

다구찌 실험계획법을 이용한 와이어 방전가공의 최적 가공조건 선정

임세환* · 김주현* · 이위로** · 박주승**

(*국민대학교, **산업자원부 기술표준원)

Optimum selection of machining parameters of Wire Electrical Discharge Machining using Taguchi method

Lim, Se Hwan* · Kim, Joo Hyun* · Lee, Wi Ro** · Park, Joo Seung**

(Kookmin University, **Korean Agency for Technology and Standards)

ABSTRACT

The machining parameters for the wire electrical discharge machining(WEDM), including no load voltage, pulse-on time, pulse-off time, wire tension, water flow rate, offset, etc. should be chosen properly so that a better performance can be obtained. An optimum selection of machining parameters relies heavily on the operators technologies and experience. This study presents a method by means of Taguchi method to select optimal machining parameter combination for an cutting speed or surface roughness. Experimental results demonstrate that the machining models are appropriate and the derived machining parameters satisfy the real requirements in practice.

Key Words : WEDM (와이어 방전가공), Design of experiments(실험계획법), Taguchi method (다구찌 기법)

1. 서론

방전가공은 절연액 중에서 가공전극과 공작물 사이에 펄스전압을 유도하여 연속적으로 발생되는 아크방전에 의해 공작물을 용융 또는 증발시켜 도체에 구멍을 뚫거나 또는 원하는 현상으로 깎아내는 전기 가공법으로 전도성의 재료라면 정도에 관계없이 가공할 수 있다. 와이어 방전가공은 0.05~0.3mm의 황동, 텅스텐 등의 와이어를

전극으로 사용하며 주로 강 또는 초경합금 등의 가공에 사용된다.

와이어 방전가공기는 국내에서도 생산되고 있으나, 주로 유럽과 일본에서 주로 생산되는 제품을 많이 사용하고 있는 실정이다.

와이어 방전가공은 대개 0.5mm의 얇은 와이어에 전원을 유도하여 아크를 발생시키기 때문에 매우 예민한 가공이고, 와이어 단선이 일어나거나 잘못된 조건을 사용하면 가공시간이 매우 길어지는 경우가 많이 발생한다. 또한, 제조사나 기종별로 제어하는 가공조건 및 특성이 서로 달라서, 처음 도입되는 기계마다 가공에 많은 영향을 미치는 제어 가능한 조건을 파악하고 각각의 수준을 정하여야 하며, 이 과정이 매우 어렵고 많은 시간을 투자해야한다. 제조사에서 정한 가공조건표를 이용하면 대략적으로 파악할 수 있으나, 임의의 속도와 표면거칠기를 얻기에는 불충분하다.

본 연구에서는 사용자가 처음 접하는 기계의 특성에 대하여 잘 모르더라도, 빠른 시간에 제어 인자가 가공성능에 얼마나 많은 영향을 주는지를 파악하고, 원하는 가공속도와 표면거칠기를 얻을 수 있는 적절한 가공조건을 선택할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 와이어 방전가공

와이어 방전가공(Wire Electric Discharge Machining, WEDM)은 황동, 동, 텅스텐, 몰리브덴 등의 가는 와이어에 인장력을 걸어 감으면서,

피가공물과 와이어전극 사이에 가공전원으로부터 가공전력을 공급하고, 동시에 극간에 가공액을 공급하여 방전을 발생시키고, 2차원 윤곽형상을 수치제어에 의해 이송하고, 실톱 식으로 윤곽을 뚫어 가공하는 방전가공이다. 공구의 회전이 없으므로 복잡한 형상 가공이 가능하며, 가공반발력이 없어 얇거나 긴 공작물의 가공에 매우 유리하다. 현재 2차원형상의 금형, 방전가공 전극, 시작품 및 프로파일게이지, 미세가공 등에 널리 사용되고 있다. 와이어 방전가공의 가공정도를 결정하는 것은 흠뚫의 치수정도가 일정하게 되는지와 관련된다. 때문에 전원전압, 전류, 방전펄스 발생 간격, 와이어 인장력, 가공액 유량제어가 중요하게 된다. 가공액은 탈이온수를 사용하며, 비저항 값이 일정하도록 해야하며 주로 10~100 k Ω 의 범위에서 사용한다.

2.1 가공속도

가공속도는 가공이송속도(mm/min)와 피가공물의 판두께(mm)의 곱으로 표시되는 것이 보통이다. 그러나 이번 연구에서는 모든 실험이 같은 시험편으로 가공하였으므로 가공속도는 가공이송속도로 표시된다. 큰 가공속도를 얻기 위해서는 높은 피크값을 갖는 펄스전류를 높은 주파수로 방전하고 액체를 고속으로 극간에 공급하고, 동시에 가공특성이 좋은 와이어를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 황삭가공에서 와이어 단선의 위험이 있으므로 적절한 가공조건의 선택이 중요하게 작용한다.

2.2 표면거칠기

표면거칠기는 가공속도가 클수록 거칠어진다. 때문에 좋은 표면거칠기를 얻기 위해서는 사상(2,3차)가공을 해야한다. 본 실험에서는 Ra(중심선 평균거칠기)를 사용하였다.

3. 다구찌 실험계획법

실험계획법이란 “해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수

있는가를 계획하는것”이라 정의될 수 있다.

다구찌 실험계획법은 실험계획법의 일종으로 직교배열표를 이용하여, 무작위한 순서로 실험을 실시하고, 각 인자의 SN비에 대한 분산분석을 통해 실험결과에 유의한 영향을 미치는 인자를 파악하고, 최적조건을 구하는 기법이다. 이 기법은 이론을 잘 모르더라도 실험을 실시할 수 있고, 실험 데이터로부터 요인변동의 계산이 용이하다.

직교배열표는 각 열이 직교가 되게 미리 만들어 놓은 표이다. 즉 어떤 수준에 대해서나 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 있다. 직교배열표의 형태는 다음과 같다.

Table 1. $L_4(2^3)$ 직교배열표의 표시법

실험번호	열번호			데이터
	A	B	C	
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	2	1	2	
4	2	2	1	

직교배열표 중 가장 간단한 $L_4(2^3)$ 을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 A, B, C 세 인자가 서로 골고루 배열되어 있는 것을 볼 수 있다. 직교배열표의 크기는 다음과 같이 나타낸다.

$$L_m(A^n)$$

m : 실험의 크기

A : 수준계

n : 배치 가능한 최대 인자 수

SN비란 신호 대 잡음의 비율(signal to-noise ratio)을 의미하는 것으로, 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향이 힘의 비율로서 나타내어지는 것이다. SN비는 특성에 따라 3가지로 구분된다.

$$\text{망목특성의 경우 : } SN = 10 \log \frac{(\sum y_i)^2}{nV}$$

$$\text{망소특성의 경우 : } SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}$$

$$\text{망대특성의 경우 : } SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

로 나타내어지며, 분산분석으로 SN비에 영향이 큰 설계변수를 찾아 SN비를 최대화 하는 것을 최적 수준으로 결정하며, 큰 영향을 미치지 못하는 설계변수는 비용, 편리성을 고려하여 적절한 수준으로 결정한다.

본 실험에서 가공속도는 높을수록 좋으므로 망대특성의 SN비를 사용하였고, 표면거칠기(Ra)값은 낮을수록 좋으므로 망소특성의 SN비를 사용하였다.

4. 실험장치 및 실험방법

4.1 실험장치

본 실험에서 사용한 와이어 방전가공기는 Fanuc Tape Cut Model W0모델로 본 기기의 사양은 Table 1,2와 같다.

Table 2. 와이어 방전가공기 사양

명칭	사양	
최대 공작물 치수(mm)	320×450 ×150	
최대 공작물 중량(kg)	150	
table stroke(mm)	전후	350
	좌우	200
최대 table 이송속도	900mm/min	
사용 wire 직경	0.05 ~ 0.3	
wire 장력	80 ~ 2,500 g	
wire 이송속도	0 ~ 10 m/min	
최대경사각도	±10° /100	

Table 3. 가공용 전원

명칭	사양
pulse 발생 방식	transister 방식
no load voltage	0~9 step
on time	0~9 step
off time	1~199 step
최대 가공속도	160mm ² /min

4.2 실험재료

와이어는 지름 0.25mm의 황동선을 사용하였으며, 시험편은 두께 60mm의 열처리된 합금공구강(STD-11)을 사용하였다.

4.3 실험방법

본 실험은 와이어 방전가공의 최적 가공조건을 결정하기 위해 사용 프로그램인 MINITAB을 이용한 다구저 실험계획법을 사용하였다. 황삭(1차)가공은 속도에 큰 차이를 보이고 표면거칠기는 차이가 별로 없었기 때문에 가공속도 면에서의 최적조건으로 하였고, 사상(2, 3차)가공은 속도와 표면거칠기에 대한 최적조건을 각각 구하였다.

4.3.1 황삭가공

황삭가공은 voltage, on time, off time, wire 종류를 인자로 하는 3수준계 직교배열표에 따라 9번의 실험을 하였다. 인자의 각 수준의 값은 가공이 가능한 조건을 임의로 설정하여 표4와 같이 설정하였고, 코너부의 가공이 가장 중요하다고 판단되어 그림1과 같은 형태로 절삭하였다.

Table 4. 황삭가공 인자별 각 수준의 값

	voltage	on time	off time	wire
1	6	7	7	오펙 황동와이어
2	7	8	8	오펙 코팅와이어
3	8	9	9	샤밀 코팅와이어

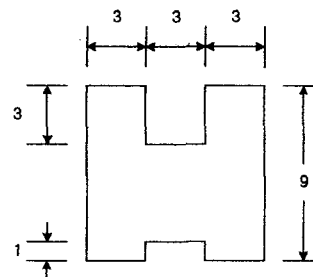


Fig. 1 황삭가공 시험편 형상

4.3.2 사상가공

사상가공은 황삭가공 이후 표면기질기를 좋게 하기 위한 마무리 가공으로 보통 2~4차 가공을 하지만, 본 연구에서는 2, 3차 가공을 한 직교배열표로 분석하였다. 여기서 offset은 황삭가공에서 220 μm 이고 표의 값은 그 값과의 차이를 나타낸 것이다. 인자 각 수준의 값은 조건표에 나와있는 표5의 값을 기준으로 하여 가공 가능한 범위 내에서 3수준으로 결정하였고 그 값은 표6과 같고 그림2의 형태로 절삭하였다.

Table 5. 조건표에 주어진 기준 가공조건

가공 조건 사상 가공	voltage	on time	off time	tension	flow	offset
2차	11	4	5	1500	2	70
3차	14	2	5	1500	2	10

Table 6. 사상가공 인자별 각 수준의 값

가공 조건 2차 수준	voltage	on time	off time	tension	flow	offset
1	7	3	4	1300	2	60
2	9	4	5	1400	3	70
3	11	5	6	1500	4	80

가공 조건 3차 수준	voltage	on time	off time	tension	flow	offset
1	13	0	3	1300	2	5
2	14	2	6	1400	3	10
3	15	4	9	1500	4	15

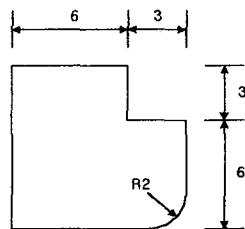


Fig. 2 사상가공 시편 형상

5. 실험결과

5.1 황삭가공

모든 인자를 3수준으로 하여 실험하였으나 ON TIME의 경우 6으로 하였을 때는 가공이 너무 오래 걸리고, 9로 하였을 때는 와이어 단선이 일어나 실험이 불가능하였다. 여기서 실험이 불가능한 경우 어떤 결과가 발생할지 알기 위해서 단선으로 인해 실험이 불가능한 경우의 속도를 0으로 하여 분석하였고, 반복실험을 하여 외측배열에 speed 1, speed 2로 나타내었다. 가공속도는 절삭 길이가 모두 같으므로 절삭시간을 망소특성으로 하여 분석하였더니 표7과 그림3과 같은 결과를 볼 수 있었다.

Table 7. 황삭가공 직교배열표 및 실험결과

	VOLT	ON TIME	OFF TIME	WIRE	speed 1	speed 2	SN
1	1	1	1	1	51'58"	52'16"	-0.455
2	1	2	2	2	3757"	3809"	2.062
3	1	3	3	3	0	0	0
4	2	1	2	3	3859"	3902"	2.062
5	2	2	3	1	3758"	3759"	2.292
6	2	3	1	2	0	0	0
7	3	1	3	2	3757"	3740"	2.332
8	3	2	1	3	2806"	2714"	5.044
9	3	3	2	1	0	0	0

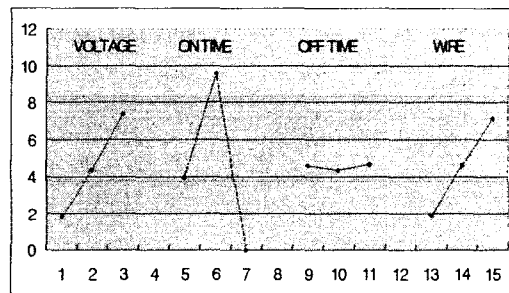


Figure 3. SN비 분석

분석결과 가공속도에 대한 최적조건은 VOLTAGE = 8, ON TIME = 8, OFF TIME = 9, WIRE = 사틸 코팅와이어로 결정되었으며, 검증실험결과 25분 27초의 가공시간을 보였다.

Table 8. 사상가공 적교배열표와 실험결과

	V2	T _{on} 2	T _{off} 2	TEN2	FLOW2	OFF2	V3	T _{on} 3	T _{off} 3	TEN3	FLOW3	OFF3	SPEED	SN1	Ra	SN2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2.79	8.92	0.84	1.51
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1.72	4.71	1.44	-3.20
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	1.63	4.25	1.83	-5.26
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	2.80	8.95	1.39	-2.86
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	3.29	10.35	1.71	-4.70
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2.48	7.88	1.55	-3.81
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	5.08	14.11	1.68	-4.51
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3.37	10.56	0.82	1.71
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	3.44	10.73	1.54	-3.74
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3.23	10.18	0.82	1.76
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1.72	4.71	1.24	-1.89
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	4.17	12.40	1.72	-4.69
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	3.69	11.35	1.62	-4.19
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	4.34	12.75	1.82	-5.21
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	4.84	13.70	0.77	2.23
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	9.44	19.50	1.98	-5.97
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	4.14	12.34	0.75	2.45
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	4.49	13.05	1.44	-3.17
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	3.06	9.71	0.84	1.51
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	5.11	14.17	1.56	-3.86
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	3.63	11.19	1.72	-4.73
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	5.26	14.42	1.42	-3.03
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	10.36	20.30	1.86	-5.41
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	4.58	13.21	0.76	2.34
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	9.45	19.51	1.87	-5.45
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	7.58	17.59	0.94	0.50
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	5.35	14.57	1.36	-2.70

5.2 사상가공

12개의 인자를 3수준으로 하여 적교배열법에 의해 27번의 실험을 행하였다. 가공속도는 전체 가공시간을 전체가공길이로 나눈 가공이송속도이고, 표면거칠기는 Ra(중심선 평균거칠기)를 사용하였다.

적교배열법에 의한 실험결과에 대한 결과는 표8과 같고 분석 결과는 그림4, 5와 표9와 같다.

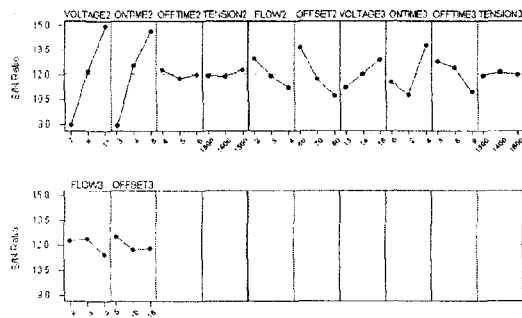


Fig. 4 사상가공의 가공속도에 대한 분석결과

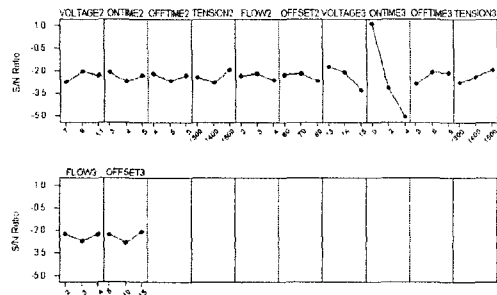


Fig. 5 사상가공의 표면거칠기에 대한 분석결과

Table 9. 사상가공의 실험결과 의한 최적조건

가공조건	voltage	on time	off time	tension	flow	offset	
2차	speed	11	5	4	1500	2	60
	Ra	9	3	4	1500	3	70
가공조건	voltage	on time	off time	tension	flow	offset	
3차	speed	15	4	3	1400	3	5
	Ra	13	0	6	1500	4	15

실험결과에서 보이는 것처럼 속도에 유의한 영향을 미치는 인자는 2차가공에서의 voltage와 on time이었고, 표면거칠기에 가장 유의한 영향을 미치는 인자는 3차가공에서의 on time이었다.

검증실험결과 조건표의 실험결과는 가공속도 = 5.31mm/min, Ra : 1.47 이고, 가공속도에 대한 최적조건으로 실험한 결과 가공속도 = 13.92mm/min, Ra = 1.78로 표면거칠기 최적조건으로 실험한 결과 가공속도 = 3.27mm/min, Ra = 0.76의 결과를 보였다.

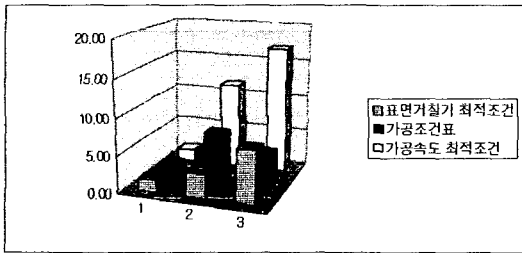


Fig. 6 가공조건과 차수에 따른 가공속도 변화

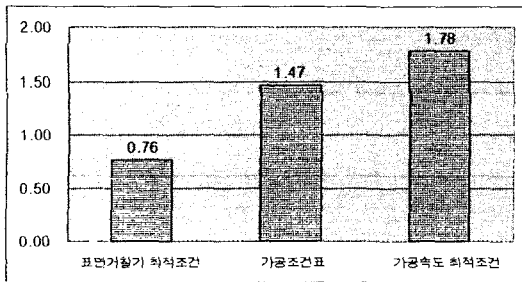


Fig. 7 가공조건에 따른 표면거칠기의 변화

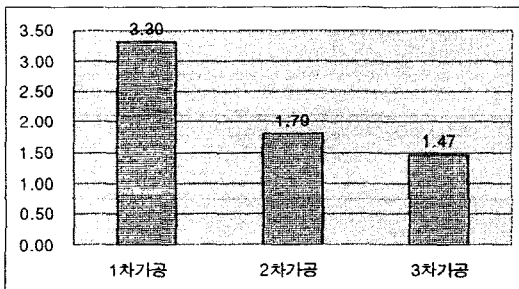


Fig. 8 가공차수에 따른 표면거칠기(Ra)의 변화

6. 결론

황삭가공과 사상가공에 대하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 황삭가공은 가공속도에 영향을 미치는 인자에 대하여 알 수 있었고, 표면거칠기 값은 큰 차이를 보이지 않았다.

2. 사상가공은 가공속도와 표면거칠기에 영향을 미치는 인자를 찾고, 최적조건을 결정하였다. 또한 2, 3차 가공조건에 대하여 동시에 실험한 결과 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

와이어 방전가공은 가공조건의 변화에 따라 가공속도와 표면거칠기가 상당히 변하므로, 적절한 가공조건을 결정하기 위해서는 작업자의 지식과 경험을 많이 필요로 한다. 이에, 지식과 경험이 없는 경우에도 단시간에 분석이 가능한 다구찌 실험 계획법을 이용하여 와이어 방전가공의 성능에 유의한 영향을 미치는 인자를 찾고, 더욱더 좋은 속도와 표면거칠기 값을 얻을 수 있는 인자들 간의 조합을 찾는 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. Y. S. Liao, J. T. Huang and H. C. Su, "A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining", Journal of Materials Processing Technology 71 (1997) 487-493
2. I.Ogata, Y. Mokoyama, "Residual stress on surface machined by wire electirc discharge", Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. 25(4) (1991) 273-278
2. 이상복, "MINITAB을 이용한 다구찌 기법 활용", 이레테크
3. 김창호, 최재찬, "방전가공, 형조방전 및 와이어 방전 가공의 완전한 활용법", 기전연구사

후기

본 연구는 산업기반기술개발과제(과제명 : 방전가공용 전극선의 성능평가방법 개선)로 산업자원부 기술표준원의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.