

코팅와이어가 와이어 방전가공 특성에 미치는 영향

임세환*, 김준현**, 김주현#

The effect of coating wire on the performance of wire electrical discharge machining

Se Hwan Lim*, Joon Hyun Kim**, Joo Hyun Kim#

ABSTRACT

The machining performance of wire electrical discharge machining(WEDM), such as cutting speed, surface roughness and straightness depend on the electrode, and the machining parameters are diverse and affect each other. Therefore operator must have a lot of experiences of the parameter for the better machining performance in WEDM.

An approach to minimize the time for determining of parameters setting is proposed. Based on the Taguchi method, the significant factors affecting the machining performance are determined. Types of electrodes are arranged at inner array in tables of orthogonal arrays so that we can estimate machining performances of each electrode. Coating wire shows better performances than brass wire in cutting speed but it produces poor surface roughness, and two wires shows similar performance in straightness

Key Words : wire electrical discharge machining(와이어방전가공), Taguchi method(다구찌 실험계획법), cutting speed(가공속도), surface roughness(표면거칠기), straightness(진직도)

1. 서론

산업기술의 발전에 따라 고정도, 고능률의 가공이 요구되고 있으며, 기계적 성질이 우수한 소재의 개발에 따라 특수가공의 연구가 활발해지고 있다. 이중 방전가공은 재료의 전기적 특성을 이용한 가공법으로 다른 가공법에 비해 난삭재에 대한 가공특성이 우수하고, 기계가공에서는 불가능한 형상의 가공이 가능하므로 기계, 전기, 전자 산업 등 다양한 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다.¹

와이어 방전가공은 공작물과 전극 사이에 방전 현상을 일으키며 이때 발생하는 열 및 압력을 이

용하여 공작물을 녹여 자르게 되며, 이때의 온도는 보통 2000~3000℃에 이른다.^{2, 3} 전극은 대개 0.5mm 이하의 매우 가는 와이어를 사용하기 때문에 잘못된 가공조건을 사용하면 와이어 단선이 일어나거나 가공이 진행되지 않는 경우가 발생할 수도 있다. 또한, 제조사나 기종 별로 제어하는 전기적 가공조건 및 특성이 서로 달라서, 처음 도입되는 기계마다 가공에 많은 영향을 미치는 제어 가능한 조건을 파악하고 각각의 수준을 정하여야 한다. 이 과정은 방전가공에 관한 풍부한 지식과 경험을 필요로 하기 때문에 매우 어렵고, 가공속도가 매우 느리기 때문에 많은 시간을 요구한다.

접수일: 2003년 5월 12일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
* 국민대학교 자동차공학전문대학원
** 국민대학교 기계자동차공학부
교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부
kim@kookmin.ac.kr Tel. (02) 917-0341

최적가공조건의 선정을 위해 주로 다구찌 실험 계획법(Taguchi Method)³, 분산분석(analysis of variance)³, 요인배치법(factorial-design method)⁴ 과 같은 여러 가지 실험계획법이 사용되고 있으며, neural networks⁵, simulated annealing algorithm⁶ 을 이용한 연구도 활발히 진행되고 있다.

실제 가공에서 사용되는 전극선 와이어의 종류가 다양하고, 보통 2~4 차의 정삭가공을 필요로 하지만 대부분의 연구에서는 황동와이어로 황삭가공만을 실시하고 있기 때문에 실제 가공에서 다른 와이어로 가공할 경우 바로 적용시키기 어렵다.

본 연구에서는 no load voltage, on-time, off-time, wire tension, water flow rate, offset 등의 가공조건과 와이어의 종류를 내측, 외측배열에 배치하여 각각의 인자가 가공성능에 얼마나 많은 영향을 주는지를 파악하고, 원하는 가공속도, 표면거칠기, 진직도 등을 얻을 수 있는 최적조건을 선정하고, 황동와이어와 코팅와이어의 최적조건과 가공특성을 비교해보고자 한다.

2. 배경이론

2.1 와이어 방전가공의 가공특성

(1) 가공속도

와이어 방전가공의 가공속도는 가공이송속도(mm/min)와 피가공물의 판두께(mm)의 곱으로 표시된다.

(2) 표면거칠기

가공면의 표면거칠기는 연속적으로 발생하는 방전에 의해 형성되는 방전흔의 크기에 의해 결정된다. 또한 방전흔의 크기는 방전에너지가 비례하여 커지게 된다. 본 실험에서는 Ra(중심선 평균 거칠기)를 측정하였다.

(3) 진직도(복현상)

일반적으로 넓은면을 가공할 때는 피가공물의 가공면 형상이 오목해지는 복현상(hand drum form)이 발생한다. 복현상의 발생원인은 다음과 같다.

- 가공 중 방전에 의한 반발력에 의해 와이어가 진동함으로 시편의 중심부 진폭이 최대가 된다.
- 시편의 중앙부가 방전에 의해 이온화되어 비저항 값이 상·하부에 비해 낮아지므로 방전이 더욱 쉽게 일어난다.
- 가공에 의한 칩이 중앙부에 남은 경우 2 차 방전에 의해서 중앙부가 더 많이 가공된다.

2.2 방전가공용 전극선

방전가공 중 전극선에는 일반적으로 가공 중 투입되는 에너지로 인한 고온과 가공액으로 인한 냉각의 반복에 의한 열적 부하, 펄스 방전에 의한 전기장의 형성·소멸, gap에서의 기포 팽창·소멸 등에 의한 진동, 가공 중 진동에 의해 공작물의 중간부분이 양끝보다 많이 가공되는 현상을 방지하기 위해 와이어에 가하는 장력 등의 부하가 가해진다. 따라서 전극선은 이러한 부하에 의한 단선이 일어나지 않아야 할 뿐만 아니라 방전효율이 높아야 한다.

2.3 다구찌 실험계획법

다구찌 실험계획법(Taguchi method)은 직교배열표를 이용하여, 각 인자의 SN 비에 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.

SN 비란 신호 대 잡음의 비율(signal-to-noise ratio)을 의미하는 것으로, 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향이 힘의 비율로서 나타내어지는 것이다.

본 실험에서는 특성에 맞게 정특성의 SN 비 2 종류가 사용되었다.¹¹

$$\text{망소특성의 경우 : } SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

$$\text{망대특성의 경우 : } SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

직교배열표에서 계산된 SN 비에 대한 분산분석으로 영향이 큰 설계변수를 찾아 SN 비를 최대한으로 하는 값을 최적 수준으로 결정하며, 큰 영향을 미치지 못하는 설계변수는 비용, 편리성을 고려하여 적절한 수준으로 결정한다.

가공속도는 높을수록 좋으므로 망대특성의 SN 비를 사용하였고, 표면거칠기(Ra)값은 낮을수록 좋으므로 망소특성의 SN 비를 사용하였다.

3. 실험장치 및 실험재료

3.1 실험장치

본 실험에서 사용한 와이어 방전가공기는 FANUC TAPE CUT W0L 모델로 본 기기의 세부사항은 Table 1 과 같다.

Table 1 Specification of electrical discharge machine

Description	Specification
Work tank size (mm)	320 X 450 X 150
Max weight of workpiece (Kg)	150
Y-axis table stroke (mm)	350
X-axis table stroke (mm)	200
Max feed rate of table (mm/min)	900
Wire diameter (mm)	0.05 ~ 0.3
Wire tension (g)	80 ~ 2,500
Wire feed rate (m/min)	0 ~ 10

3.2 실험재료

시험편은 KS D 3753(합금 공구 강재)에 규정된 STD11 을 사용하였다. STD11 은 냉간금형용 합금 공구강으로 고청정도 및 고품질, 우수한 내마모성, 균일한 조직, 고강도, 균일한 경도의 특징을 가지고 있어 프레스 금형 제작에 많이 사용되고 있으며, 방전절삭성이 뛰어나고 가공조건의 선택에 특별한 제약사항이 없기 때문에 가공목적에 따라 표면거칠기 또는 진직도(복현상)를 좋게 하는 가공 조건에서부터 최대가공속도를 내기 위한 가공조건에 이르기까지 선택의 폭이 넓다. 시험편의 두께는 60mm 로 하였으며, 켈칭 및 템퍼링 열처리하여 경도값 59 ~ 60 HRC 를 유지하였다. 실험에 사용된 전극선 와이어의 직경은 0.25mm 이고 각각의 특성치는 Table 2 에 나타나있다.

4. 실험방법 및 결과

와이어 방전가공은 표면거칠기, 진직도 등의 가공특성을 개선하기 위해 반복가공을 하는데, 이때 1차 가공을 황삭가공이라 하고, 2차 이상의 반복가공을 정삭가공이라 한다. 황삭가공은 가공물을 절단하는 가공으로 가공속도가 매우 느리고, 와이어 단선이 일어나거나 가공이 진행되지 않는 경우가 생길 수 있으므로 정삭가공보다 제어하기 어렵다. 정삭가공의 경우는 황삭가공과 같은 경로를 따라 가공하기 때문에 가공에는 큰 무리가 없으나, 표면거칠기와 진직도를 개선하기 위한 가공이므로 가공특성과 가공조건의 관계에 대한 이해가 필요하다.

같은 가공조건으로 가공하더라도 와이어의 종류에 따라서 가공특성이 서로 다르고, 각각의 최적조건이 다르므로 와이어의 종류를 하나의 인자로 선택하였다. 황삭가공의 실험에서는 와이어의 종류를 직교배열표의 내측배열에 배치하여 실험하였고, 정삭가공의 경우에는 외측배열에 배치하여 실험하였다.

4.1 황삭가공

황삭가공은 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 직교배열표(2· 3 수준 혼합형 직교배열표)에 따라 실험을 실시하였다. 제어인자는 pulse-on time, no load voltage, pulse-off time, wire tension, wire feed, water flow rate, wire 종류이고, 인자의 각 수준의 값은 가공이 가능한 범위에서 3 등분하여 선정하였으며 그 값은 Table 3 에 나타나있다. 와이어는 Heungil 의 HIB 황동와이어, OPEC 의 DRAGON-900 코팅와이어, Hando 의 X-cut 알루미늄 합금와이어를 사용하였다.

Table 2 Specification of electrode wire

Maker	Model	Base material	Coating material	Tensile strength (M/mm ²)	Electrical Conductivity IACS(%)
Heungil	HIB(HIMC)	Brass	-	900	19.5
OPEC	DRAGON-900	Brass	Zn alloy	900	22
Hando	X-cut	Brass with Al	-	900	23
Pungkuk	PAPS	Brass	-	900	21
Berkenhoff	SW-25X	Cu	Zn	500	81

Table 3 Experimental design (rough cutting)

level	on time	level	voltage	off time	tension	wire feed	flow rate	wire
1	7	1	90	8	600	8	10	HIB
		2	100	10	800	9	12	Dragon-900
2	8	3	110	12	1000	10	14	X-cut

시험편의 형상은 Fig. 1에 보여진다. 형상에 따른 가공속도와, 각각에 대한 최적조건이 어떤 차이를 보이는지 알아보기 위해서 3 가지 영역으로 나누어서 실험하였고, 표면거칠기는 C 영역의 상부에서 하부까지 5 구간으로 나누어 측정하였으며, 진직도는 C 영역의 가공이 시작하는 면부터 끝나는 면까지 2mm 간격으로 측정하였다.

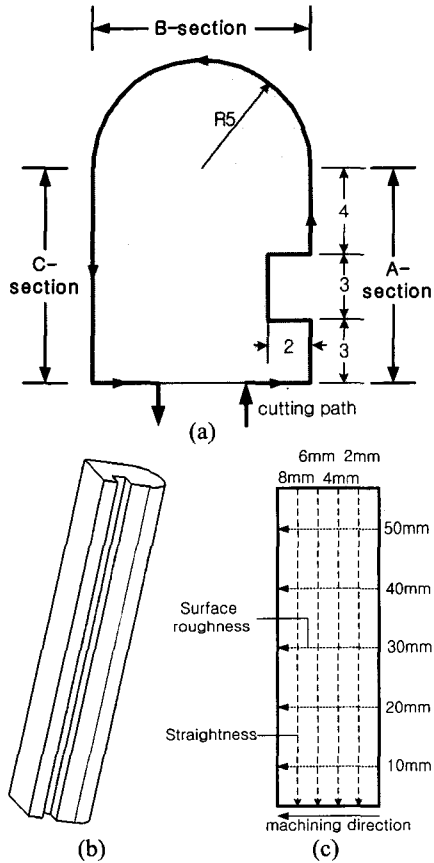


Fig.1 Dimension of specimen with rough cutting

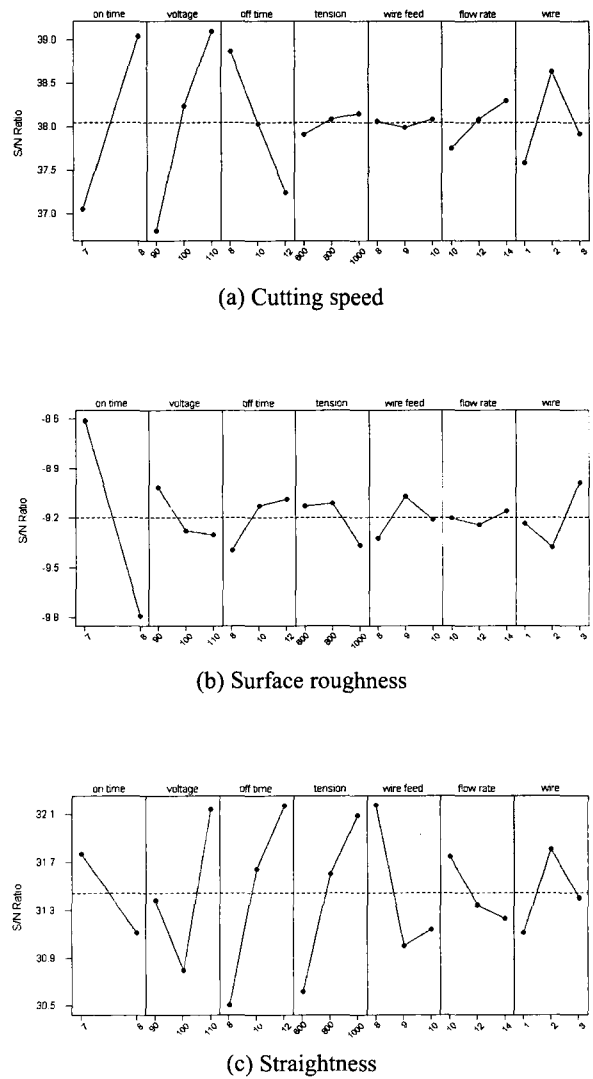


Fig. 2 Main effect plot for SN ratio (rough cutting)

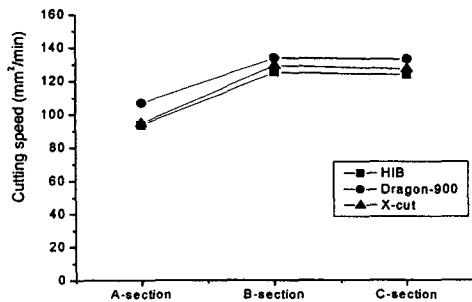
Fig. 2 는 직교배열법으로 얻어진 실험결과에 대해 SN 비를 분석한 결과이다. 가공속도와 표면 거칠기의 최적조건이 서로 상반되고, 진직도의 경우에는 전혀 다른 경향을 보이고 있다. 와이어의 SN 비를 비교해보면 가공속도와 진직도는 Dragon-900 > X-cut > HIB 이고, 표면거칠기는 X-cut > HIB > Dragon-900 이었다. Table 4 는 황삭가공에서 얻어진 최적조건이다.

Table 4 Optimal condition with rough cutting

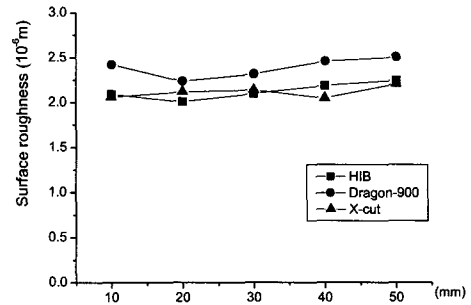
machining performance	on time	voltage	off time	tension	wire feed	flow rate
Cutting speed	8	110	8	1000	8	14
Surface roughness	7	90	12	800	9	14
Straightness	7	110	12	1000	8	10

Fig. 3 은 앞의 실험에서 선정된 최적조건으로 세가지 와이어에 대해 검증실험을 실시하고 그 때의 가공성능을 비교한 결과이다. 그래프의 x 좌표 값은 Fig. 1 의 (a), (c)에 나와있는 측정위치를 나타낸 것이다. 와이어 가공성능을 평가한 결과 Fig. 3 과 같이 가공속도와 진직도에 대해서는 Dragon-900 아연코팅와이어가 가장 좋은 결과를 보였고, X-cut 알루미늄 합금와이어가 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 이는 SN 비를 분석한 결과와 같은 경향임을 알 수 있다.

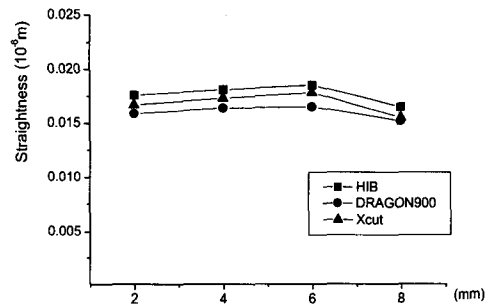
가공속도는 A 영역(코너부를 포함하는 평면), B 영역(반원을 그리는 곡면), C 영역(평면)으로 나누어 측정된 결과 B > C > A 순으로, 코너부를 많이 포함하는 형상일수록 가공속도가 느려짐을 알 수 있다.



(a) Cutting speed



(b) Surface roughness



(c) Straightness

Fig. 3 Verification of optimal condition with rough cutting

4.2 정삭가공

정삭가공은 황삭가공 이후 표면거칠기와 진직도를 개선하기 위해서 같은 면을 반복 가공하는 것으로 정도에 따라 2~4 차 가공을 한다. 가공조건의 선택에 따라 가공속도, 표면거칠기, 진직도의 변화가 많이 발생하므로 원하는 가공특성에 따라 각각의 조건을 선정하여야 한다. 이 실험은 12 개의 제어인자를 갖는 $L_{27}(3^{12})$ 의 직교배열표를 이용하여 27 번의 실험을 실시하였다. 2, 3 차 가공은 서로 독립된 가공을 하지만 좋은 가공성능을 얻기 위해서는 서로 연관되어 있을 것이라 생각하여 두 단계의 가공조건을 한 직교배열표에 배열하였다. 시편의 형상은 Fig. 4 에 나타내었다. 제어인자는 no load voltage, pulse-on time, pulse-off time, wire tension, water flow rate, offset 이고 인자의 각 수준 값은 가공이 가능한 범위에서 3 수준으로 선정하였으며 그 값은 Table 5 와 같다.

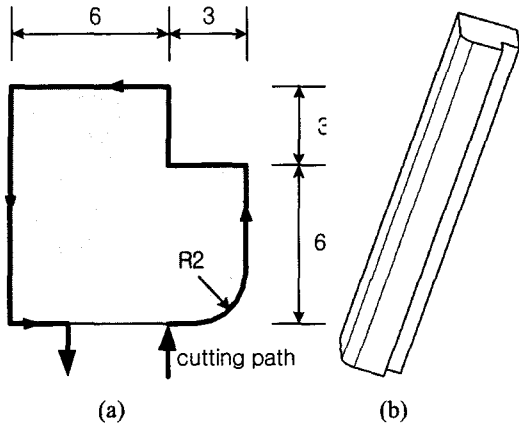


Fig. 4 Dimension of specimen with rough cutting

Table 5 Experimental design (finish cutting)

2nd	voltage	on time	off time	tension	flow rate	offset
1	100	3	4	1300	2	60
2	120	4	5	1400	3	70
3	140	5	6	1500	4	80
3rd	voltage	on time	off time	tension	flow rate	offset
1	160	0	3	1300	2	5
2	180	2	6	1400	3	10
3	200	4	9	1500	4	15

실험결과에 대한 SN 비의 분석결과는 Fig. 5~7 과 같다. 가공속도와 진직도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 2 차 가공에서의 no load voltage 와 on-time 으로 서로 상반된 경향을 보이고 있다, 표면 거칠기는 2 차 가공에서는 큰 차이를 보이지 않았고 3 차 가공의 on-time 에서 가장 큰 차이를 보였다. 두 와이어의 최적조건을 비교한 결과는 그림과 같이 유사한 경향을 보였다. 표면거칠기의 최적조건은 약간 다르긴 하지만 3 차 가공의 on-time 에 비해 다른 인자들의 영향이 너무 작기 때문에 중요하게 고려하지 않아도 될 것이라 생각된다.

정삭가공에서는 모든 와이어에 사용할 수 있도록 하기 위하여 가공성능의 차이가 가장 큰 두 와이어를 사용했으며, 두 와이어를 외측배열에 배치하여 최적조건을 선정하였다.

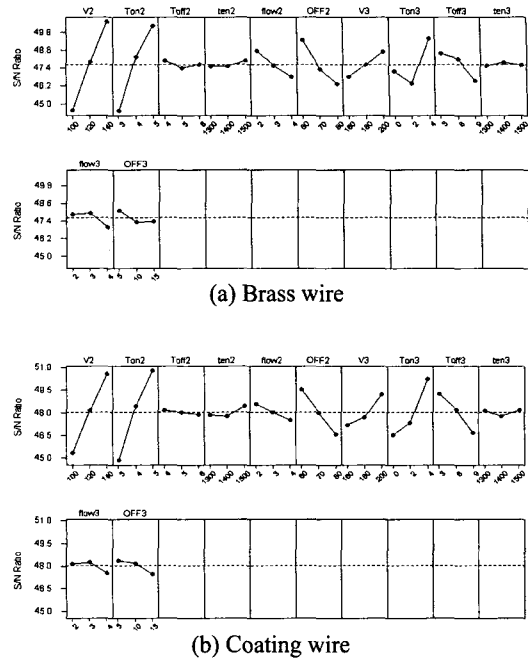


Fig. 5 Main effect plot for SN ratio (cutting speed)

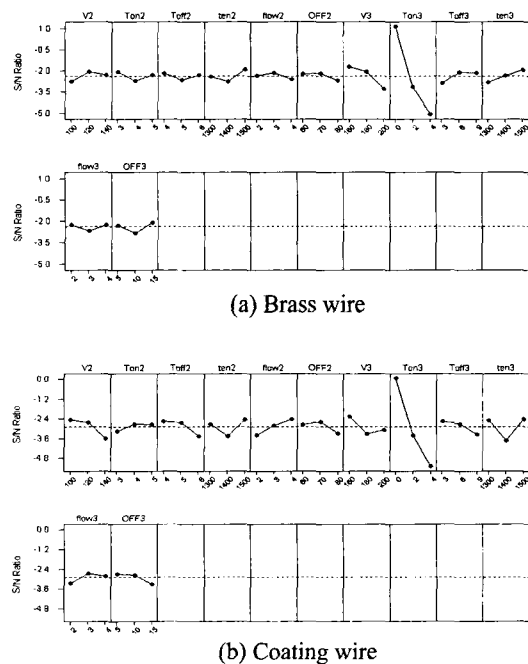


Fig. 6 Main effect plot for SN ratio (Surface roughness)

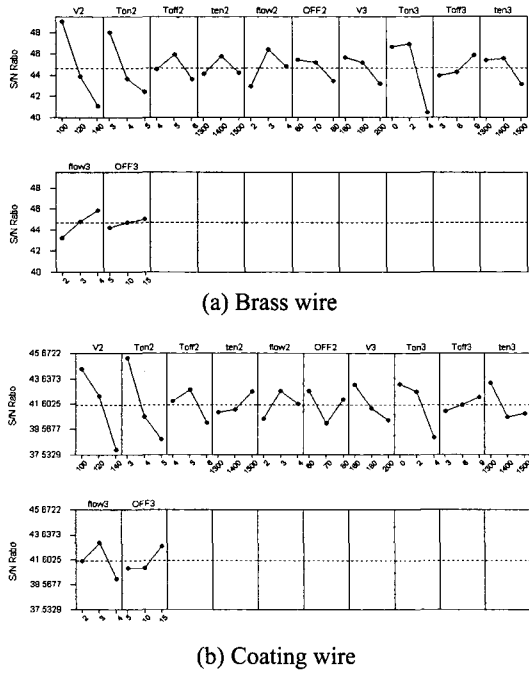


Fig. 7 Main effect plot for SN ratio (Straightness)

두 가지 와이어를 외측배열에 배치한 직교배열표에 의해 선정된 정상가공의 최적조건은 Table 6 과 같다.

Table 6 Optimal condition with finish cutting

2nd	voltage	on time	off time	tension	flow rate	off set
cutting speed	140	5	4	1500	2	60
surface roughness	120	5	4	1500	3	70
straightness	100	3	5	1400	3	60
3rd	voltage	on time	off time	tension	flow rate	off set
cutting speed	200	4	3	1300	3	5
surface roughness	160	0	6	1500	4	5
straightness	160	2	9	1400	4	15

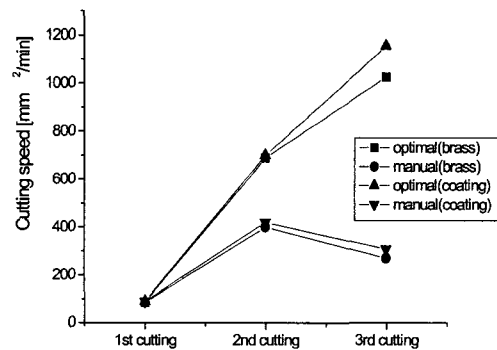
최적조건과 제조사에서 제공한 매뉴얼에 주어진 가공조건을 비교하기 위하여 검증실험을 실시하였다. 이 실험으로 와이어에 따른 가공특성의 차이를 보고, 가공조건표에 주어진 조건보다 얼마나 개선되었는지를 확인해보았다. 매뉴얼에 제시된 가공조건은 Table 7 과 같다.

Table 7 Machining parameter table in manual

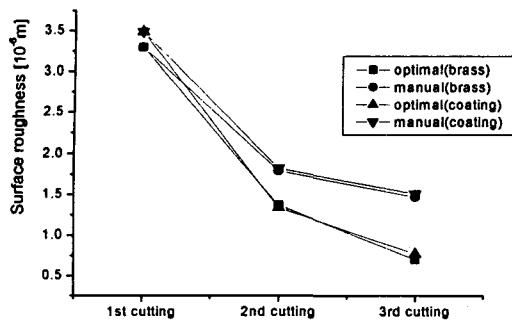
	voltage	on time	off time	tension	flow rate	offset
2nd	140	4	5	1500	2	70
	voltage	on time	off time	tension	flow rate	offset
3rd	180	2	5	1500	2	10

최적조건에 대한 검증실험결과는 Fig. 8 과 같다. 그림에서 manual 은 제조사에서 제공한 매뉴얼의 가공조건이고, optimal 은 실험으로 선정된 최적조건이다. 가공속도와 코팅와이어가 좋은 결과를 보였고, 황동와이어는 가공속도는 느리지만 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 진직도는 매뉴얼의 조건으로 가공할 때는 큰 차이를 보였지만, 최적조건으로 3 차 가공하였을 때는 거의 같은 값을 가졌다.

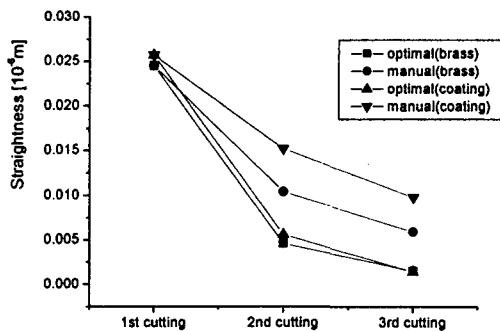
1 차 가공에서는 가공속도가 매우 느리고 표면 거칠기와 진직도가 상당히 나쁘지만 2 차 가공과 3 차 가공에서 모든 가공특성이 개선되었다.



(a) Cutting speed



(b) Surface roughness



(c) Straightness

Fig. 8 Verification of optimal condition with finish cutting

5. 결론

(1) 다구찌 실험계획법을 통해서 적은 실험횟수로 와이어 방전가공기의 최적조건 선정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 한 개의 직교배열표를 이용하여 가공속도, 표면거칠기, 진직도를 동시에 분석하였다.

(2) 황삭가공에서는 와이어의 종류를 하나의 제어인자로 배치하여 최적조건을 선정하고, SN 비를 통해 각각의 가공특성에 대한 와이어의 성능평가를 하고, 형상에 따른 가공속도를 비교하였다. 가공속도와 진직도에 대해서는 아연코팅와이어가 가장 좋은 결과를 보였고, 알루미늄 합금와이어는 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 검증실험의 결과와 SN 비를 분석한 결과와 같은 경향을 보였으므로 직교배열표의 내측배열에 와이어의 종류를 배치시켰을 때 가공특성에 대한 성능평가가 가능함을 알 수 있었다.

(3) 정삭가공에서는 2, 3 차 가공의 가공조건을 하나의 직교배열표에 배치하여 가공속도, 표면거칠기, 진직도에 대한 최적조건을 선정하였다. 황동와이어와 코팅와이어의 최적조건을 비교한 결과 두 와이어의 최적조건이 유사한 경향을 보였다. 검증실험에서는 최적조건과 매뉴얼에 주어진 조건을 비교하였다 코팅와이어를 사용하면 높은 가공속도를 얻을 수 있었고, 황동와이어로는 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있었다. 두 와이어 모두 매뉴얼에 주어진 조건보다 많이 개선됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김창호, 방전가공, 기전연구소, 1992
2. 이재명, 김원일, 이윤경, 왕덕현, 초경합금재 와이어컷 방전가공시 두께 변화에 따른 가공 특성, 한국정밀공학회 2000년도 춘계학술대회논문집, pp. 820-823, 2000
3. Liao, Y. S., Huang, J. T. and Su, H. C., A study on the machining parameters optimization of wire electrical discharge machining, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp.487-493, 1997
4. Scott, D., Boyina, S., Rajurkar, K.p., Analysis and optimization of parameter combination in wire electrical discharge machining, Int. J. Prod. Res., Vol. 29, No.11, pp.2189-2207, 1991
5. Spedding T. A. and Wang, Z. Q., Parametric optimization and surface characterization of wire electrical discharge machining process, Elsevier Science Inc., Vol. 20, No. 1, pp.5-15, 1997
6. Tarng, Y. S., Ma, S. C. and Chung, L. K., Determination of Optimal Cutting Parameters in Wire Electrical Discharge Machining, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 12, pp. 1693-1701, 1995
7. Ogata, I., Mokoyama Y., Residual stress on surface machined by wire electric discharge, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 25, No. 4, pp. 273-278, 1991
8. Suzuki, Y., Kishi, M., Improvement of surface roughness in wire EDM, Proceedings of the International Symposium for Electro Machining (ISEM-9), Nagoya, pp. 80-83, 1989

9. Levy, G. N., Maggi, F., WEDM machinability comparison of different steel grades, Ann. CIRP Vol. 39, No. 1, pp.183-185, 1990
10. 임영호, 특수가공, 기전연구사, 1990
11. 이상복, MINITAB 을 이용한 다구찌 기법 활용, 이레테크, 2001
12. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 2001
13. 성준경, 강명창, 황경현, 김정석, 금형강의 와이어 컷 방전가공시 방전조건과 가공특성, 한국정밀공학회 1996 년도 춘계학술대회논문집 pp.14-18, 1996