낮은 편이다.

4. 결 론

본 연구에서는 Taguchi법을 이용하여 SM45C를 피삭재로 사용하여 방전가공을 하였다. 이에 따른 표면거칠기의 영향을 분석한 결과에 따르면, 표면 거칠기를 가장 양호하게 하는 공정변수의 조건은 구리전극과 그래파이트전극 모두 방전전류가 9A일 때 가장 양호하였다. 그리고 구리전극인 경우 펄스 전압은 표면거칠기에 미치는 영향이 거의 없었으나 그래파이트 전극인 경우에는 방전전류와 방전시간과 마찬가지로 표면거칠기에 영향을 크게 미쳤다. 향후 방전전극에 따른 다양한 공정변수가 표면 거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위해 마하라노 비스-다구찌 법을 적용하면 방전가공의 표면거칠기를 더욱 개선할 수 있을 것이라고 여겨진다.

참고문헌

1. G.W. Meetham, "High temperature materials-a general review," *J. Mater. Sci.*, 26, pp. 853-860, (1991).
2. E. Fitzer, "Future of carbon-carbon composites," *Carbon*, 25(2), pp. 163-190, (1987).
3. L.M. Manocha, O.P. Bahl, Y.K. Singh, "Fiber matrix interface in carbon-carbon composite-effect of surface morphology of carbon fibers," *Carbon*, 27(3), pp. 381-387, (1989).
4. W. Koenig, R. Komanduri, H.K. Tokanshoff, "Machining of hard metals," *Ann. CIRP*, 33(2), pp. 417-427, (1984).
5. R. Snoeys, F. Staelens, W. Dekeseve, "Current trends in nonconventional material removal processes," *Ann. CIRP*, 35(2), pp. 467-480, (1986).
6. W.S. Lau, M. Wang, W.B. Lee, "Electrical discharge machining of carbon fiber composite materials," *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 30(2), pp 297-308, (1990).
7. W.S. Lau, W.B. Lee, A comparison between EDM wire-cut and laser cutting of carbon fiber composite materials, *Mater. Manuf. Process.* 6(2), pp. 331-342, (1991).
8. H. Hocheng, Y.H. Guu, N.H. Tai, "The feasibility

- analysis of electrical discharge machining of carbon-carbon composites," *Mater. Manuf. Process.* 13(1), pp. 117-132, (1998).
9. Koenig. W., Dauw .D.F., Levy. G., Panten .U., "EDM -future steps towards the machining of ceramics", *Ann. CIRP*, 37(2), pp. 625-631, (1998).
 10. D.F. Dauw, C.A. Brown, J.P. van Griethuysen, J.F.L.M. Albert, "Surface topography investigations by fractal analysis of spark eroded electrically conductive ceramics", *Ann. CIRP*, 39(1), pp. 161-165, (1990).
 11. Yang, W.H., Tarng, Y.S., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method," *J. Mater. Process. Technol.*, 84, pp. 122-129, (1998).
 12. D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Wiley, New York, (2001).
 13. Y.S. Tarang, W.H. Yang, "Application of the Taguchi method to the optimization of the submerged arc welding process," *Mater. Manuf. Process.*, 13(3), pp. 455-467, (1998).
 14. D.R. Cox, N. Reid, *The theory of the design of experiments*, Chapman & Hall/CRC Press, London/Boca Raton, FL, (2000).
 15. M.S. Phadke, *Quality engineering using robust design*, Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1989).
-
- 접수일: 2015년 11월 30일, 심사일: 2015년 12월 10일,
게재확정일: 2015년 12월 21일