반도체디스플레이기술학회지 제13권 제3호(2014년 9월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 13, No. 3. September 2014.

다구찌법에 의한 STD11의 와이어방전가공에서 표면거칠기에 관한 연구

최 만 성†
†한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

A Study on Surface Roughness in Wire Electrical Discharge Machining of STD11 based on Taguchi method

Man Sung Choi†
†School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

The experimental analysis presented aims at the selection of the most optimal machining parameter combination for wire electrical discharge machining (WEDM) of STD11. Based on the Taguchi experimental design (L_{27} orthogonal array) method, a series of experiments were performed by considering time-on, voltage, time-off, wire speed, and flow rate as input parameters. The surface roughness was considered responses. Based on the signal-to -noise (S/N) ratio, the influence of the input parameters on the responses was determined. The optimal machining parameters setting for the minimum surface roughness was found using Taguchi methodology. In order to investigate the effects of process parameters on the surface machined by WEDM, Several experiments are conducted to consider effects of time-on, voltage, time-off, wire speed and flow rate on the surface roughness. Analysis of variance (ANOVA) as well as regression analysis are performed on experimental data. The best results of surface roughness were obtained at higher voltage, lower wire speed, and lower time-on.

Key Words : Wire electrical discharge machining (WEDM), STD11, Taguchi method, Surface roughness, Optimization

1. 서 론

금형산업은 반도체, 자동차, 가전, 항공우주선업 등 산업사회 전반에 걸쳐서 고품질, 낮은 가격으로 대량생산할 수 있는 생산빙식이다. 이 금형생산에서 와이어 방전가공은 비 절삭가공으로 1940년대 후반 부터 활용되어져 왔다[1-4]. 이 가공법은 반도체, 자동차, 의료기기, 플라스틱 사출금형, 다이캐스팅, 성형 다이스 등을 생산하는 산업체 등에서 전반적으로 활용되어 왔다[5]. 아울러 재료과학의 응용분 야에 있어서는 우수한 기계적 성질과 열적인 특성, 만족할만한 전 기 전도율을 갖고 있는 금속재료, 복합재료 및 세라믹 재료의 가공에도 널리 이용되고 있다. 와이어 방전가공에 관련된 문헌을 살펴보면, Hewidy et al[6]은 인코넬601을 사용하여 다양한 가공변수의 상호관계를 반응표면분석법으로 구하였고, Prasad와 Gopalakrishna[7]은 다중목적 유전자 알고리듬을 응용하여 반응표면법을 모델링하고 최적화된 반응을 구하였다. 본 연구에서는 다구찌의 직교배열법[8-12]에 의한 모델을 설정하고 공정변수들이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보았다.

Fig. 1은 방전가공의 여러 인자가 표면거칠기에 영향을 미치는 내용을 특성요인도 (cause and effect diagram)로 나타낸 것이다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 와이어 방전 가공기는 두산기계의 고정밀 침전식 와이어 방전기 모델W600 SP이고, 그 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 2와 같이 와이어방전가공기의 본체 부분은 XY

†E-mail : mschoi@koreatech.ac.kr

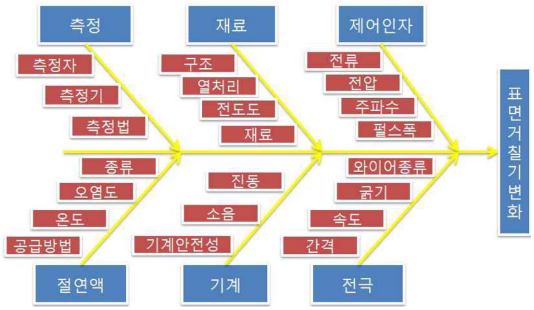

Fig. 1. Cause and effect diagram of WEDM.

Fig. 2. Wire-EDM set-up.

Table 1. Factors, their levels, and designation

Description	Unit	W600SP
Axis distance (X/Y/Z)	mm	570 × 370 × 350
Max. size (W/D/H)	mm	770 × 520 × 340
Max. weight	kg	1000
Max. wire speed	mm/sec	0 ~ 250
M/C weight	kg	4950 (NC involved)
U, V Axis distance	mm	120 × 120

Table 2. Mechanical properties of STD11

Tensile strength [kgf/mm^2]	Elongation [%]	Hardness [HR_B]
72	58	212

Table 3. Chemical properties of STD11

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V
1.5	0.4	0.6	0.03	0.03	12	1.1	1	0.4

테이블 부분, 와이어 전극의 구동부분, 헤드부분, 칼럼(column)부분, 가공액 탱크부분 등으로 분류된다. XY 테이블 부분은 피가공물을 고정하여 와이어전극에 대하여 상대운동을 시키는 부분으로서 일반적으로 테이블 구동부분이 있고 이 구동부분과 보통 볼스크루가 사용되는 이송나사가 연결되어 고정도 부품인 롤러 가이드(roller guide)를 따라서 X축과 Y축 방향으로 이동한다.

Fig. 2는 실험에 사용된 와이어 방전가공기의 본체를 나타내었다. 실험에 사용된 금형재료는 프레스 금형의 펀치와 다이스 및 다이캐스트 압출다이스로 널리 사용되는 합금강인 STD11을 사용하였다. Table 2는 STD11의 기계적 성질에 대한 값을 나타낸 것이다. Table 3은 STD11의 화학적 성질의 값을 나타내었다.

Table 4. Factors and levels used in the factorial design

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
(A) Time-on [μs]	6	7	8
(B) Voltage [v]	60	80	100
(C) Time-off [μs]	8	10	12
(D) Wire feed rate [mm/min]	20	25	30
(E) Flow rate [mm^3/min]	30	40	50

사용된 와이어는 ϕ0.25 mm의 황동선이며, 시편은 합금공구강인 STD11이다. 치수는 20 × 10 × 240 (mm)이다. 실험방법으로는 STD11을 너비 방향으로 직선 절삭하여 두께 3 mm의 시편을 27개를 제작하여 실험을 하였다. 방전가공 시 피삭재가 떨리는 현상을 방지하기 위해 베드에 피삭재를 단단히 고정하였고, 피삭재의 위, 아래 분무압이 같도록 Z축의 높이를 조정하였다. 방전가공 시 표면거칠기(Ra)는 표면거칠기 측정기를 사용하였다. 실험조건으로서는 Table 4와 같은 직교 배열법에 따라 실험을 하였다.

Table 4의 실험조건에 따라 Table 5에는 와이어방전가공을 2회 반복하여 실험한 후 표면거칠기를 측정한 평균값과 그에 따른 S/N비를 망소특성(smaller is better)로 계산하여 그 결과를 S/N비로 작성한 것이다. 망소특성은 특성 값이 작으면 작을수록 좋은 값이다. 표면거칠기는 정량적 비교와 분석을 위하여 가공면의 거칠기를 한 개의 인자로 표현한다. 가장 흔히 쓰이는 인자가 표면거칠기(Ra)이고, 그 측정 단위는 μm이다. 표면거칠기는 거칠기 편차에 기초한 측정가능한 특성이다. 가장 일반적으로 사용되는 표면조직의 척도는 표면 거칠 기이다. 표면거칠기는 정해진 표면길이 내에서 공칭 표면으로부터 측정한 수직편차의 평균 값으로 정의 된다. 일반적으로 편차의 절대 값에 기초한 산술평균을 이용하며, 이러한 표면거칠기 값을 평균거칠기

Table 5. Assigned orthogonal L_{27} with the acquired data

Run	Inner control factor array					Outer noise array	
	A	B	C	D	E	Ra	S/N
1	1	1	1	1	1	1.848	−5.3340
2	1	1	1	1	2	1.992	−5.9857
3	1	1	1	1	3	2.135	−6.5879
4	1	2	2	2	1	2.179	−6.7651
5	1	2	2	2	2	1.888	−5.5200
6	1	2	2	2	3	2.049	−6.2308
7	1	3	3	3	1	1.903	−5.5887
8	1	3	3	3	2	1.874	−5.4553
9	1	3	3	3	3	1.806	−5.1335
10	2	1	2	3	1	2.216	−6.9114
11	2	1	2	3	2	2.624	−8.3798
12	2	1	2	3	3	2.412	−7.6475
13	2	2	3	1	1	2.09	−6.4023
14	2	2	3	1	2	2.017	−6.0942
15	2	2	3	1	3	1.768	−4.9496
16	2	3	1	2	1	1.753	−4.8764
17	2	3	1	2	2	1.893	−5.5430
18	2	3	1	2	3	1.708	−4.6497
19	3	1	3	2	1	2.079	−6.3570
20	3	1	3	2	2	2.534	−8.0761
21	3	1	3	2	3	2.314	−7.2872
22	3	2	1	3	1	2.528	−8.0555
23	3	2	1	3	2	2.32	−7.3097
24	3	2	1	3	3	2.001	−6.0249
25	3	3	2	1	1	1.628	−4.2330
26	3	3	2	1	2	1.816	−5.1823
27	3	3	2	1	3	1.921	−5.6705

(average roughness)라고 부른다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 표면거칠기의 정규성 검정

많은 통계적 절차는 데이터가 정규분포를 따른다고 가정한다. 이러한 가정을 확인하기 위하여 데이터에 대한 정규성검정을 수행할 필요가 있다. 정규확률도에서 점들이 대부분 직선에 떨어지면 정규성 가정이 만족한다고 판정한다. 그리고 정규성을 검정하는 통계적 방법으로 여러 가지가 있으나, 여기서는 Anderson-Darling 검정을 사용하였다. 이 검정은 경험적 누적분포함수를

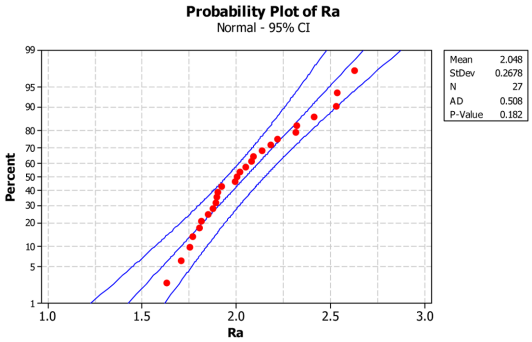

Fig. 3. Probability plot of surface roughness.

Table 6. ANOVA for S/N ratio of surface roughness

Source	df	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	p
A	2	1.74	1.74	0.87	1.69	0.217
B	2	15.25	15.26	7.63	14.79	0.000
C	2	0.26	0.26	0.13	0.26	0.778
D	2	0.63	5.63	2.82	5.46	0.016
E	2	0.76	0.76	0.38	0.74	0.494
Error	16	8.26	8.26	0.52		
Total	26	31.92				

기초로 한 검정방법으로 분포의 높은 값과 낮은 값들에서 정규성으로부터 이탈을 탐지하는데 특히 효과적이다.

Fig. 3 은 표면거칠기의 정규확률도를 95% 신뢰구간으로 나타낸 것으로 $A^2=0.508$에 해당되는 p-값이 0.182으로 유의수준 5%보다 높아서 귀무가설을 채택하므로 정규분포를 따른다고 판정한다.

3.2. S/N비의 분산분석

Table 5의 자료에 의해 분산분석을 하면 Table 6과 같은 분산분석결과를 얻을 수 있다. Table 6에서 p의 값을 살펴보면 5% 유의수준에서 방전전압, 와이어 이송속도, 방전시간의 순서대로 표면거칠기에 영향을 크게 미침을 알 수 있다. 분산분석은 와이어방전 가공공정의 변수들이 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 특성치에 미치는 유의성을 검정할 수 있다. 또한 Table 6의 결과를 사용하여 요인과 반응 데이터의 상관관계가 높 은지 여부와 모형에서 각 요인의 상대적 중요도를 확인할 수 있다. 이 모형에서 상관계수 R^2은 74.1% 이고 수정상관계수 R^{2*}는 57.9%이다. 휴지시간인 C와 방전액의 유량 E는 유의성이 떨어지므로 분산분석에서 오차 항에 풀링

Table 7. ANOVA for S/N ratio after pooling

Source	df	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	p
A	2	1.74	1.74	0.87	1.87	0.180
B	2	15.26	15.26	7.63	16.45	0.000
D	2	5.63	5.63	2.82	6.07	0.009
Error	20	9.28	9.28	0.46		
Total	26	31.92				

Table 8. Response table for S/N ratios(smaller is better)

Level	A	B	C	D	E
1	−5.845	−6.952	−6.041	−5.604	−6.058
2	−6.161	−6.373	−6.282	−6.145	−6.394
3	−6.466	−5.148	−6.150	−6.723	−6.020
Delta	0.622	1.804	0.242	1.119	0.374
Rank	3	1	5	2	4

(pooling)하여 다시 분산분석표를 작성한 것이 Table 7이다. 풀링 후에 이 모형에서 상관계수 R^2은 70.9%이다.

3.3. 공정변수의 주 효과

Table 8의 S/N비의 평균에 대한 반응표에는 각 요인수준에 대해 각 반응특성(인자의 수준별 S/N비)의 신호 대 잡음 비를 나타낸 것으로, 이 표에는 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있는 델타 통계량에 따른 순위를 나타나있다.

Fig. 4에서는 A, B, C, D, E의 요인수준에 대해 각각 특성(인자의 수준별 S/N비)의 평균을 나타낸 것으로, 이 그림에서 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있다. Fig. 4에서 볼 때 효과의 상대적 크기는 B, D, A이다. 즉, 방전전압, 와이어이송속도, 방전시간이고, 최적 가공조건은 S/N의 최대값인 $B_3D_1A_1$이고, 실험에 사용된 방전가공조건에서 표면거칠기를 가장 양호하게 가공하는 조건은 방전전압이 100 volt, 와이어의 이송속도가 20 mm/ min., 방전시간이 6 μs임을 의미한다.

3.4. 표면거칠기의 다중회귀분석

다중회귀분석(multiple regression analysis)은 2개 이상의 예측변수와 1개의 반응변수와의 관계를 직선으로 가정하는 회귀분석을 말한다. 회귀함수가 얼마나 유효한가는 분산분석표를 작성 하여 t-검정을 실시하거나, 실험에서 얻어지는 총 편차의 제곱 합과 회귀제곱 합으로부터 구해지는 결정계수 R^2을 이용하여 평가한다.

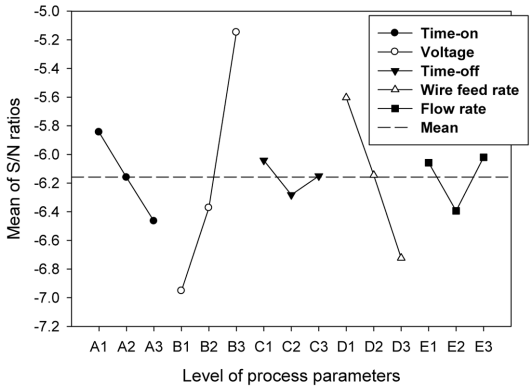

Fig. 4. Main effects plot S/N ratios.

각 인자들로부터 표면거칠기를 예측하기 위한 방법으로 Table 5의 자료를 이용하여 아래의 식 (1)과 같은 다중회귀식(multiple regression equation)을 얻었다.

$$\widehat{Ra} = 2.04 + 0.08\mathrm{A} - 0.12B + 0.14D \quad (1)$$

여기서 $\widehat{Ra}$는 표면거칠기의 추정식이다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 표면거칠기를 최대화하기 위해서는 방전전압 B를 높이면 된다. D와 A는 표면거칠기와 양의 상관관계가 있으므로 작은 값일수록 표면거칠기가 좋아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 회귀분석을 한 결과 표면거칠기의 결정계수 R^2(수정)의 값은 65%로 나타났는데 전체변동 중 회귀식에 의해 설명되는 부분이 약간 높은 편이다.

4. 결 론

본 연구에서 Taguchi법을 이용하여 STD11을 피삭재로 사용하여 와이어방전가공을 하였다. 이에 따른 표면거칠기의 영향을 분석한 결과, 방전가공의 공정변수에 따른 표면거칠기는 정규분포를 따랐다. 표면거칠기를 가장 양호하게하는 공정변수의 조건 은 높은 방전전압, 낮은 와이어의 이송속도 및 짧은 방전시간일수록 양호하였다. 향후 가공재료에 따른 정상적인 공정조건과 비정상적인 공정조건을 마하라노비스-다구찌 시스템으로 분석하여 가공재료에 따른 와이어방전의 기공공정을 표준화할 필요가 있다.

참고문헌

1. 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.
2. Dauw, D.F., Charmilles, "technologies: facing the future, in: Paper Presented During the Inauguration of CT-Japan", Yokohama, Japan, 14 April 1989.
3. Stovicek, D.R., "The State-of-the-art EDM Science: Tooling and Production", Vol. 59, No. 2, Nelson Publishing Inc., Ohio, USA, May, p. 42, 1993.
4. Dauw, D.F et al., "Surface topography investigations by fractal analysis of spark eroded electrically conductive ceramics", Ann. CIRP Vol. 39, No. 1, pp.161 -165, 1990.
5. Ho, K H., Newman, S. T., Rahimifard, S., Allen, R D., "State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp 1247-1259. 2004
6. Hewidy, M. S., El-Taweel, El- Safty . T. A, M. F., "Modelling the machining parameters of WEDM of Inconel 601 using RSM", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 336., pp 169-328, 2005.
7. Dvsss, V. Prasad, A. Gopalakrishna., "Empirical modeling and optimization of wire electrical discharge machining", Int J Adv. Manuf. Technol., Vol. 43, pp 914-925, 2009.
8. Lee, S.H., "Optimization of cutting parameters for burr minimization in face-milling operations", Int. J. Prod. Res. Vol. 41, No. 3, pp. 497-511, 2003.
9. Yang . W.H., Tarng . 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.
10. Lin .T.R., "Optimization technique for face milling stainless steel with multiple performance characteristics", Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. No. 19, pp. 330–335, 2002.
11. Davim .J.P., Antonio . C.A.C., "Optimization of cutting conditions in machining of aluminium metal matrix composites using a numerical and experimental model", J. Mater. Process. Technol. Vol. 112, pp. 78-82, 2002.
12, Tosun, N., "The effect of the cutting parameters on performance of WEDM", KSME Int. J. Vol. 17, No. 6, pp. 816–824, 2003.

접수일: 2014년 8월 1일, 심사일: 2014년 8월 22일,
게재확정일: 2014년 8월 29일