

반응표면 분석법을 이용한 Pleated Type Filter의 용접조건 최적화에 관한 연구

Welding Parameters Optimization of Pleated Type Metallic Filter Using response surface methodology

박형진*, 강문진*, 최병구*, 이세현**

* 한국생산기술연구원

** 한양대학교 기계공학부

ABSTRACT This study is to optimize the condition of pulse parameters using the response surface method in micro pulse TIG welding of pleated type metallic filter. The input parameters used were pulse current, base current, pulse duty, frequency and welding speed) and the hydraulic pressure was used as the output parameter. The central composite design was designed using second order regression model. As the results, the optimal welding condition to manufacture the pleated type metallic filter was obtained.

1. 서 론

Pleated Type Metallic Filter는 주로 석유화학용 그리고 섬유 및 복합화학 제품의 원료인 나프타 등의 반제품을 고순도의 원료로 생산하는데 사용한다. 이러한 Pleated Type Metallic Filter는 석유화학 공장 및 섬유공장에서 제품의 품질을 결정하는데 중요한 부품의 하나이다. Filter의 특성상 고온, 강산성의 원료를 생산하는데 사용되며 원료의 입력측에 대하여 출력측의 압력의 차가 거의 100bar 이상의 고압환경에서 사용되기 때문에 열적 파손과 압력에 의한 파손은 불가피하므로 Pleated Type Metallic Filter의 용접부가 filter 품질에 가장 중요한 요인으로 작용한다.

이러한 용접부의 품질은 많은 인자들이 서로 연관되어 작용하므로 양호한 용접 품질을 얻는 일은 쉽지 않다. 적은 실험으로 최적의 용접 품질을 나타낼 수 있는 용접 공정 모델을 사용하여 양호한 용접 품질을 얻는 최적 용접 조건을 찾을 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 Pleated Type Metallic Filter 용접부의 Micro Pulse TIG 용접에서의 최적 조건을 구하기 위해 반응표면분석법을 이용하여 용접 품질을 양호하게 하는 최적 조건을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 반응표면분석법

반응 표면 분석(response surface analysis)은 여러 개의 인자 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 종속변수 η 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

종속변수 η 를 최적화 시키기 위해서 반응표면이 회귀분석방법에 의하여 추정되었으므로 반응표면 모형은 식(1)과 같이 2차 회귀 모델(regression model)을 설정하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, 본 연구에서는 x_i 는 입력변수들의 coded unit이고, y 는 출력변수이며, 위 회귀 모델식(1)을 구하기 위해서 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 이용하여 실험결과 값을 얻었다.

3. 실험

3.1 실험 계획법

본 실험에서는 2차 회귀 모형을 이용하여 반응량의 곡면적인 변화를 감지하기 위해 중심점(center Point)과 축점(axial points)을 2^k 요인 실험에 추가시킨 중심 합성 계획(central composite design)을 세워 실험을 수행하였다.

일반적으로 Micro Pulse TIG 용접 공정의 경우, 용접 품질을 결정지을 수 있는 여러 제어인자와 외부 환경 조건이 있다. 이러한 인자로는 pulse current, base current, pulse duty, frequency, welding speed, arc length, torch angle 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 pulse current, base current, pulse duty, frequency, welding speed를 입력 변수로 설정하였으며, 출력변수로는 Fiter의 품질을 판단할 수 있는 용접부가 견딜 수 있는 hydraulic pressure으로 선정하였다. Arc length 와 torch angle은 Table1에서와 같이 고정시켰다.

Table 1. Factors and levels for experimental design

| Level | Pulse Current | Base Current | Pulse Duty | Frequency | Welding Speed | Arc Length | Torch Angle |
|--------|---------------|--------------|------------|-----------|---------------|------------|-------------|
| | (A) | (A) | (%) | (Hz) | (cm/s) | (mm) | (degree) |
| -1.682 | 11.6 | 1 | 13.1 | 1.6 | 0.06 | 0 | 60 |
| -1 | 15 | 3 | 20 | 5 | 0.2 | | |
| 0 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | | |
| 1 | 25 | 9 | 40 | 15 | 0.6 | | |
| 1.682 | 28.4 | 11 | 36.8 | 18.4 | 0.74 | | |

3.2 실험 결과

중심 합성 계획을 통해서 설계된 실험계획법과 중심 합성 계획법에 따른 47회에 용접을 2회 반복 수행한 후 얻어진 각 응답은 Table 2 와 같다.

pulse current, base current, pulse duty, frequency, welding speed의 입력 변수로부터 얻어진 출력변수 hydraulic pressure와의 2차 회귀식은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
 P = & 14013 + 0.07x_1 + 0.63x_2 + 2.01x_3 + 1.81x_4 - 32.53x_5 \\
 & - 9.71x_1^2 - 3.87x_2^2 - 4.4x_3^2 - 2.99x_4^2 - 16.9x_5^2 \\
 & - 1.06x_1x_2 - 0.19x_1x_3 - 1.06x_1x_4 - 1.31x_1x_5 \\
 & - 2.38x_2x_3 - 0.0x_2x_4 + 0.87x_2x_5 + 1.75x_3x_4 \\
 & - 0.38x_3x_5 - 1.75x_4x_5
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Table 2. central composite design and experimental result

| No | Factors | | | | | Hydraulic Pressure 1 (mmHgO) | Hydraulic Pressure 2 (mmHgO) |
|----|-------------------|------------------|----------------|----------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Pulse Current (A) | Base Current (A) | Pulse duty (%) | Frequency (Hz) | Welding Speed (cm/s) | | |
| 1 | 15 | 3 | 20 | 5 | 0.2 | 132 | 133 |
| 2 | 15 | 3 | 20 | 5 | 0.6 | 60 | 63 |
| 3 | 15 | 3 | 20 | 15 | 0.2 | 128 | 130 |
| 4 | 15 | 3 | 20 | 15 | 0.6 | 61 | 60 |
| 5 | 15 | 3 | 40 | 5 | 0.2 | 130 | 128 |
| 6 | 15 | 3 | 40 | 5 | 0.6 | 68 | 67 |
| 7 | 15 | 3 | 40 | 15 | 0.2 | 140 | 135 |
| 8 | 15 | 3 | 40 | 15 | 0.6 | 81 | 77 |
| 9 | 15 | 9 | 20 | 5 | 0.2 | 139 | 138 |
| 10 | 15 | 9 | 20 | 5 | 0.6 | 68 | 65 |
| 11 | 15 | 9 | 20 | 15 | 0.2 | 138 | 139 |
| 12 | 15 | 9 | 20 | 15 | 0.6 | 71 | 67 |
| 13 | 15 | 9 | 40 | 5 | 0.2 | 133 | 137 |
| 14 | 15 | 9 | 40 | 5 | 0.6 | 61 | 63 |
| 15 | 15 | 9 | 40 | 15 | 0.2 | 140 | 138 |
| 16 | 15 | 9 | 40 | 15 | 0.6 | 84 | 86 |
| 17 | 25 | 3 | 20 | 5 | 0.2 | 133 | 133 |
| 18 | 25 | 3 | 20 | 5 | 0.6 | 55 | 57 |
| 19 | 25 | 3 | 20 | 15 | 0.2 | 136 | 134 |
| 20 | 25 | 3 | 20 | 15 | 0.6 | 37 | 59 |
| 21 | 25 | 3 | 40 | 5 | 0.2 | 139 | 140 |
| 22 | 25 | 3 | 40 | 5 | 0.6 | 65 | 63 |
| 23 | 25 | 3 | 40 | 15 | 0.2 | 142 | 139 |
| 24 | 25 | 3 | 40 | 15 | 0.6 | 72 | 69 |
| 25 | 25 | 9 | 20 | 5 | 0.2 | 133 | 137 |
| 26 | 25 | 9 | 20 | 5 | 0.6 | 66 | 68 |
| 27 | 25 | 9 | 20 | 15 | 0.2 | 127 | 131 |
| 28 | 25 | 9 | 20 | 15 | 0.6 | 75 | 70 |
| 29 | 25 | 9 | 40 | 5 | 0.2 | 139 | 136 |
| 30 | 25 | 9 | 40 | 5 | 0.6 | 60 | 63 |
| 31 | 25 | 9 | 40 | 15 | 0.2 | 134 | 135 |
| 32 | 25 | 9 | 40 | 15 | 0.6 | 65 | 63 |
| 33 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 132 | 131 |
| 34 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 135 | 133 |
| 35 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 134 | 137 |
| 36 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 135 | 134 |
| 37 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 135 | 135 |
| 38 | 28.4 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 131 | 130 |
| 39 | 11.6 | 6 | 30 | 10 | 0.4 | 108 | 100 |
| 40 | 20 | 11 | 30 | 10 | 0.4 | 133 | 137 |
| 41 | 20 | 1 | 30 | 10 | 0.4 | 139 | 135 |
| 42 | 20 | 6 | 46.8 | 10 | 0.4 | 135 | 136 |
| 43 | 20 | 6 | 13.2 | 10 | 0.4 | 134 | 133 |
| 44 | 20 | 6 | 30 | 18.4 | 0.4 | 138 | 135 |
| 45 | 20 | 6 | 30 | 1.6 | 0.4 | 139 | 135 |
| 46 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.74 | 60 | 63 |
| 47 | 20 | 6 | 30 | 10 | 0.06 | 138 | 134 |

식(2)의 2차 회귀 모델의 타당성은 분산 분석의 F검정과 결정계수에 의해서 판단 할 수 있고 또한 결정계수 값에 의해서 반응표면모델에 의해 설명되어진 반응 데이터의 크기를 알 수 있다.

실험에서 얻은 2차 회귀식에 대한 결정계수 값(coefficient of multiple determination)은 0.96 이다. 곧, Hydraulic Pressure 총 변동의 96%가 회귀식에 의해서 설명되어지는 것을 알 수 있다.

Table 3. Analysis of variance for the regression model of Hydraulic Pressure

| source of variance | degree of freedom | sum of squares | mean squares | F ₀ |
|--------------------|-------------------|----------------|--------------|----------------|
| regression | 20 | 50114.7 | 2505.73 | 31.53 |
| error | 26 | 2066.3 | 79.47 | |
| total | 46 | 52180.9 | | |

입력변수의 최적조건을 알기 위해서 격자 탐색법을 이용하여 구한 입력변수의 최적 조건은 Table 4 와 같다.

Table 4. optimal response condition

| values | Pulse Current | Base Current | Pulse Duty | Frequency | Welding Speed |
|----------------|---------------|--------------|------------|-----------|---------------|
| | (A) | (A) | (%) | (Hz) | (cm/s) |
| Coded values | 0.068 | -0.067 | 0.201 | 0.068 | -0.95 |
| Natural values | 20.34 | 5.8 | 32.01 | 10.34 | 0.21 |

이 최적조건에서 예측되는 hydraulic pressure는 155.8이고 최적값으로 실제 용접 실험을 통해 얻어진 hydraulic pressure는 152이다. 비교적 두 값이 일치함을 알 수 있다.

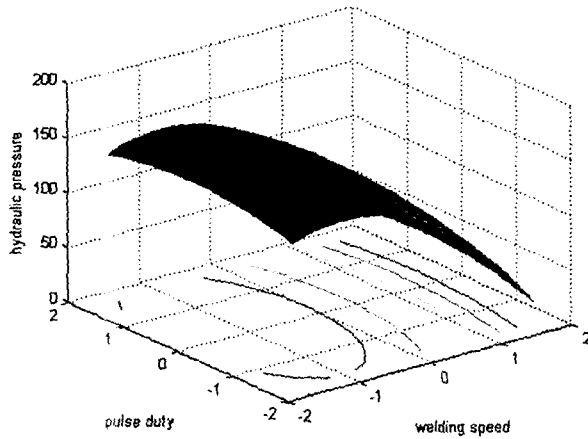


fig.1 Result of overall desirability function (pulse duty-welding speed)

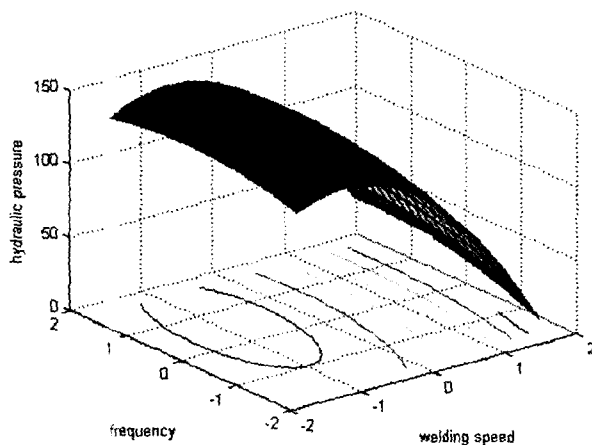


fig.2 Result of overall desirability function (frequency-welding speed)

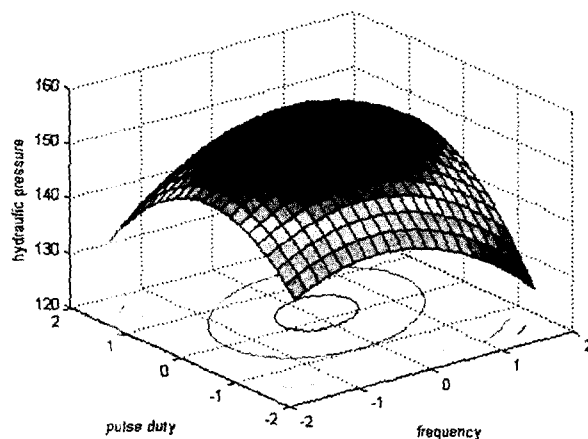


fig.3 Result of overall desirability function (frequency-pulse duty)

Fig.1는 입력변수 welding speed와 pulse duty에 따른 hydraulic pressure의 desirability function 분포이다. welding speed가 coded value -0.95 에서 hydraulic pressure가 최대가 되며 pulse duty의 영향은 적은 것으로 나타나고 있다. 또한 반응표면의 형태로부터 최적조건이 정상점인 것을 알 수 있다. Fig.2는 frequency 와 welding speed 따른 desirability function 분포로 pulse current가 0.06 에서 최적점을 나타내고 있다. Fig.3은 pulse duty 와 frequency에 따른 hydraulic pressure의 desirability function 분포로 최적조건이 정상점인 것을 알 수 있다.

4. 결 론

Pleated Type Metallic Filter의 Micro Pulse TIG 용접에서의 용접부 품질을 양호하게 만드는 최적 조건을 설정하기 위해 반응표면분석법을 제안하였다. 2차 회귀 모델을 이용하여 입력변수 pulse current, base current, pulse duty, frequency, welding speed 와 출력변수 hydraulic pressure의 관계를 나타내는 중심합성계획을 설계하였다. Pleated Type Metallic Filter의 용접 품질을 양호하게 만드는 최적 용접 조건을 구하였다. Pleated Type Metallic Filter의 Micro Pulse TIG 용접에서는 welding speed의 영향이 가장 중요한 요인으로 생산성을 고려한 적절한 welding speed 선정이 중요하다.

후 기

본 연구는 2003년도 산업자원부에서 시행한 부품 소재종합기술 지원사업에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. D.Kim and S. Rhee, Design of an optimal fuzzy logic controller using response surface methodology., IEEE Trans. On Fuzzy systems, Vol.9, No.3, 2001
2. R.H. Myers and D.C. Montgomery, Response surface methodology, process and product optimization using designed experiments, John wiley & Sons, Inc., 1995
3. D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments 5th Ed, John Wiley & Sons, Inc., 2001