유전 알고리즘과 반응표면분석법을 이용한 CO_2 아크 용접의 용접비드형상 최적화

Optimization of the Weld Bead Geometry in CO_2 Arc Welding by Genetic Algorithm and Response Surface Methodology

김동철*, 이세헌**
학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과
정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

1. 서론

본 연구에서는 GMA 용접에서 최적인 용접 비드 형상을 만들어내는 용접 공정 변수를 선택하기 위해 유전 알고리즘과 반응표면분석법을 적용하는 방법을 제안하였다. 첫번째 단계에서는 용접 공정 변수의 초기값을 설정하는 단계이고 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용하였다. 두번째 단계는 첫 단계에서 얻은 근사 최적점을 기준으로 용접 공정 모델을 획득하고 공정 변수의 최적값을 설정하는 단계이다. 이 단계에서는 실험계획, 통계적 모델링, 최적화로 구성된 반응표면분석법을 이용하여 공정 변수의 최적값을 결정하였다. 특히, 최적화 문제에서 목표값을 기준으로 응답의 음양에 따라 다른 목적 함수값을 할당할 수 있도록 하기 위해 desirability function 을 이용하였다. 제안된 방법을 CO_2 용접 공정에 적용하여 용접 비드 형상을 최적화하였다.

2. 유전 알고리즘

용접 공정에서 선행 실험을 통해 근사 최적해를 찾기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 유전 알고리즘은 3 개의 유전 연산자 reproduction, crossover, mutation 를 이용하여 한 세대의 population 으로부터 다음 세대의 population 를 순차적으로 발생시킨다. 유전 알고리즘을 이용한 최적화 과정은 다음과 같다.

Step 1. Generate an initial population of candidate solutions at random.

Step 2. Calculate fitness function values of each individual of current populations.

Step 3. Generate the next population using three genetic operators.

Step 4. Go to step 2 until some termination conditions are satisfied.

유전 알고리즘에서 개체수, 교차율, 돌연변이율, 스트링 길이 등은 알고리즘의 성능에 중요한 인자들이다[1]. 특히 유전 알고리즘을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션이 아닌 실제 실험을 통해 최적 조건을 찾기 위해서는 개체수를 가능한한 적게 할 필요가 있다.

3. 반응표면분석법과 desirability function

반응표면분석법은 실험 계획, 통계적 모델링, 출력 변수의 최적화로 구성된다[2]. 본 논문에서는 용접 비드 형상을 최적화하는 용접 공정 변수를 결정하기 위해 RSM 을 이용하였다. 용접 공정 변수는 wire feed rate (X_1), welding voltage (X_2), and welding speed (X_3) 였고, 출력 변수는 bead height(y_1), bead width(y_2), penetration(y_3)였고, 입력 변수와 출력 변수사이의 관계식은 이차모델로 가정하였다.

$$y_k = \beta_0 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{j=2}^{3} \sum_{i=1}^{j-1} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_k \quad (1)$$

여기서, x_1, x_2, x_3는 X_1, X_2, X_3에 대한 coded unit 이다. 또 본 논문에서는 2 차 회귀모델을 유도하기 위한 실험 계획으로는 central composite design (CCD)을 사용하였다.

회귀식 (1)은 x_1, x_2, x_3의 값에 따는 용접 비드 형상을 나타내는 관계식이고 원하는 용접 비드 형상을 만들어내기 위해서는 출력 변수를 최적화할 필요가 있다. 그러나 비드 형상의 최적화 문제에서 각 출력 변수의 목표값에 대한 음과 양의 편차는 용접 품질에 끼치는 영향이 다르기 때문에 일반적인 quadratic 목적 함수를 사용하는 것은 타당하지 않다. 따라서 본 연구에서는 목표값에 대한 음과 양의 편차에 따라 다른 목적 함수값을 할당할 수 있는 Derringer and Suich[3]가 제안한 desirability function approach 를 이용하였다. 먼저 응답이 목적값을 가지고 있을 때 적용될 수 있는 식(2)와 같은 two-sided desirability function 를 정의한다.

$$d_i(\hat{y}_i(\mathbf{x})) = \begin{cases} \left(\dfrac{\hat{y}_i - A_i}{B_i - A_i}\right)^s & if\ A_i < \hat{y}_i < B_i \\ \left(\dfrac{\hat{y}_i - B_i}{B_i - C_i}\right)^t & if\ B_i \le \hat{y}_i < C_i \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

둘째로, 식(2)에 의해 정의된 각 응답에 대한 desirability function 을 이용하여 다음과 같은 단일 목적함수를 만든다.

$$D(\mathbf{x}) = \left(d_1(\hat{y}_1(\mathbf{x})) \cdot d_2(\hat{y}_2(\mathbf{x})) \cdots d_m(\hat{y}_m(\mathbf{x}))\right)^{1/m} \quad (3)$$

여기서 m 은 응답의 개수이다. 마지막으로 단일 목적 함수를 최대로 하는 입력 변수을 결정한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 유전 알고리즘에 의한 선행 실험

유전 알고리즘을 이용하여 용접 공정 변수를 최적화하기 위해서는 다음 세대에 생존을 평가해 주는 지수가 필요하다. 본 연구에서는 부분 용입의 용접부를 얻는 것을 목적으로 하였고[4], 용접 품질에 영향을 주는 용접 비드 형상 변수인 비드 높이, 비드 폭, 용입 깊이를 이용하여 다음과 같은 목적함수를 만들었다

$$J = (y_{1,d} - y_1)^2 + (y_{2,d} - y_2)^2 + (y_{3,d} - y_3)^2 \quad (4)$$

여기서 $y_{1,d}, y_{2,d}, y_{3,d}$ 는 설계자가 원하는 비드 높이, 비드 폭, 용입 깊이이다, 본 최적화 문제에서는 $y_{1,d} = 1.5mm$, $y_{2,d} = 7\text{mm}$, $y_{3,d} = 4\text{mm}$ 를 원하는 비드 형상으로 설정하였다. 그리고 식 (4)를 최소로 하는 용접 공정 변수를 찾기 위한 와이어 송급 속도, 용접 전압, 용접 속도의 탐색 범위는 각각 1.35 – 14.40 cm/s, 15 – 30 V, 5 – 12 mm/s 였으며, 비트수는 각각 4, 4, 3 이었다.

먼저 유전 알고리즘의 제어 파라미터를 초기화한다. 본 연구에서는 개체수는 12, 교차율은 0.95, 돌연변이율은 0.01 로 설정하였다. 제 1 세대의 개체군은 직교 배열(L_{12})[5]을 이용하여 이진 스트링을 구성하였다. 직교 배열에 의해 발생된 제 1 세대의 용접 공정 변수값과 각 조건에 대한 실험결과를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Results of Initial Generation.

Individual number	Feed rate (cm/s)	Voltage (V)	Speed (mm/s)	Height (mm)	Width (mm)	Penetration (mm)	Objective function	Fitness function
1	1.35	15	5	-	-	-	41.00	0.024
2	1.35	22	12	1.0	4.2	2.1	11.70	0.079
3	3.96	23	12	1.3	4.9	2.5	6.70	0.130
4	5.70	26	6	1.6	8.2	3.3	1.94	0.340
5	6.57	28	7	1.3	8.7	2.8	4.37	0.186
6	7.44	21	9	2.5	5.4	2.8	5.00	0.167
7	10.92	18	7	-	-	-	41.00	0.024
8	10.05	29	6	2.0	12.2	4.2	27.33	0.035
9	9.18	28	9	1.2	8.1	3.2	1.94	0.340
10	13.53	16	10	-	-	-	41.00	0.024
11	12.66	19	8	-	-	-	41.00	0.024
12	11.79	25	11	2.2	5.9	3.8	1.74	0.365

실험 번호 1, 7, 10, 11 에 해당되는 용접 조건에서 용접된 모재의 용접부는 용입이 거의 형성되지 않았기 때문에 절단 작업중 분리되었고 이 조건에서 계측된 data 는 'bad data' 로 간주하였다.

이렇게 각 개체에 대하여 계산된 적합도 함수값에 따라 유전 알고리즘의 세 연산자를 이용하여 다음 세대의 개체군을 결정한다. 이 과정을 만족할만한 용접 품질을 얻을 때까지 반복한다. 본 연구에서는 제 3 세대까지 실험을 수행하였고, 최적의 용접 조건은 와이어 송급 속도가 6.57cm/s, 용접 전압이 24V, 용접 속도가 8mm/s 였다. 이 조건에서 얻어진 비드 높이는 1.7mm, 비드 폭은 6.9mm, 용입 깊이는 3.7mm 였다.

4.2 용접 공정 모델링 및 최적화

유전 알고리즘으로 찾은 근사 최적점 근방에 대하여 반응표면분석법을 적용하여 입력 변수와 출력 변수의 사이의 관계식을 유도하고 최적 용접 조건을 결정하였다. 각 응답에 대한 회귀모델을 유도하기 위한 실험 계획은 CCD 법이었으며, 최소 제곱법(least squares method)을 이용하여 다음과 같은 모델을 얻었다.

$$\hat{y}_1 = 2.0489 + 0.3800x_1 - 0.1900x_2 - 0.3200x_3 - 0.0111x_1^2 - 0.1611x_2^2 + 0.0889x_3^2 + 0.0375x_1x_2 - 0.0625x_1x_3 + 0.0875x_2x_3 \quad (5)$$

$$\hat{y}_2 = 6.2933 + 0.0700x_1 + 0.5600x_2 - 1.0600x_3 - 0.2167x_1^2 + 0.0333x_2^2 + 0.2333x_3^2 - 0.0125x_1x_2 - 0.0625x_1x_3 - 0.0875x_2x_3 \quad (6)$$

$$\hat{y}_3 = 3.5400 + 0.2600x_1 + 0.3400x_2 - 0.2400x_3 - 0.2000x_1^2 + 0.1000x_2^2 + 0.1125x_1x_2 - 0.0625x_1x_3 - 0.0875x_2x_3 \quad (7)$$

각 모델에 대한 결정계수 R^2 은 각각 0.9743, 0.9849, 0.9083 였다. 다음에 설계자가 원하는 비드 형상을 얻기 위해서 desirability function approach 를 이용하여 세 출력변수를 최적화하였다. 3 개의

응답은 식(2)로 정의된 two-sided desirability functions 에 의해 변환되었고, Table 2 는 각 응답에 대한 최소값, 최대값, 목표값을 나타내고 있다.

Table 2. Minimum, Maximum, and Target Values for three Responses.

Response	A_i	B_i	C_i	$d_i(A_i)$	$d_i(B_i)$	$d_i(C_i)$
y_1	1.0	1.5	3.0	0.0	1.0	0.0
y_2	6.5	7.0	7.5	0.0	1.0	0.0
y_3	3.85	4.0	5.0	0.0	1.0	0.0

세 개의 응답에 대한 식(3)과 같은 overall desirability function 을 최대로 하는 입력 변수값은 유전 알고리즘을 이용하여 결정하였다. 유전 알고리즘으로 구한 입력 변수의 최적값의 natural values 는 $(X_1, X_2, X_3) = (157.4, 24.0, 7.5)$ 였다. 이 최적 조건에서 예측된 응답은 $(\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3) = (1.7, 7.2, 4.0)$ 였고, 측정된 응답은 $(y_1, y_2, y_3) = (1.8, 7.4, 3.9)$ 였다.

5. 결론

유전 알고리즘과 반응표면분석법을 이용하여 아크 용접 공정을 최적화하는 방법을 제안하였다. 먼저, 선행 실험의 횟수를 줄이기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 용접 공정의 근사 최적 조건을 찾았다. 기존의 방법보다 훨씬 적은 실험 횟수로 근사 최적 조건을 찾을 수 있었다. 다음에 반응표면분석법을 이용하여 최적 조건을 찾았다. 이 단계에서는 첫 단계보다 상대적으로 작은 실험 영역에서 계획된 실험을 수행하였으며, 회귀 모델을 유도하고, desirability function approach 을 이용하여 원하는 용접 형상을 나타내는 최적 용접 조건을 결정할 수 있었다.

References

1. G. Derringer and R. Suich : "Simultaneous optimization of several response variables", Journal of Quality Technology, vol.12, (1980), pp. 214-219.
2. Goldberg, D.E. : *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, (1989).
3. R.H. Myers and D.C. Montgomery, Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons,Inc.,(1995).
4. ANSI/AWS D1.1-94, *Structural welding code-steel*, 13th Ed. , American Welding Society, Miami, Fla.(1994).
5. Phadke, M.S. : Quality engineering using robust design, Prentice Hall, (1989).