

# 와이어 펄스전해가공에서 반응표면분석법을 응용한 미세박판의 홀 가공 최적 조건에 관한 연구

송우재\*, 이은상\*\*,#

\*인하대학교 대학원 재료공정공학과, \*\*인하대학교 기계공학과

## A Study on the Optimal Conditions of Hole Machining of Microplate by Application of Response Surface Methodology in Wire-Pulse Electrochemical Machining

Woo-Jae Song\*, Eun-Sang Lee\*\*,#

\*Graduate School of Materials and Machining Process Engineering, INHA UNIV., \*\*School of Mechanical Engineering, INHA UNIV.

(Received 15 July 2017; received in revised form 15 September 2017; accepted 20 September 2017)

### ABSTRACT

Due to the inaccuracy of micro-machining, various special processing methods have been investigated recently. Among them, pulse electrochemical machining is a promising machining method with the advantage of no residual stress and thermal deformation. Because the cross section of the wire electrode used in this study is circular, wire-pulse electrochemical machining is suitable for micro-hole machining. By applying the response surface methodology, the experimental plan was made of three factors and three levels: machining time, duty factor, and voltage. The regression equation was obtained through experiments. Then, by referring to the main effect diagram, we fixed the duty factor and machining time with little relevance, and solved the equation for the target 900 microns to obtain the voltage value. The results obtained from the response surface methodology were approximately those of the target value when the actual experiment was carried out. Therefore, it is concluded that the optimal conditions for hole processing can be obtained by the response surface methodology.

**Key Words** : Response Surface Methodology(반응표면분석법), Wire-PECM(와이어 펄스전해가공), Microplate(미세 박판), Dutyfactor(충격계수)

### 1. 서 론

STS304 미세박판은 내식성, 내열성, 용접성, 인성 등 우수한 장점 때문에 Shadow mask, Heat Exchanger, Lead Frame 등 첨단 부품의 재료로 사용되고 있다.<sup>[1,2]</sup>

하지만 기존의 기계적 가공 방식은 공정과정에서 열 변형과 잔류응력, 버(burr)가 발생하는 등 문제점이 발생한다. 또한 화학적 가공 방식도 언더컷(under cut)과 형상제어에 난해한 문제가 있다. 따라서 레이저, 초음파, 엔드밀, 전해연마와 같은 특수가공을 응용하는 공정이 연구되고 있다.<sup>[3,4]</sup> 그 중 와이어 펄스전해가공(Wire-Pulse Electrochemical Machining, Wire-PECM)은 잔류응력, 열 변형, 버가 발생하지 않고, 재료의 강도와 경도, 인성에 관계없이 가공이 가능하다는 장점이 있다.<sup>[5]</sup> 또 한

# Corresponding Author : leees@inha.ac.kr

Tel: +82-032-860-7308, Fax: +82-032-868-1716

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

와이어형태의 전극을 사용하게 되면 전류가 등방성으로 균일하게 퍼지는 성질 때문에 홀 가공이 균일하게 진행된다. 기존의 와이어 펄스전해가공에서는 백금(Pt)을 사용하였으나, 본 연구에서는 장력(tension)을 유지하기 위해 인장강도가 우수한 구리(Cu)를 사용하였다.

본 연구에서는 STS304 0.05t 박판에 와이어 펄스전해가공으로 반응표면계획법을 3인자 3수준으로 적용하여 실험하였다. 그리고 열교환기에 사용되는 900 $\mu$ m 홀 크기로 가공 할 수 있는 최적 조건을 찾는 것이 본 연구의 목적이다.<sup>[6]</sup>

와이어 펄스전해가공으로 실험에서 전압, 가공시간, 충격계수를 가공인자로 선택하였고, 통계프로그램을 이용해 행렬을 계산한 후 회귀방정식을 구하였다. 해석방법은 3가지 가공변수 중 가공영향이 적은 2개의 변수를 고정하고 회귀방정식을 풀어 최적 조건을 도출하였다.

## 2. 반응표면실험계획법 및 관련이론

### 2.1 반응표면실험계획법

반응표면분석은 여러 가지의 설명변수( $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ )가 복합적으로 실험결과에 작용되었을 때, 미지의 반응변수( $\eta$ )가 설명변수에 의해 어떠한 식으로 변화가 이루어지는 지에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 설명변수의 변화 값에 따라 반응변수가 반응표면 값을 가지게 되며, 이 반응표면을 통계프로그램을 이용해 통계적 모형으로 만들고 회귀방정식을 통해 함수로 표현하고자 하는 것이 반응표면실험계획법의 목적이다.<sup>[7]</sup> 즉, 해결할 문제에 대해서 실험을 어떻게 계획하고, 데이터를 어떻게 얻을 것이며, 얻은 데이터를 어떠한 방법으로 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는지를 계획하는 것이라고 할 수 있다. 그 중에 실험계획법으로는 중심합성계획법, 회전계획법 등이 있는데 본 연구에서는 중심합성계획법을 사용했다. 또한 결과 해석에서 실험값과 함수관계가 얼마나 유효한가를 판단하는 근거는 결정계수(Coefficient of determination,  $R^2$ )를 참고하였다.

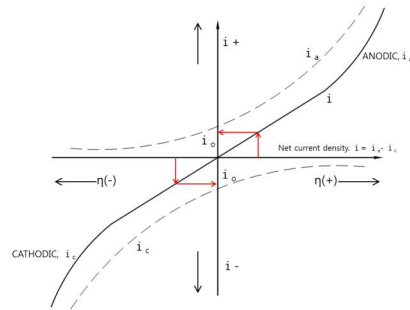


Fig. 1 Graph of Butler-Volmer Equation

### 2.2 버틀러-볼머 방정식

전기화학 가공에서 가공에 가장 큰 영향을 미치는 변수를 찾기 위해 사용한 버틀러-볼머 방정식은 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$i_{net} = i_0 [e^{-\alpha n F \eta / RT} - e^{(1-\alpha) n F \eta / RT}] \quad (1)$$

[ i : current density,  $\alpha$  : transfer coefficient,  $\eta$  : charge transfer overpotential,  $i_0$  : exchange current density, F : Faraday constant]

이 방정식은 전하 전달 과정이 속도를 결정하는 경우 가하는 전압에 따라 전류가 어떻게 변하는지를 보여준다. 과전압은

$$\eta \text{ (overpotential)} = E - E_{eq} \quad (2)$$

이므로, Fig. 1처럼 버틀러-볼머식의 그래프에서 전극 전위를 음의 값으로 변화시키면 괄호 안 앞의 항(환원)은 지수함수에 의해 증가하고, 뒤의 항

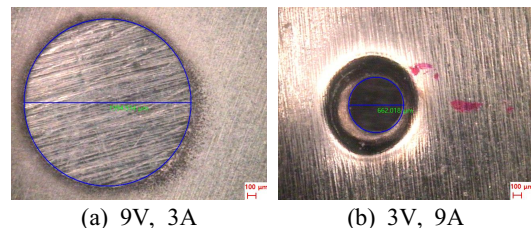


Fig. 2 Preliminary experimental results

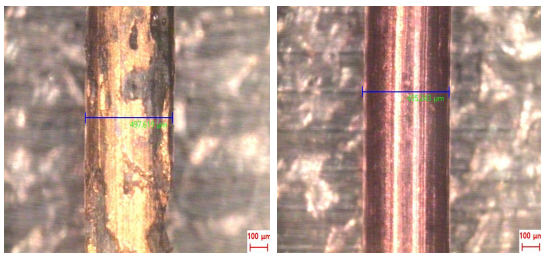
(산화)은 지수함수에 의해 감소한다. 반대로 전극 전위를 반대로 하면  $\eta$ 가 양의 값을 가지므로 결과

값은 반대로 나오게 된다. 즉 전류가 전압에 의해 변하는 것은 전압의 변화에 따라 전하 전달 단계에서 반응속도 상수가 변하기 때문이다. 따라서 전기화학 반응에서는 전류의 영향이 전압에 비해 상대적으로 작기 때문에 전류를 변수에서 제외했다. Fig. 2는 위의 이론과 실험결과가 일치하는지를 검증하기 위해 진행한 예비실험 사진이다. 예비실험은 직류 전원 공급 장치로 (a) 9V, 3A, 3분, (b) 3V, 9A, 3분간 진행하였다. 예비실험 결과 (a) 조건에서는 1994 $\mu\text{m}$  (b) 조건에서는 662 $\mu\text{m}$ 가 측정되었고, 실험결과에서도 전류보다 전압이 전기화학가공에서 큰 영향을 미친다는 결과를 얻었다.

### 3. 실험 및 결과

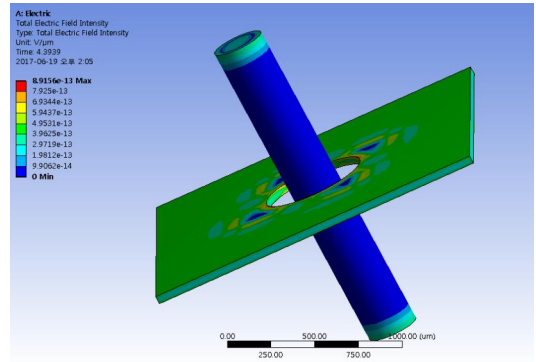
#### 3.1 와이어 펄스 전해가공

와이어 펄스전해가공공정은 기존의 펄스전해가공공정에 전극을 구리와이어로 대체한 공정이다. 원리는 펄스전해가공과 같이 가공물을 산화 (+)전극, 공구를 환원 (-)전극에 연결하고, 전류를 가하면서 전해액을 전극사이로 순환시키면 전기화학반응이 일어나 공작물로부터 금속이 이온 용출되는 원리로 공작물이 전극의 형상에 영향을 받는 비접촉식 가공법이다. 본 연구는 펄스 전원 공급 장치를 사용하였으며, 이 장치는 펄스전류를 발생시켜 가공하는 펄스전해가공은 안정된 전해액의 공급과 가스 발생으로 인한 열 발생을 줄여 높은 가공정밀도를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

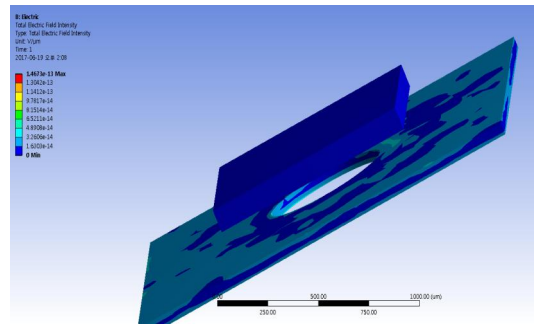


(a) Gold-plated tungsten Electrode (b) Copper electrode

Fig. 3 Electrode condition after processing



(a)



(b)

Fig. 4 Current density analysis using ANSYS

하지만 전극의 소모가 심하다는 단점이 있어 본 연구에서는 전극을 경제성이 우수한 구리 와이어로 대체하여 와이어 펄스 전해가공을 실시하였다.

Fig. 3는 (a) 금 도금 텅스텐 와이어, (b) 구리 와이어를 전극으로 사용한 후 전극의 사진이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 구리전극은 가공 후 전극의 소모가 적다는 것을 볼 수 있다. Fig. 4는 와이어 펄스 전해가공과 펄스전해가공의 전기장(V/m)을 ANSYS를 이용해 분석한 결과이다.

(a) 와이어 펄스 전해가공( $8.9 \times 10^{13} \text{V}/\mu\text{m}$ )이 (b) 펄스전해가공( $1.5 \times 10^{13} \text{V}/\mu\text{m}$ )보다 더 큰 전기장을 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 이는 와이어 방식이 홀 경계면에 홀 경계면에 직접적으로 영향을 미친다는 것을 보여주고 홀 가공에 적합한 가공방법임을 나타낸다.

### 3.2 와이어 펄스 전해가공 실험장치

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 와이어 펄스 전해가공 실험장치의 개략도이다. 펄스 전원 공급 장치(Pulse Power Supply)의 양극에 공작물인 STS304 박판을, 음극에는 전극 역할을 하는 구리(500 $\mu$ m)선을 연결하여 펄스 전류를 공급하였다.

마이크로 스테이지와 컨트롤러를 이용하여 홀 중앙에 구리선이 위치하도록 조절하였고, 펄스 전원 공급 장치로부터 펄스 전원을 공급하여 전해 용출이 원활하게 하였다. 또한 펄스 전원 공급 장치와 연결된 컨트롤러(NC Code)를 이용해 와이어 펄스 전기화학가공 실험 조건(전압, 가공시간, 충격계수)을 조절하였다. Fig. 6은 가공물과 구리전극 사이에 일어나는 반응의 개략도이다. 공작물 가운데에 약 650 $\mu$ m 크기의 홀이 뚫려있고 구리선(500 $\mu$ m)이 구멍으로 관통한다. 간극 사이에 전해액과 전류가 흐르면서 전기화학반응이 발생하며 가공이 된다. Fig. 7는  $\varnothing$ 500 $\mu$ m 타공기로 펀칭한 후 광학 현미경을 이용해 150배율로 측정한 사진이다. 타공 후 시편의 홀 크기는 최소  $\varnothing$ 600 $\mu$ m 최대  $\varnothing$ 700 $\mu$ m 인데 이 중에서 650의 약 10%의 오차에 해당하는  $\varnothing$ 645~655 $\mu$ m 크기의 시편만 실험에 사용하였다.

### 3.3 가공조건 및 실험 방법

와이어 펄스 전해가공 실험에서 고정변수는 전해액의 종류, 전극, 전해액의 온도, 간극, 전류이고 전압, 가공시간, 충격계수를 변화시키며 홀 크기를 측정하였다. 충격계수는 다음 식 (3)과 같다.

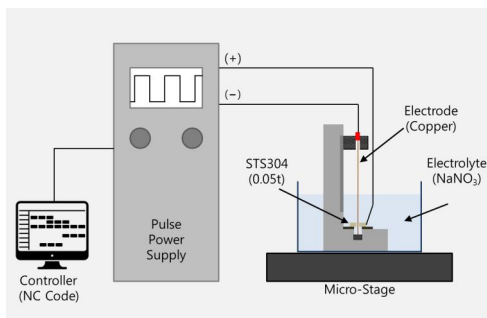


Fig. 5 Schematic of Wire-Pulse Electrochemical Machining system

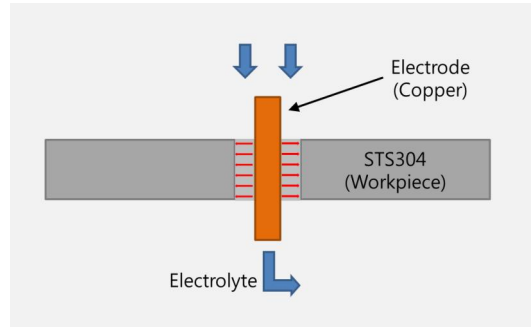


Fig. 6 Schematic of Wire-Pulse Electrochemical Machining mechanism

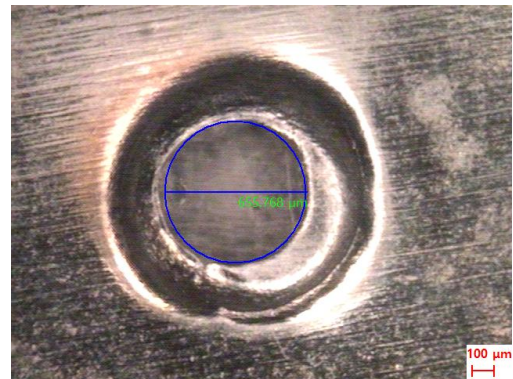


Fig. 7 Microscope image of STS304 after punching

Table 1 Fixed condition in Wire-PECM experiment

Parameter	Fixed value
Electrolyte	NaNO <sub>3</sub> + Glycerin + D.I Water
Current	3A
Electrode	Copper
Temperature	25 $^{\circ}$ C
Initial hole size	645~655 $\mu$ m

**Table 2 Parameter level for Wire-PECM experiment**

Parameter	Level		
	-1	0	1
Machining Time( $X_1$ ) (s)	60	180	300
dutyfactor( $X_2$ ) (%)	25	50	75
Voltage( $X_3$ ) (V)	5	9	13

$$Duty\ Factor = \frac{On\ Time(s)}{On\ Time(s) + Off\ Time(s)} \quad (3)$$

충격계수(dutyfactor)는 전류를 직류 공급이 아닌 On/Off를 통해 전류를 펄스로 공급하는 것인데, 전류가 공급되는 주기에서 얼마나 전류를 공급하는지 (On time)에 대한 시간비, 펄스폭에 대한 값을 나타낸 것이다.

Table 1, 2는 와이어 펄스 전해가공에서의 고정 변수와 가공 변수를 나타낸다.

실험 방법으로는 반응 표면 실험계획법 중 중심 합성 계획법(Central Composite Design, CCD)을 이용하였고, 실험계획법에 의해 20번의 실험을 진행하였다. 또한 Minitab을 이용해 실험해석에 필요한 그래프와 회귀방정식을 구하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 와이어 펄스 전해가공 실험결과 및 분석

본 연구는 반응표면실험계획법 중 3수준 3인자로 중심합성실험계획에 따라 실험하였다. 타공기로서편을 편칭하고 와이어 펄스전해가공으로 홀 가공을 진행한 후 각 가공변수와 홀 크기 사이에 회귀방정식을 구해 홀 크기에 대한 예측을 가능하게 하였다. Table 3는 실험결과로 대한 얻은 데이터이다. 식 (4),(5),(6)를 통해 선형변환을 -1, 0, 1로 변환하였고, 홀 크기는 각 조건 당 3회를 실시하여 광학현미경을 이용해 측정한 후 평균값을 데이터로 활용하였다.

$$X_1 = \frac{Machining\ Time(s) - 180}{120} \quad (4)$$

$$X_2 = \frac{Duty\ factor(\%) - 50}{25} \quad (5)$$

$$X_3 = \frac{Voltage(V) - 9}{4} \quad (6)$$

위 조건에 따른 결과를 분석하여 도출해 낸 2차 회귀방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y} = 1248.6 - 362.8x_1 + 145.9x_2 + 563.3x_3 - 138.7x_1^2 + 89.6x_2^2 + 86.46x_3^2 + 160x_1x_2 + 125x_1x_3 + 281x_2x_3 \quad (7)$$

위의 회귀 방정식은 각 가공변수가 선형 변환된 상태에서 도출한 식이고, 회귀 방정식에 대한 분산 분석표(Analysis of variance table, ANOVA table)는 Table 4에 나타나있다. 가공변수와 회귀식과의 상관 관계를 나타내는  $R^2$ (결정계수)는 1에 가까울수록 회귀방정식이 유의미하다고 볼 수 있다. 일반적으로 결정계수가 0.3 이상이면 유의미한 연구라고 가정했을 때, 와이어 펄스전해가공의 실험결과에서 얻은 회귀 방정식의  $R^2$ 는 0.966이므로 충분히 유의미한 결과이다. 또한 회귀모형의 적합성을 진단하는 방법으로서 실험값과 함수관계가 얼마나 유효한지를 나타내기 위해 잔차분석을 하였다. Fig. 8은 잔차분석 중 잔차와 종속변수 추정치 산점도이다. Fig. 8에서 '0'을 기준으로 위아래로 랜덤 하게 분포되어있는 것을 봤을 때 실험값과 회귀모형이 충분히 적합함을 보여준다.

Fig. 9는 반응표면분석법을 통해 얻은 3차원 표면도이다. Fig. 9는 (a), (b), (c)는 세 가지의 가공변수 중 각각 Dutyfactor, Voltage, Machining time를 고정 한 후 나머지 2가지 변수에 대한 Hole size 값을 3차원

표면도로 나타낸 것 이고, 이를 통해 상호간 가공 변수가 홀 크기에 어떠한 영향을 미치는지, 그리고 어떠한 가공변수가 큰 영향을 미치는지에 대해 알 수 있다. Fig. 9 그림에서 (c)의 Hole size가 가장 크게 나타나는 것을 봤을 때 전압이 가장 가공 변수임을 알 수 있다. 또한 Fig. 10의 분산분석을 통해 구한 주효과도에서는 전압이 가장 넓게 분포한 것을 봤을 때 전기화학가공에서 가장 큰 가공변수임을 보인다.

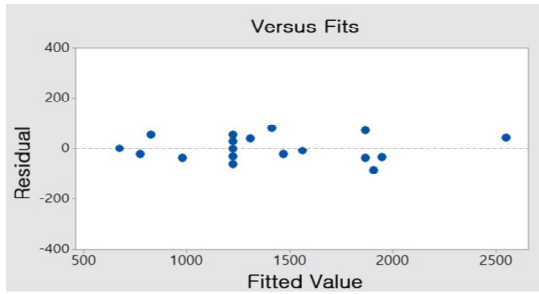


Fig. 8 Residual plot

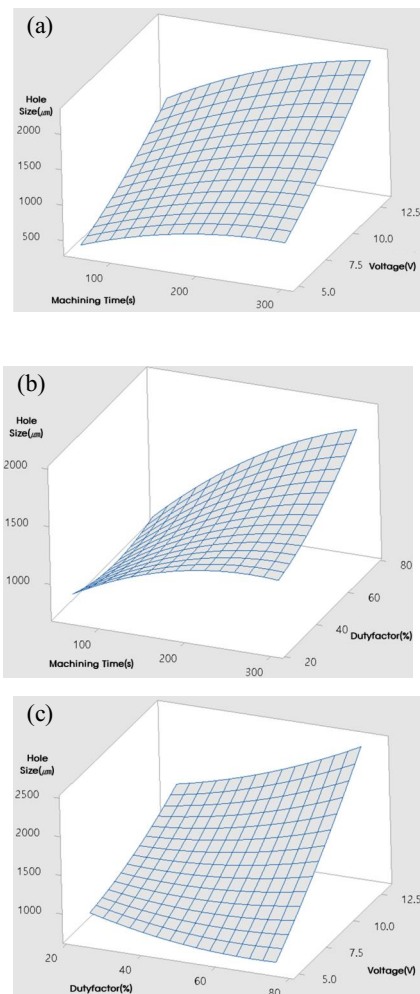


Fig. 9 Effect of (a) Machining time and Voltage (b) Machining time and Dutyfactor (c) Dutyfactor and Voltage for Hole size

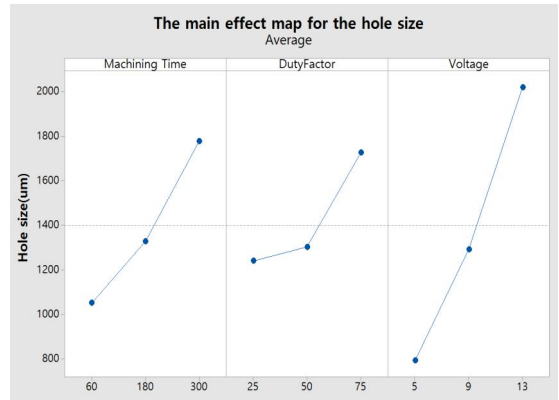


Fig. 10 The main effect map for the hole size

본래 반응표면실험계획법에서 최적조건을 찾기 위해서는 정상점을 구한 다음 정준분석을 통해 최대, 최소, 안부점(saddle point)결과의 값으로 최적조건을 도출해야 한다.<sup>[9]</sup> 하지만 본 연구의 목표는 900 $\mu\text{m}$  크기의 홀 크기를 얻는 것이 목표이므로 최대, 최소, 안부점에 해당되지 않아 정상점을 통한 방법으로는 최적조건을 도출할 수 없다. 따라서 와이어 펄스 전해가공에서 3개의 변수 중에 홀 가공에 미치는 영향을 적은 변수 2개를 찾은 후, 2개의 가공변수를 등고선도를 참고해 선정한 후 회귀방정식을 풀어 나머지 가공변수의 값을 도출하는 방법을 통해 최적조건을 도출하였다. 식 (1), Fig. 9, 10을 통해 전압이 가공에 미치는 영향을 알 수 있었다. 위에서 내린 결과를 토대로 Fig. 11에 적용하였다. Fig. 11은 선형 변환된 전압( $X_3$ )을 0으로 고정한 나머지  $X_1$ ,  $X_2$  인자들 간에 변화에 따른 홀 크기의 변화를 나타내는 등고선도이다.

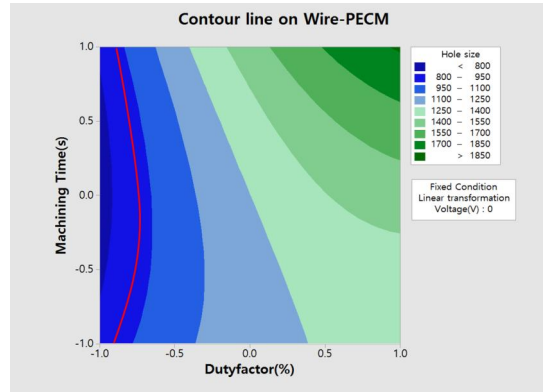
Fig. 11의 등고선도에 홀 크기 900 $\mu\text{m}$  값을 얻을 수 있는  $X_1$ (가공시간),  $X_2$ (충격계수) 빨간색 선으로 표시한 값에서 도출하였고, 계산의 효율을 높이기 위해 단일 회귀 방정식( $R^2=0.81$ ) 식(8)으로 대체해 단일 방정식을 풀어  $X_3$ (전압)값을 계산하였다. 자세한 계산과정은 다음과 같다.

**Table 3 Parameter level for Wire-PECM experiment**

Exp. Number	Linear transformation			Experiment measured
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Hole size(μm)
1	-1	-1	-1	670
2	-1	0	0	937
3	-1	1	1	1548
4	0	-1	0	1346
5	0	0	1	1824
6	0	1	-1	745
7	1	-1	1	1906
8	1	0	-1	962
9	1	1	0	1689
10	0	0	0	1250
11	1	0	0	1441
12	0	1	0	1561
13	0	0	1	1933
14	1	1	1	2587
15	0	0	0	1220
16	0	0	0	1218
17	0	0	0	1160
18	0	0	0	1275
19	0	0	0	1220
20	0	0	0	1188

**Table 4 ANOVA table for hole size**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	4973196	4973196	552577	31.34	0
Linear	3	4120978	3835051	1278350	72.51	0
Square	3	137721	87123	29041	1.65	0.24
Interaction	3	714497	714497	238166	13.51	0.001
Residual Error	10	176305	176305	17631		
Lack of Fit	3	161823	161823	553941	26.07	0
Pure Error	7	14482	14482	2069		
Total	19	5149501				



**Fig. 11 The contour line Wire-PECM**

Fig. 11의 등고선도의 빨간선을 참고하여  $X_1=-0.5$ ,  $X_2=-0.7$ 라고 가정 했고 Y값에 본 연구의 목표인 900μm 값을 대입하여 식 (8)의 방정식을 풀었다.

$$Y(\text{Hole size } 900\mu\text{m}) = 1293.0 + 297.8X_1 + 180.4X_2 + 582.2X_3 \quad (8)$$

식(8)을 통해  $X_3$ (전압)의 값을 구하면,  $X_3=-0.20$ 가 나오고, 선형변환의 과정을 거쳐 전압의 최적 조건을 구해서 8.2V라는 결과를 얻었다. 단일 회귀 방정식에서 위에서 도출한 최적조건( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ )을 와이어 펄스전해가공에 적용하게 되면 가공시간 120sec, 충격계수 32.5%, 전압 8.2V에서 홀 크기 900μm가 얻어 진다는 결론을 도출했다. 이를 증명하기 위해 위에서 구한 3가지 최적 가공변수를 와이어 펄스전해가공에 적용하여 10회 진행 한 결과, 평균 홀 크기 값 885.7μm를 얻을 수 있었다. Fig. 12은 반응표면실험계획법으로 얻은 가공변수를 와이어 펄스 전해가공에 적용하여 가공 후 얻은 855.7μm에 근사한 시편을 광학현미경으로 측정 한 사진이다.

즉, 홀 가공에서 효과가 상대적으로 작은 가공 변수를 고정하고, 목표치인 홀 크기를 입력한 후 반응표면실험계획법으로 구한 단일 방정식을 계산 한다면 목표였던 900μm의 홀 크기를 얻는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

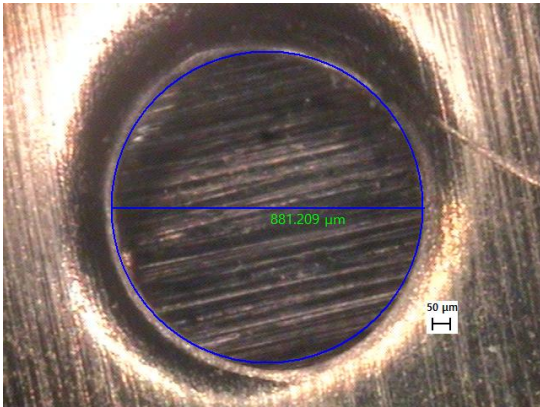


Fig. 12 Microscope image of STS304 after RSM

이를 통해 반응표면실험계획법을 이용한다면 원하는 홀 크기에 대한 최적조건을 선정할 수 있다는 결론을 얻었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 와이어 펄스 전해가공의 관련 이론을 설명하고 반응표면실험계획법을 이용해 열교환기에 사용되는 홀 크기인 900μm에 대한 최적조건을 찾는 것을 목표로 하였다. 위 실험의 3가지 변수에 대한 실험결과와 버틀러-볼머식을 비교해 전기화학가공에서 전압이 가공에 세기에 영향을 주는 변수임을 검증하였다.

와이어 펄스 전해가공에서는 Minitab을 사용해 전압을 9V 고정된 등고선도를 홀크기 900μm에 근접하도록 가공시간과 충격계수 참고 한 후 단일 회귀방정식(결정계수,  $R^2=0.81$ )을 이용해 계산한 결과 가공시간 120sec, 충격계수 32.5%, 전압 8.2V에서 900μm을 얻을 수 있음을 증명하였다. 반응표면실험계획법으로 도출된 최적 조건을 토대로 와이어 펄스 전해가공을 적용해 10번 실험한 결과 평균 885.7μm의 홀 크기가 얻어졌다.

따라서 반응표면실험계획법을 응용해 실험계획을 구성하고 가공변수간의 우선 상관관계를 파악해 와이어 펄스 전해가공을 진행한다면, 적은 실험횟

수로 목표로 하는 홀 크기를 얻을 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2015R1A2A1A15054116).

## REFERENCES

1. D. Kaczorowski, P. Combrade, J. Ph, A Beaudim, C. Crenn, "Water chemistry effect on the wear of stainless steel in nuclear power plant," Tribology International, Vol 39, Issue 12, pp. 1503-1508, 2006
2. Lee, E. S., Park, J. W. and Moon, Y. H., "Machining of Micro Grooves using Hybrid Electrochemical Processes With Voltage Pulses," J. of KSMPE, Vol. 20, No. 9, pp. 32-39, 2003.
3. Yang, B. Y., Kim, S. H., Choi, S. K., Choi, W. K., Chun, K. H., Lee, E. S., "A Study on Processing Shape and Overcutting of Invar Sheet by Pulse Electrochemical Machining," J. of KSMTE, Vol. 24, No. 3. pp. 314-319, 2015.
4. Cho, C. R., Baek, S. Y., Lee, E. S., "A study of electrochemical micromachining with voltage pulses.", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, pp. 356-361, 2003.
5. Hong, S. S., Kim, B. H., Chu, C. N., "Tungsten Wire Micro Electrochemical Machining with Ultra Short Pulses.", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 6. pp. 105-112. 2007.
6. Shalini Mohanty, Ankan Mishra, B.K. Nanda, B.C. Routara., "Multi-objective parametric optimization of nano powder mixed electrical discharge machining of AlSiC<sub>p</sub> using response



surface methodology and particle swarm optimization,” Alexandria Eng. J, 2017.

7. Shin, M. j., Lee, E. S., “A Study on Characteristic for Micro-Electropolishing of Nitinol Shape Memory Alloy using Response Surface Methodology,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, pp. 499-504, 2006.
8. Oh, S. M., Electrochemistry Vol 2, Free academy , pp. 84-91, 2014.
9. Kwak, J. S., “Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.45 pp. 327-334, 2007