

SCM440강의 방전가공에서 공정변수의 최적화

최만성^{*†}

^{*†} 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Optimizing the Process Parameters of EDM on SCM440 Steel

Man Sung Choi^{*†}

^{*†} School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

The objective of this research study is to investigate the optimal process parameters of electrical discharge machining (EDM) on SCM440 steel with copper as a tool electrode. The effect of various process parameters on machining performance is investigated in this study. 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 SCM440 steel. To predict the optimal condition, the experiments are conducted by using Taguchi's L27 orthogonal array. The work material was ED machined with copper electrodes by varying the pulsed current, pulse on-time, voltage, servo speed and spark speed. Investigations indicate that the surface roughness is strongly depend on pulsed current.

Key Words : Electrical Discharge Machining (EDM), SCM440, Taguchi Method, Optimization

1. 서 론

방전가공은 반도체기술의 혁신으로 제어기술의 발달을 가져와 고속가공이 가능하게 되었으며 금형, 항공우주 산업, 전자공업 등 산업 전반에 걸쳐 다양하게 사용되고 있다. 특히 일반 범용공작기계로는 가공에 어려움이 있는 금형제작과 같이 난삭재를 주로 사용하는 분야에서 필수적이며, 내열재료, 형상가공, 절단, 난삭성재료 등에 많이 사용되고 있음은 물론 비철금속재료의 가공에도 활용되고 있다. 또한 이 가공법은 재료의 경도에 무관하게 가공할 수 있으며, 매우 복잡한 형상의 부품을 저렴한 방전전극을 사용하여 고정도의 부품을 가공할 수 있으므로 산업체에서 선호하는 가공법 중의 하나이다[1-5]. 방전가공기는 플라스틱 사출금형, 다이캐스팅, 반도체 장비제작

등을 생산하는 산업체에 주로 사용되는 기계로 이 분야에 필수 불가결 한 장비로 보편화되어 있다. 아울러 재료 과학의 응용 분야에 있어서는 우수한 기계적성질과 열적 인 특성, 만족할만한 전기전도율을 갖고 있는 금속 재료, 복합재료 및 세라믹재료의 가공에도 널리 이용되고 있다 [6-12]. 방전가공기는 가공속도와 가공 정밀도가 매우 중요하고, 이러한 요소는 대개 방전 가공조건, 전극의 재질, 방전액 등에 영향을 받는다. 방전가공조건이란 기계의 제어회로에 내장 되어있는 기능 중 가공속도와 정밀도를 제어하는 요소를 포함하고 있다. 본 연구에서는 방전전류 (current), 방전시간(pulse on-time), 방전전압 (voltage), 서보 속도(servo speed), 방전속도 (spark speed) 등의 방전가공조건에 따라 구리전극을 사용하여 가공된 재료의 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보았다. 사용된 시편은 SCM440강으로 구조용강의 하나이며 기계적 성질이 우수하고 열처리에 의해 성질을 개선시켜 사용하며, 구조용 합금강은

[†]E-mail: mschoi@koreatech.ac.kr

구조용 탄소 강 of 기계적 성질을 합금원소를 첨가하여 개량한 재질로서 축(shaft)류, 기어(gear)류, 너트(nut)류 등 강인성을 필요로 하는 기계부품에 사용된다. 실험의 효율적인 결과도출을 위해 실험계획법 중의 하나인 Taguchi법을 사용하였다. Taguchi법은 기계, 화학, 전기, 전자 등 산업 전반에 걸쳐 생산 공정의 공정 조건을 최적화 하고 품질 손실비용을 줄일 수 있는 최적화 설계기법이다[13-17]. 따라서 방전가공 공정의 특성치를 최적화 하고 생산성과 정밀도를 향상 시키기 위해 직교 배열에 의한 실험계획표를 작성하고 실험자료를 근거로 S/비를 도출하였다. 그리고 분산분석(ANOVA)을 통해 가공변수의 유의성을 검정하였으며 특성치인 표면거칠기에 대한 최적 방전조건을 구하였다.

2. Taguchi법

다구찌는 직교배열표를 이용해서 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 제어 변수의 조합을 찾는 방법을 제안하였다. 이는 복잡한 통계이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단하고자 하는 종래의 실험계획법에 비하여 훨씬 더 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강건설계의 기본적인 수단을 이루고 있다. 다구찌법은 제품의 개발 초기단계에서 각 설계 변수의 영향을 신속하게 파악하고 발생 가능한 문제를 예방하는 수단을 제공하므로 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 가능하고 영향력이 강한 인자를 찾아내어 잡음의 영향력을 최소화 하는 강건설계 (robust design)가 핵심이다. 이러한 강건설계에 필요한 기법이 S/N(signal and noise)비이다. 망소 특성 (smaller is the better)은 음수 값을 갖지 않고 작을수록 좋은 특성으로 S/N는 다음과 같다.

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

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

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

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

3. 실험장치 및 방법

3.1 시편제작

본 실험에서는 두께 7mm, 너비 20mm, 길이 135 mm of SCM440강을 너비 방향 직선 절삭하여 두께 3mm의 시편을 27개 제작하였다. 방전가공 시 피삭 재가 떨리는 현상을 방지하기 위해 베드에 피삭재를 단단히 고정하였고 피삭재의 위, 아래 분무압이 같도록 Z축의 높이를 조정하였다. 방전전극의 치수는 구리(copper)가 Ø10mm로 제작하였다. SCM 440 강을 사용하였으며 화학적인 조성과 기계적성질은 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1. Chemical composition(wt.%)

C	Si	Mn	p	S
0.38	0.18	0.64	0.014	0.002
Cu	Ni	Cr	Mo	V
0.12	0.07	1.04	0.15	0.01

Table 2. Mechanical properties

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
1232	1365	11.7
Reduction of area [%]	Vickers hardness	-
32	437	-

3.2 실험방법

Fig 1은 실험에 사용된 방전가공의 모습을 보여준다. Table 3은 실험에 사용된 장비와 계측기의 제원을 나타낸 것이다.

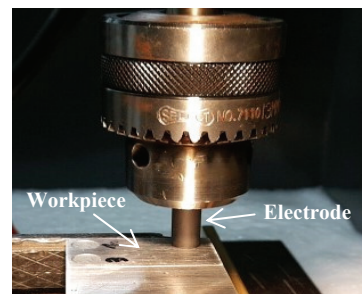


Fig. 1. Experimental set-up.

Table 3. Specification of experiment device

Name	Model	Co. Ltd
EDM M/C	JCE-50C	HWACHEON
Roughness Measurement Device	SURF 5000	MAHR

Table 4는 실험에 사용된 제어인자와 각 수준에 따른 방전가공조건을 나타내었다. 실험방법은 SCM440강에 방전전류, 방전시간, 방전전압, 서보속도, 방전속도를 바꾸어 가며 깊이 1mm로 방전필스를 실시하였다. 각 인자의 수준은 3수준으로 총 27번의 가공을 실시하고, 이를 3회 반복실험을 하였다. 전극은 구리를 이용하였다. 한번 가공을 하고 가공이 끝나면 가공시간을 결과표에 작성하였고, 이후 시편을 빼내고, 절삭유를 잘 빼낸 후 표면거칠기를 측정하였다. 여기서 원점을 매번 맞추는 것을 줄이기 위해 X축과 Y축을 고정시키기 위해 다른 시편을 이용해 표시를 해 두었다. 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 81회의 실험을 하고 결과물에 대해 표면거칠기 측정기로 표면거칠기를 측정하였다. 이러한 측정값들을 통계적 기법을 이용하여 방전가공의 최적조건을 선정하였다. 여기서 A는 방전전류, B는 방전시간, C는 방전전압, D는 서보속도, E는 방전속도이다.

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

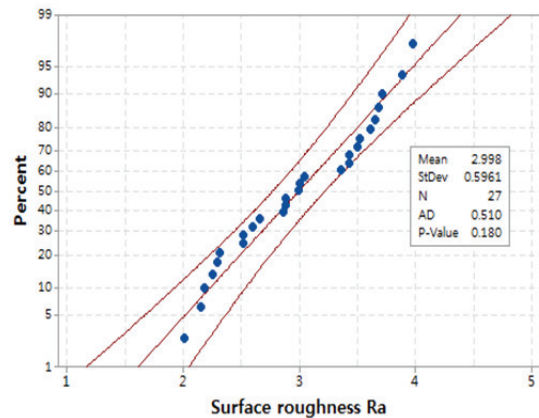
Factors	Symbol	Parameter/Unit	Level		
			1	2	3
Control factors	A	Current [A]	5	15	30
	B	Pulse on-time [us]	20	40	60
	C	Voltage [V]	5	10	15
	D	Servo speed [rev/min]	40	65	90
	E	Spark speed [um/s]	40	60	80

4. 실험결과 및 분석

4.1 정규성 검정(Normality Test)

Table 4의 실험조건에 따라 구리전극을 사용하여 실험

한 후 표면거칠기를 $Ra[\mu m]$ 를 구하고, 자료의 정규성검토를 하였다. 정규성을 검정하는 통계적 방법으로 여러 가지가 있으나, 여기서는 Anderson-Darling검정을 사용하였다. 이 검정은 경험적 누적 분포함수를 기초로 한 검정 방법으로 좋은 검정력을 가지며, 분포의 높은 값과 낮은 값들에서 정규성으로부터 이탈을 탐지 하는데 특히 효과적이다. Fig. 2는 표면거칠기의 정규확률도를 95% 신뢰구간으로 나타낸 것으로 $A^2=0.510$ 에 해당되는 p-값이 0.180이고, 유의수준 5%보다 낮으므로 대립가설을 채택한다. 따라서 정규분포를 따른다고 판정한다.

**Fig. 2.** Probability plot of Ra.

4.2 분산분석(Analysis of Variance)

Table 5는 Table 4의 조건에 따라 구한 표면거칠기 자료이고, SN비는 식 (1)의 망소특성으로 구한 값이다. 실험횟수는 반복 3회 실험하여 총 81회이다.

Table 5의 자료에 의해 분산분석(ANOVA)을 하여 Table 6과 같은 결과를 얻었다. 분산분석은 공정의 파라미터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들 이 특성에 미치는 유의성을 검정할 수 있다.

Table 6에서 P의 값을 살펴보면 방전전류, 방전 시간, 방전전압이 매우 유의하다. 즉 수준 간에 차이가 있다는 의미이다. 여기서 결정계수 R^2 은 88.4%이고, 수정 R^2 은 81.1%로 나타났으므로 실험 결과가 매우 적합한 것으로 나타났다. P-값의 유의성이 큰 순위는 A, C, B, E, D이다. Fig. 3은 구리 전극의 표면거칠기에 각 요인의 수준에 대해 반응 특성의 평균에 대한 주효과를 나타낸 것으로 이 표에는 델타통계량에 따른 주효과의 상대적 크기를 비교할 수 있다. 그림에서 볼 때 방전전류의 평균적인 차이가 매우 크며, 방전전압과 방전시간의 순서로 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 5. Experimental results of R_a , S/N ratios calculated

Run	A	B	C	D	E	Ra	S/N
1	1	1	1	1	1	2.185	-6.789
2	1	1	1	1	2	2.320	-7.310
3	1	1	1	1	3	2.656	-8.485
4	1	2	2	2	1	2.602	-8.306
5	1	2	2	2	2	2.293	-7.208
6	1	2	2	2	3	2.254	-7.059
7	1	3	3	3	1	2.152	-6.657
8	1	3	3	3	2	2.514	-8.007
9	1	3	3	3	3	2.012	-6.073
10	2	1	2	3	1	2.880	-9.188
11	2	1	2	3	2	3.502	-10.886
12	2	1	2	3	3	2.861	-9.130
13	2	2	3	1	1	2.998	-9.537
14	2	2	3	1	2	3.426	-10.696
15	2	2	3	1	3	3.005	-9.557
16	2	3	1	2	1	3.892	-11.803
17	2	3	1	2	2	3.682	-11.322
18	2	3	1	2	3	3.434	-10.716
19	3	1	3	2	1	2.882	-9.194
20	3	1	3	2	2	2.518	-8.021
21	3	1	3	2	3	3.045	-9.672
22	3	2	1	3	1	3.610	-11.150
23	3	2	1	3	2	3.718	-11.406
24	3	2	1	3	3	3.983	-12.004
25	3	3	2	1	1	3.357	-10.519
26	3	3	2	1	2	3.526	-10.946
27	3	3	2	1	3	3.652	-11.251

Table 6. ANOVA analysis for surface roughness R_a

Factor	DF	SS	MS	F-value	P-value
A	2	56.5466	28.2733	47.35	0.000
B	2	5.2761	2.6380	4.42	0.030
C	2	10.2402	5.1201	8.57	0.003
D	2	0.1843	0.0922	0.15	0.858
E	2	0.4133	0.2066	0.35	0.713
Error	16	9.5543	0.5971		
Total	8	82.2148			

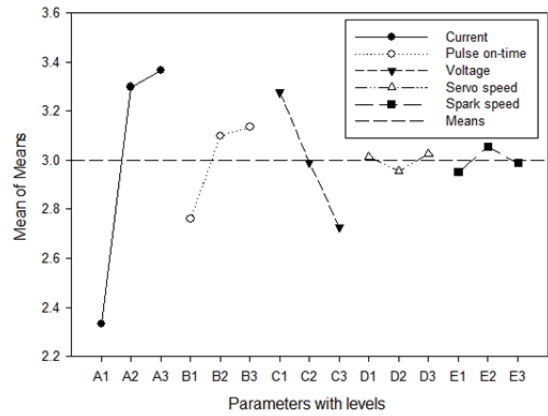


Fig. 3. Main effects plot for Means.

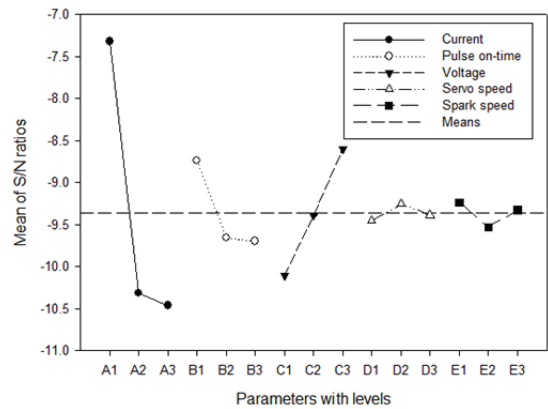


Fig. 4. Main effects plot for S/N ratios.

Fig 4는 표면거칠기에 대한 망소특성치인 S/N 비의 반응 값을 나타낸 것이다. 방전전류의 델타 값은 3.14, 방전시간은 0.96, 방전전압은 1.51, 서보속도는 0.20 그리고 방전속도는 0.30으로 나타났다. 따라서 방전전류, 방전전압, 방전시간, 방전속도, 서보속도의 순으로 표면거칠기에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 최적조건은 $A_1C_3B_1E_1D_2$ 이 된다.

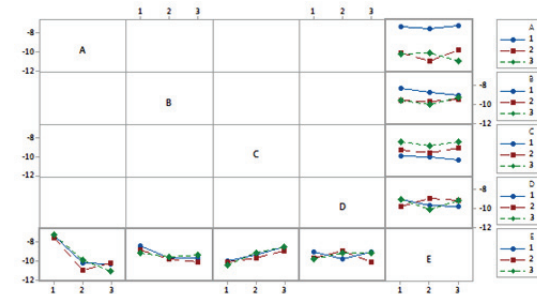


Fig. 5. Interaction plot of S/N ratios for surface roughness.

Fig. 5는 표면거칠기 실험자료에 따른 SN비에 대한 교호작용의 효과(interaction effect)를 나타낸 것이다. 교호작용의 효과는 어느 한 인자의 효과가 다른 인자의 수준에 따라 변화하여 나타나는 효과를 나타낸다. Fig. 5에서 실험자료의 SN비에 따른 교호 작용의 효과는 A와 D, C와 D 그리고 D와 E에 약간의 교호작용이 보인다. 이런 경우는 각각의 인자를 따로 고려하여 최적수준을 정한다.

Fig. 6과 Fig. 7은 실험2번의 같은 조건에서 각각 구리 전극과 흑연전극의 방전표면을 금속전자 현미경(SEM)으로 본 사진으로 표면조직의 경향은 매우 유사함을 알 수 있다.

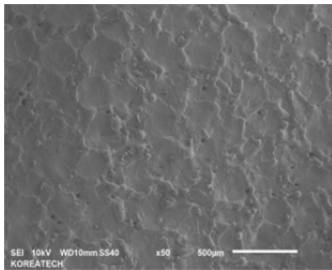


Fig. 6. Scanning electron microscope image of machined surface by using copper electrode.

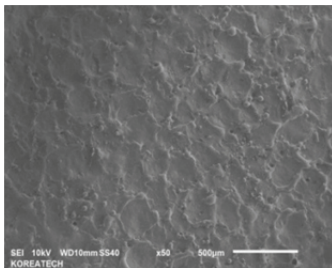


Fig. 7. Scanning electron microscope image of machined surface by using graphite electrode.

4.3 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)

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 5의 자료를 이용하여 구리전극을 이용한 방전가공에 있어서 방전 조건과 표면거칠기의 다중회귀식을 구하였다.

$$\hat{R}_a = 2.14 + 0.52A + 0.19B - 0.27C \quad (3)$$

여기서 \hat{R}_a 는 표면거칠기의 추정식이다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 표면거칠기를 최소화하기 위해서는 방전전류 A와 방전시간 B를 낮추고 방전전압 C를 높이면 된다. 그리고 회귀분석을 한 결과 표면 거칠기의 결정계수 R^2 의 값은 75%로 나타났는데 전체변동 중 회귀식에 의해 설명되는 부분이 꽤 높은 편이다. Table 5의 자료를 이용하여 방전가공 변수와 SN비의 다중회귀식을 식 (4)와 같이 구하였다.

$$\widehat{S/N} = -6.78 - 1.57A - 0.48B + 0.75C \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 SN비는 클수록 좋기 때문에 방전전류 A와 방전시간 B를 낮추고 방전 전압 C를 높이면 된다. 이것은 식 (3)과 같은 결과이다. 회귀분석에 의한 SN비의 결정계수 R^2 값은 72%로 나타났는데 전체변동 중 다중회귀식에 의해 설명되는 부분이 높은 편이다.

5. 결 론

본 연구에서는 Taguchi법을 이용하여 SCM440강을 피삭재로 사용하여 방전가공을 하였다. 이에 따른 표면거칠기의 영향을 분석한 결과에 의하면, 표면거칠기에 많은 영향을 미치는 공정변수는 방전 전류, 방전시간, 방전전압이며, 서보속도와 방전 속도는 상대적으로 그 영향이 미미하였다. 또한 각 공정변수에 수준에 따른 교호작용은 거의 없었다. 금속조직현미경(SEM)에 의한 표면품위를 살펴본 결과 같은 실험조건에서 구리전극과 그래파이트 전극의 표면조직은 매우 유사하였다. 조금 더 정밀한 합금성분의 분석을 위하여 원자현미경(AFM)을 이용하여 시편의 분석이 필요할 것이라 생각된다. 또한 다양한 공정변수가 표면거칠기에 미치는 영향을 구체적으로 분석하기 위해 마하라노비스 -다구찌 법을 적용하면 다양한 합금의 선삭가공에서 표면품위를 더욱 개선할 수 있을 것이라 여겨진다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 한국기술교육대학교 교수 연구제 파견연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Shasikant, V., Roy, A.K., "Kaushikkumar, Effect and Optimization of Machine Process Parameters on MRR for EN19 and EN41 Materials using Taguchi Method,"

- Procedia Technology, Vol. 14, pp. 204-210, 2014.
2. Roy, A.K., Kaushik Kumar, "Effect and Optimization of various Machine Process Parameters on the Surface Roughness in EDM for an EN41 Material using Grey Taguchi," *Procedia Materials Science*, Vol. 6, pp. 383-390, 2014.
 3. Jahan, M.P., Yang, Y.S., Rahman, M., "A Study on the Fine-finish De-sinking micro-EDM of Tungsten carbide using Different Electrode Materials," *Journal of Materials Processing and Technology*, Vol. 209, pp. 3956-3957, 2009.
 4. Kuppan, P., Rajadurai, A., Narayanan, S., "Influence of EDM Process Parameters in Deep Hole Drilling of Inconel 718," *International of Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 38, pp. 74-84, 2008.
 5. Singh, S.K., Kumar, N., "Optimizing the EDM Parameters to Improve the Surface Roughness of Titanium Alloy(Ti-6AL-4V), *International Journal of Emerging Science and Engineering*," Vol. 1, pp. 2319-6378, 2013.
 6. Meetham, G.W., "High Temperature Materials-a General Review," *J. Mater. Sci.* Vol. 26, pp. 853-860, 1991.
 7. Fitzer, E. "Future of Carbon-Carbon Composites," *Carbon* Vol. 25(2), pp. 163-190, 1987.
 8. Manocha, L.M., Bahl, O.P., Singh, Y.K., "Fiber Matrix Interface in Carbon-Carbon Composite-Effect of Surface Morphology of Carbon Fibers," *Carbon* Vol. 27(3), pp. 381-387, 1989.
 9. Koenig, W., Komanduri, R., Tokanshoff, H.K., "Machining of Hard Metals," *Ann. CIRP*, Vol. 33(2), pp. 417-427. 1984.
 10. Lau, W.S., Wang, M., Lee, W.B., "Electrical Discharge Machining of Carbon Fiber Composite Materials," *Int. J. Mach. Tools Manuf.* Vol. 30(2), pp 297-308, 1990.
 11. Hocheng, H., Guu, Y.H., Tai, N.H., "The Feasibility Analysis of Electrical Discharge Machining of Carbon-Carbon Composites," *Mater. Manuf. Process.* Vol. 13(1), pp. 117-132, 1998.
 12. Koenig, W., Dauw, D.F., Levy, G., Panten, U., "EDM - Future Steps towards the Machining of Ceramics", *Ann. CIRP* Vol. 37, No. 2, pp. 625-631, 1998.
 13. M.S. Phadke, "Quality Engineering using Robust Design," *Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 1989.
 14. Yang, W.H., Tarnq, Y.S., "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations based on the Taguchi Method, *J. Mater. Process*". *Technol.* Vol. 84, pp. 122-129, 1998.
 15. D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments," *Wiley, New York*, 2001.
 16. Y.S. Tarang, W.H. Yang, "Application of the Taguchi Method to the Optimization of the Submerged Arc Welding Process," *Mater. Manuf. Process.* Vol. 13(3), pp. 455-467, 1998.
 17. D.R. Cox, N. Reid, "The Theory of the Design of Experiments," *Chapman & Hall/CRC Press, London/Boca Raton, FL*, 2000.

접수일: 2018년 6월 16일, 심사일: 2018년 6월 21일,
 게재확정일: 2018년 6월 21일