

와이어방전 가공시 최적 가공조건 선정에 관한 연구

김선진*, 성백섭**, 정성택***, 반재삼****, 조규재*****

* 서강정보대학, **목포대, ***조선대 대학원,****전남대 대학원, *****조선대학교

A Study on the Selections of Optimized Process Conditions in the Wire Electric Discharge

*S. J. Kim, **B. S. Sung, ***S. T. Jung, **** J. S. Ban,*****G. J. Cho

(*Seokang College,**Mokpo Univ.,***Chosun Univ.,****Chonnam Univ.,*****Chosun Univ)

ABSTRACT

The purpose of this study was to present the method to choose the optimization machining condition for the wire electric machine. This was completed by examining the ever-changing quality of the material and by improving the function of the wire electric discharge machine. Precision metal mold products and the unmanned wire electric discharge machining system were used and then applied in industrial fields. This experiment uses the wire electric discharge machine with brass wire electrode of 0.25mm. To measure the precision of the machining surface, average values are obtained from 3 samples of measures of center-line average roughness by using a third dimension gauge and a stylus surface roughness gauge. In this experiment, we changed no-node voltage to 7 and 9, pulse-on-time to 6 μ s, 8 μ s and 10 μ s, pulse-off-time to 8 μ s, 10 μ s and 13 μ s, and experimented on wire tension at room temperature by 1000gf, 1200gf, and 1400gf, respectively

Key Word : Variation of hand drum form(복량), Back-propagation(역전파)

1. 서론

와이어 방전가공은 동, 황동, 텅스텐 등의 와이어를 전극으로 하고, 공작물을 고정된 테이블을 NC 제어 서보 모터(Servo motor)의 구동에 의하여 2차원 방향의 이송을 주면서 와이어와 공작물과의 사이에 스파크(spark) 방전을 시키고 동시에 공작물을 요구하는 형상에 따라 가공하는 가공법이다.^{1~3)} 이는 난삭성 재료에 대한 가공성이 우수하고 공구로 사용되는 와이어의 직경이 매우 작아 미세한 형상도 정밀하게 가공할 수 있어 점차 적용범위가 확대될 것으로 기대된다.^{2~4)} 근래에 들어서 생산의 형태가 소품종 대량생산 형태에서 다품종 소량생산으로 이행하고 있으며 이러한 현상은 가공분야에서도 컴퓨터의 도입을 가속화시키고 있다. 특히 컴퓨터를 이용하여 공정설계를 자동화하기 위한 노력의 결과로 부품 최종형상의 모델링에 의해 공작기계에 지령을 내릴 수 있는 코드를 자동 생성해 주는 소프트웨어들이 개발되고 있다. 그러나 생산성 향상을 위해 공구경로와 공정계획 못지 않게 생산성에 중요한 영향을 미치는 실제 가공에 있어서의 가공조건을 자동적으로(또는 지능적으로)선정하는 방법은 아직도 실용화 단계에 이르지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 생산현장에서 금형 소재로 많이 사용되고 있는 합금공구강(STD-11)을

와이어 방전가공기를 이용해서 최적의 가공조건으로 만들어, 원가절감 무인화 등 생산성 향상을 도모하고자 하는 것이다.

2. 와이어 방전가공의 표면거칠기

와이어 방전 가공기는 와이어 전극계, 가공액 공급장치, 제어장치, 전원장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 와이어 방전가공기의 개략도 이다.

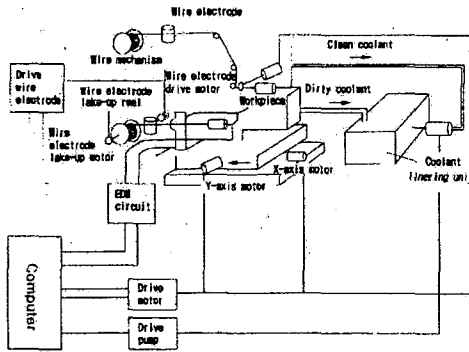


Fig. 1 Schematic diagram of wire-cut electronic discharge machine

시편의 재료가 다양할 경우 물을 이용한 와이어 방전가공에서는 일반적인 방전가공처럼 단순하지 않고 재료의 특성에 따라 여러 가지 전해작용을 받기 때문에 양자의 가공특성이 완전히 일치할 수 없지만, 이를 와이어 방전가공에 적용할 수 있다.⁽⁵⁻⁶⁾ 와이어 방전가공의 표면거칠기는 황동 와이어로 합금공구강을 가공시 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = K_m \cdot t^{-0.33} \quad (1)$$

일반적으로 가공 면의 표면거칠기는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_a = K_m \cdot t_{on}^{0.2} \cdot I_p^{0.5} \cdot m^{-0.15} \quad (2)$$

(단, m 은 시편의 물리상수($\rho c M^2 \sigma^{-2}$))

와이어 방전가공기와 같이 콘덴서 회로를 사용하는 경우는 콘덴서 용량 및 극간에 가해지는 전압이 커질수록 방전 흔적도 커지고 표면거칠기도 거칠어진다.

또 와이어전극 지름을 변화시키면 최대 표면거칠기 값도 변화된다.

3. 시험편제작 및 실험

실험에 사용된 시편은 C(1.5%)-Cr(13%)강인 합금공구강(STD-11)을 밀링 가공하여 열처리를 하였다. 높은 인장강도와 항복점은 담금질 상태로는 얻을 수 없고 뜨임에 의해서 미세한 입자의 2상으로된 조직일 때에 얻을 수 있다. 따라서 진공로(Abaripsen Industries CO, HR-20×24-1330)에서 1차 예열은 700℃에서 60분, 2차 예열을 900℃에서 90분간하고, 1030℃에 세팅(Seting)하여 120분 가열 후 질소(N₂)가스에서 가압 냉각하여 담금질 처리한 후, 180℃에서 240분간 가열한 후 공냉하여 뜨임 처리를 하였다.

실험에 사용된 합금공구강의 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. 열처리 후 평면 연삭기에 가공한 시편을 Fig. 2와 같이 와이어 방전가공시 열 영향을 받지 않도록 5mm의 간격을 두고, $\phi 12$ mm의 원형가공과 12×12mm의 정방형으로 가공하였다.

Table 1 Chemical compositions of alloy tool steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
1.49	0.22	0.28	0.24	0.017	0.14	11.49	0.88	0.26

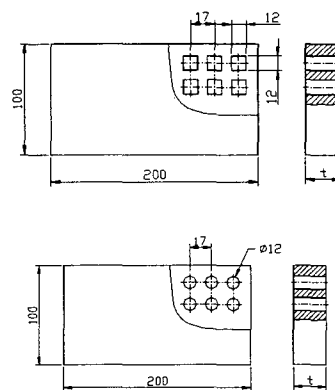


Fig.2 Detail view of specimen ($t = 10, 30, 50$ mm) 가공 실험은 와이어 방전가공기(Korea Fanuc W-0)를 이용하여 실험하였고, 와이어 전극은 $\phi 0.25$ mm의 황동선을 사용하였으며, 와이어와 시편은

수직이 되도록 조정하였다. 수직 조정시 상부와 하부 다이스 사이에 와이어를 걸어 수직조정 지그로 조정하여 설치하였다. 또한 인디케이트를 사용하여 시편 평행도를 측정하면서 고정하였다. 사용한 $\phi 0.25\text{mm}$ 의 황동 와이어전극의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2과 Table 3에 나타내었고, 가공액의 비저항치는 $2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 로 설정하고 수온은 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

Table 2 Chemical compositions of wire electrode (wt.%)

Property	Tensile strength	Elongation
Value	100 (kgf/mm ²)	2 (%)

Table 3 Mechanical properties of wire electrode

Property	Tensile strength	Elongation
Value	100 (kgf/mm ²)	2 (%)

본 실험의 방전가공 조건은 Table 4와 같으며 실온($18 \pm 1^\circ\text{C}$)에서 실험을 하였다. 가공개시 구멍은 밀링 작업 후 시편 형상 중심에 $\phi 4\text{mm}$ 드릴로 가공하였고, 정확한 데이터를 얻기 위하여 가공 1시간 전부터 예열하여 Table 4에 제시한 방전가공 조건들을 와이어가 가공개시 구멍에서부터 가공이 시작되면 서서히 변화시켜 와이어가 시편 형상을 가공하기 전에 실험조건으로 맞추어 실험을 수행하였다. 또한 와이어의 공급속도, 피크전류 및 테이블의 이송속도는 일정하게 유지시키면서 실험하였다.

Table 4 Process conditions of wire cutting test

No load voltage (100, 120V)	On time (μsec)	Off time (μsec)	Wire tension (gf)	
7, 9	6	8	1000, 1200, 1400	
		13	1000, 1200, 1400	
		18	1000, 1200, 1400	
	8	8	1000, 1200, 1400	
		13	1000, 1200, 1400	
		18	1000, 1200, 1400	
	10	8	1000, 1200, 1400	
		13	1000, 1200, 1400	
		18	1000, 1200, 1400	
	Servo voltage		32 (v)	
	Wire feed		10 (m/min)	
	Water flow pressure		15(kg/cm ²)	
Diameter of wire		$\phi 0.25(\text{mm})$		

4. 실험 및 고찰

4.1 직선가공시 표면거칠기 계산식

다중회귀분석 기법을 이용하여 직선가공시 표면거칠기를 예측하고 입력계수와 직선 가공시 표면거칠기 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 시편 두께 변화시 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 개발하였으며, 개발된 방정식들은 다음과 같다.

(1) 곡선방정식

$$10\text{mm} : Y_T = \frac{V^{7.596} T_{on}^{1.101}}{10^{5.55} T_{off}^{0.213} W_T^{0.348}} \quad (3)$$

$$30\text{mm} : Y_T = \frac{V^{7.655} T_{on}^{1.126}}{10^{5.203} T_{off}^{0.342} W_T^{0.451}} \quad (4)$$

$$50\text{mm} : Y_T = \frac{V^{7.789} T_{on}^{1.092}}{10^{5.277} T_{off}^{0.346} W_T^{0.458}} \quad (5)$$

(2) 직선 방정식:

$$10\text{mm} : Y_T = -72.435 + 10.26V + 1.402T_{on} - 0.24T_{off} - 0.00312W_T \quad (6)$$

$$30\text{mm} : Y_T = -63.461 + 9.618V + 1.196T_{on} - 0.361T_{off} - 0.00437W_T \quad (7)$$

$$50\text{mm} : Y_T = -62.747 + 9.612V + 1.211T_{on} - 0.387T_{off} - 0.00489W_T \quad (8)$$

Table 5는 개발된 수학적 모델의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석을 이용하였으며, 개발한 방정식들의 산출표준오차, 복합상관계수 그리고 결정계수를 보여준다. Table 5로부터 식(3~5)의 복합상관계수는 식(6~8)의 복합상관계수보다 높다는 것을 알 수 있다.

Table 5 Analysis of variance tests for mathematical models for surface roughness on square

No. of Equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
3	1.1099	0.995	99.0
4	1.1487	0.991	98.3
5	1.1353	0.993	98.6
6	1.7447	0.988	97.6
7	1.8071	0.985	97.1
8	2.1459	0.980	96.0

4.2 원형가공시 표면거칠기 계산식

원형가공시 표면거칠기와 입력변수 사이의 상호작용을 연구하기 위하여 다중회귀분석 통계적 방법을 이용하였으며, 개발된 방정식은 다음과 같다.

(1) 곡선방정식

$$10\text{mm} : Y_T = \frac{V^{6.398} T_{on}^{0.959}}{10^{4.217} T_{off}^{0.292} W_T^{0.327}} \quad (9)$$

$$30\text{mm} : Y_T = \frac{V^{6.28} T_{on}^{0.912}}{10^{4.1} T_{off}^{0.341} W_T^{0.304}} \quad (10)$$

$$50\text{mm} : Y_T = \frac{V^{6.306} T_{on}^{0.954}}{10^{4.016} T_{off}^{0.356} W_T^{0.348}} \quad (11)$$

(2) 직선 방정식:

$$10\text{mm} : Y_T = -71.218 + 10.57V + 1.433T_{on} - 0.331T_{off} - 0.00368W_T \quad (12)$$

$$30\text{mm} : Y_T = -65.092 + 10.017V + 1.297T_{on} - 0.397T_{off} - 0.00401W_T \quad (13)$$

$$50\text{mm} : Y_T = -64.434 + 9.966V + 1.377T_{on} - 0.426T_{off} - 0.00455W_T \quad (14)$$

Table. 6에서 식(9~11)의 복합상관계수는 식(12~14)의 복합상관계수보다 높다는 것은 Table 6으로부터 알 수 있다.

Table.5 Analysis of variance tests for mathematical models for surface roughness on circle

No. of Equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
9	1.1097	0.993	98.6
10	1.1174	0.992	98.4
11	1.1171	0.992	98.4
12	1.5482	0.991	98.2
13	1.7450	0.987	97.5
14	1.9728	0.984	96.8

4.2 역전파 신경회로망 모델 개발과 예측 분석

Fig. 3은 3개의 층(입력층, 은닉층 그리고 출력층)으로 구성된 역전파(Back-propagation) 신경회

로망을 나타내며, 본 연구에서는 많은 초기 실험과 훈련을 통하여 비교·분석하였으며 은닉층 상승시 오차가 크게 변화하지 않았음을 알 수 있었으며, 컴퓨터 처리시간을 생각하여 은닉층의 수를 고려하였다^(7~8). 입력과 출력 Node는 각각 입력 및 출력변수에 대응한다. 은닉 Node의 숫자는 네트워크의 구조를 결정하며, 역전파 알고리즘은 네트워크와 네트워크 변수의 조정을 통하여 목표값과 네트워크 출력값을 비교하여 편차를 역전파하므로 네트워크 학습에 사용된다.

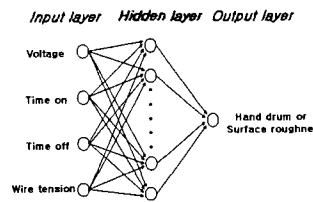


Fig 3 Block diagram of the training and estimation procedures for residual stresses using a neural network estimator

개발된 신경회로망의 알고리즘을 평가하기 위하여 신경회로망을 이용하여 예측한 직선 및 원형 표면거칠기 값과 실험값을 비교 분석하였으며, 신경회로망을 이용하여 예측한 값과 실험 값을 산포 그래프로 Fig. 4~Fig. 9에 나타내었다. Fig. 4~Fig. 9에 따르면 시편 두께가 10mm, 30mm, 50mm 증가시 신경회로망을 이용하여 예측한 값과 실험 값이 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig. 7~Fig. 9에 따르면 와이어 방전가공조건의 변화에 따라서 원형 표면거칠기가 변화함을 알 수 있었다.

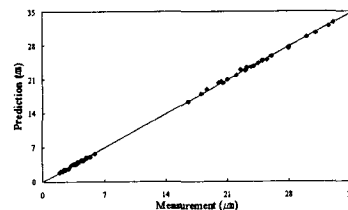


Fig. 4 Comparison of measured and calculated surface roughness square 10mm using neural network

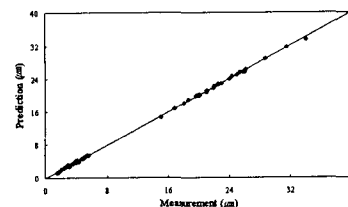


Fig. 5 Comparison of measured and calculated surface roughness square 30mm using neural network

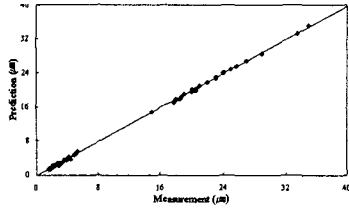


Fig. 6 Comparison of measured and calculated surface roughness square 50mm using neural network

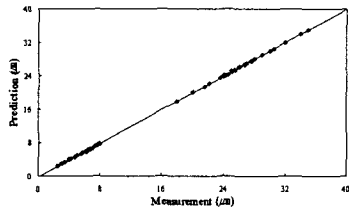


Fig. 7 Comparison of measured and calculated surface roughness circle 10mm using neural network

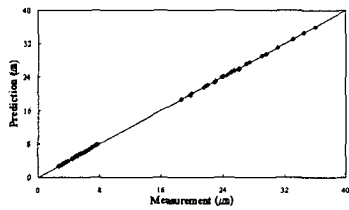


Fig. 8 Comparison of measured and calculated surface roughness circle 30mm using neural network

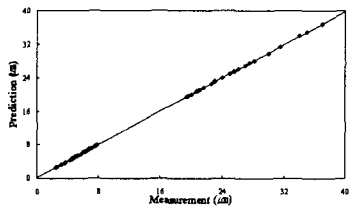


Fig. 9 Comparison of measured and calculated surface roughness circle 50mm using neural network

4.3 와이어 방전가공을 위한 최적 모델 선정

와이어 방전가공에서 최적의 가공조건 선정이 가장 중요한 요인이며, 이러한 목표를 달성하기 위해 최적의 수학적 모델 선정이 요구된다. Table 7에서 나타낸 바와 같이 추가적인 실험을 통하여 최적의 수학적 모델을 선정하고자 한다. 먼저 기존의 실험장비를 이용하여 추가적인 실험을 총 8회 실시하였다. 추가적인 실험을 통하여 얻은 실험결과를 이용하여 앞에서 개발한 직선방정식, 곡선방정식, 신경회로망을 이용하여 예측한 값과 실험값을 비교 분석하여 최적의 가공조건을 선정하였다.

Table. 7 Process parameters for additional experiment

No. of Experiment	Voltage	Time on	Time off	Wire tension
1	7	7	10	1100
2	7	7	15	1300
3	7	9	10	1300
4	7	9	15	1100
5	9	7	10	1300
6	9	7	15	1100
7	9	9	10	1100
8	9	9	15	1300

직선 및 원형가공시 주어진 표면거칠기에 최적의 가공조건을 선정하기 위하여 앞에서 개발한 직선방정식, 곡선방정식 마지막으로 신경회로망 모델을 이용하여 예측값과 추가적인 실험을 통하여 측정된 실험결과를 비교·분석 Fig. 10~Fig. 15에 나타내었다. Fig. 10~Fig. 12에 보는 것과 같이 실험 1~4에서는 개발된 방정식 비교적 잘 수렴하지만 실험 5~6에서 신경회로망 모델을 이용하여 예측한 직선 표면 거칠기 값이 직선 및 곡선방정식을 이용하여 예측한 값보다 정확함을 알 수 있었다. Fig. 13~Fig. 15의 최적의 원형 표면거칠기 모델 선정에 따르면 실험1~4와 8에서는 개발된 모델들로부터 예측값과 실험값이 잘 일치함을 알 수 있었으나, 실험 5~7에서는 직선 및 곡선방정식으로부터 예측한 값과 실험값이 상당한 오차가 존재함을 알 수 있었다. 하지만 신경회로망을 이용하여 예측한 표면거칠기 값이 직선 및 곡선방정식들을 통하여 계산한 데이터를 비교한 결과가 우수함을 Fig. 13~Fig. 15에서 알 수 있었다. 결론적으로 위와 같은 방법에 의하여 검증한 데이터를 가지고 데이터 베이스화 할 경우, 학습된 신경회로망 시스템을 산업현장에 응용하면 와이어 방전가공공정, 가공조건 및 재질의 변화 등을 신속하게 예측하여 불량 및 표면거칠기를 쉽게 예상할 수 있으므로, 다량의 생산품을 제작할 경우 품질 및 생산성 향상에 기여하고, 작업 시간 단축에 큰 도움을 줄 수 있다.

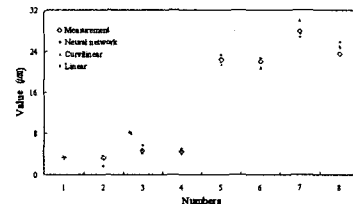


Fig. 10 Comparison of measured and calculation surface roughness square 10mm using neural network and multiple regression method.

5. 결론

와이어 방전가공기를 이용하여 주어진 가공조건에 따라 합금공구강을 가공하여 표면거칠기를 측정된 데이터를 수학적 방정식으로 비교·검증하고, 신경회로망에 학습시켜 가공조건에 따른 최적 모델을 개발한 결과를 정리하여 요약하면 다음과 같다.

1. 최적의 가공조건 선정을 위한 실험결과에 따른 표면거칠기 데이터를 신경회로망에 학습시켜 최적의 가공조건을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.
2. 개발한 수학적 방정식으로 얻은 계산값과 실험을 통하여 얻은 원형 및 직선의 표면거칠기 측정값을 비교·분석한 결과 계산값이 측정값에 90%이상 잘 일치하였다.
3. 신경회로망을 이용하여 개발된 시스템의 신뢰성을 평가한 결과 예측값과 측정값이 매우 잘 일치하였다.

참고문헌

1. 柳濟九, 放電加工, 大光書林, pp. 1~129, 1989.
2. 김창호, 放電加工, 機電硏究社, pp. 47~98, 1992.
3. T. Matsuo, E. Oshima, Kumamoto, "Investigation on the Optimum Carbide Content and Machining Condition for Wire EDM of Zirconia Ceramics", *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, 1992.
4. K. P. Rajurkar, "Technology and Research in EDM and ECM," In *ASME Fundamental Issues Mach*, 43, pp. 309-336 1990.
5. 濟藤長男, 와이야컷放電加工技術, 日刊工業新聞社, pp. 1~106, 1983.
6. D.F. Dauw, B.M. Schumacher, "Milestones of Worldwide EDM Research Activities", *Proc, ISEM-9*, 250, 1989.
7. L. Fauset, "Fundamentals of Neural Networks," Prentice Hall, 1994.
8. H. Takagi, "Fusion Technology of Fuzzy Theory and Neural Networks Survey and Future Directions," *Procs. of the Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks*, pp. 13-26, 1990.

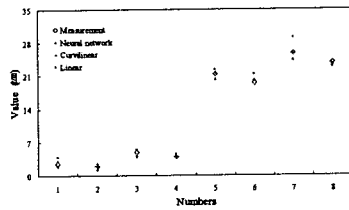


Fig. 11 Comparison of measured and calculation surface roughness square 30mm using neural network and multiple regression method.

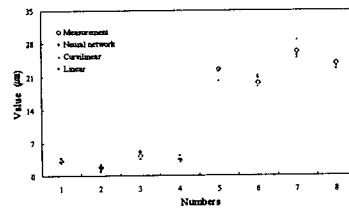


Fig. 12 Comparison of measured and calculation surface roughness square 50mm using neural network and multiple regression method

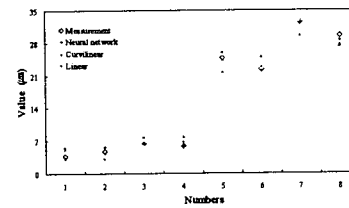


Fig. 13 Comparison of measured and calculation surface roughness circle 10mm using neural network and multiple regression method

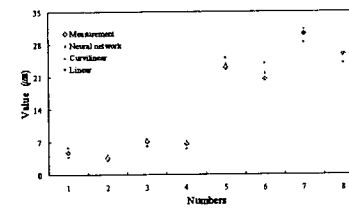


Fig. 14 Comparison of measured and calculation surface roughness circle 30mm using neural network and multiple regression method

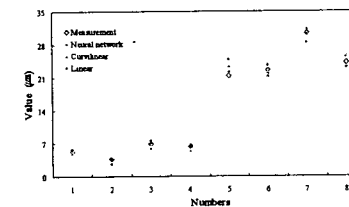


Fig. 15 Comparison of measured and calculation surface roughness circle 50mm using neural network and multiple regression method