

Controlled random search를 이용한 아크용접공정변수 최적화

Optimization of Arc Welding Process Parameters Using Controlled Random Search

김동철*, 강문진*, 이세현**

*정회원, 포항산업과학연구원 용접센터

**정회원, 한양대학교 기계공학부

1. 서론

아크 용접 공정에서 양호한 용접 비드 형상을 나타내는 용접 공정 변수를 설정하는 것이 중요한 작업이다. 그러나 용접 비드 형상 변수들은 서로 커플 되어 있기 때문에, 용접 공정에 대한 사전 지식 없이 시행착오법에 의해 용접 공정 변수들을 조정하여 원하는 용접 비드 형상을 얻는다는 것은 많은 실험과 노력을 필요로 한다.

이런 문제점은 관련 용접 공정에 대한 전문가 지식이나 데이터 복을 이용하면 어느 정도 양호한 용접 비드 형상을 나타내는 용접 공정 변수 범위를 결정할 수 있지만 최적의 용접조건을 결정할 수는 없다. 또 실험 데이터를 이용하여 용접 공정의 입력변수와 출력변수사이의 관계식을 구하고 이것을 이용하여 용접 공정 변수를 결정하는 방법들이 제안되고 있다^{1,2)}. 그러나 유도된 용접 공정 모델은 용접 공정의 비선형성 때문에 작은 실험 영역에서는 모델의 정확성이 높지만 실험 영역이 커지면 모델의 정확성이 떨어진다. 즉 용접공정의 입출력 변수 사이의 모델은 제한된 범위 내에서만 타당하기 때문에 어느 정도 양호한 용접 품질을 나타내는 관심영역을 찾기 위한 선행 실험이 필요하다. 구배(Gradient)기초한 최적화 방법에 의한 용접 공정 변수 결정은 용접 공정 변수의 탐색 영역중에 용락과 같은 비선형적인 현상이 나타나면 탐색의 방향성을 잃어 버려 탐색을 처음부터 다시 시작해야 하는 문제점이 가지고 있다. 유전알고리즘은 이런 문제점을 해결할 수 있는 장점을 지니고 있지만 알고리즘을 구현하는데 많은 시간을 필요로 하고 유전알고리즘의 성능이 유전알고리즘의 제어파라미터인 개체수, 교차율, 돌연변이율 등의 설정값에 따라 영향을 받는 단점을 지니고 있다³⁾.

본 연구에서는 GMA용접에서 최적인 용접 비드 형상을 만들어내는 용접 공정 변수를 결정하기 위해 Controlled Random Search(CRS) 방법을 제안하였으며, 그 타당성을 검증하기 위해 유전알고리즘과 비교하였다. 이 방법들은 입출력 사이의 관계식을 유도하지 않고 일련의 실험을 통해 최적인 용접 공정 변수를 찾아내는 방법이지만 두 방법의 성능을 실험을 통해 직접 비교하기에는 많은 실험을 필요로 하기 때문에 용접 공정의 입출력에 대한 회귀모델을 유도한 다음, 이 모델을 이용하여 두 방법을 비교 검토하였다. 용접 비드 형상을 제어하기 위한 입력변수는 루트 오픈링(root opening), 용접전류, 용접전압, 용접속도이고, 출력변수는 용접 비드 형상의 비드 높이와 용입 깊이다.

2. Controlled Random Search

CRS는 전역적인 최적화 알고리즘이다. 본 연구에서는 원하는 용접 비드 형상을 얻기 위한 용접 공정 변수를 결정하기 위해 CRS를 사용하였다. 여러 가지 복잡한 문제를 해결할 수 있도록 고안된 CRS는 다음과 같은 특성을 가지고 있다⁴⁾.

첫째, CRS는 탐색공간에서 일정 크기의 가능한 해들(possible solutions)에 기초하여 탐색을 진행한다. 둘째, CRS는 각 입력변수에 대한 목적함수 값을 사용하기 때문에 그 목적함수가 반드시 연속적이거나 미분가능할 필요는 없다. 셋째, 많은 최적화 방법은 결정론적인 전이규칙을 사용하지만 CRS는 확률적인 전이규칙을 사용한다. CRS를 이용한 일반적인 최적화 과정은 다음과 같다.

Step 1 Determine N, the number of initial search points; Define the upper and lower bounds.

Step 2 Choose N points at random over V; Evaluate the cost function at each point; Store the positions and function values in an array A

- Step 3 Find, in A, the worst point M with function value f_M and the best point L with function value f_L
- Step 4 Choose randomly n distinct points R_2, \dots, R_{n+1} excluding L. Let $R_1=L$, Determine the centroid G of points R_1, \dots, R_n . Compute the next trial point $P=2G-R_{n+1}$
- Step 5 If P is within V and satisfies other constraints, the evaluate f_P and go to Step 6; else, return to Step 4
- Step 6 If $f_P < f_M$, then replace M by P in A and go to Step 7; else, return to Step 4
- Step 7 If the stop criterion is satisfied, the stop; else return to Step 3

3. 실험방법

본 연구에서는 용접 공정에 대한 회귀모델에 기초하여 유전알고리즘과 CRS를 비교하였다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 비드 높이와 용입 깊이가 용접 비드 형상을 표현하기 위해 사용되었고 용접 공정 변수로 루트 오프닝, 용접전류, 용접전압, 용접속도를 사용하였다. 회귀모델을 유도하기 하기 위해 각 입력변수의 탐색 영역은 루트 오프닝 0-1.5mm, 용접전류 100-250A, 용접전압 15-30V, 용접속도 3-10.5mm/s였고, 랜덤하게 선택한 40개의 용접조건에 대해 용접실험을 수행하였다.

용접 모재는 두께가 4.5mm 인 연강이었고, 전극와이어는 AWS 규격 ER 70S-6 이었고, 이 전극 와이어의 지름은 1.2 mm 였다. 실험에 사용된 보호가스는 100% CO₂가스였고, 가스의 흐름속도는 16 l/min였다.

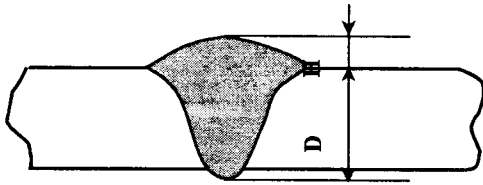


Fig. 1 Weld bead geometry.

4. 결과 및 고찰

회귀모델을 얻기 위한 수행한 40개의 용접조건 중에서 9개는 용락현상이 발생하였고, 이 조건은 회귀모델의 정확성을 저하시키기 때문에 회귀 해석에서 제외시켰다. 비드 높이와 용입깊이가 2차 모델이라고 가정하고 구한 회귀 모델은 다음과 같다.

$$y_h = -4.3102 + 2.6378x_1 + 0.1049x_2 + 0.0041x_3 + 0.2139x_4 - 1.2240x_1^2 + 0.0052x_3^2 + 0.0460x_4^2 - 0.0082x_1x_2 - 0.0207x_1x_3 - 0.0381x_1x_4 - 0.0026x_2x_3 - 0.0052x_2x_4 - 0.0103x_3x_4$$

$$y_p = -0.2764 - 1.3512x_1 - 0.0574x_2 - 0.0285x_3 + 1.3805x_4 - 0.4486x_1^2 - 0.0005x_2^2 - 0.0179x_3^2 - 0.0126x_4^2 + 0.0114x_1x_2 + 0.0986x_1x_3 - 0.0414x_1x_4 + 0.0096x_2x_3 - 0.0043x_2x_4 - 0.0361x_3x_4$$

여기서 y_h, y_p 는 각각 비드 높이와 용입 깊이를 나타내고, x_1, x_2, x_3, x_4 는 각각 루트 오프닝, 용접전류, 용접전압, 용접속도를 나타낸다.

용접 공정 변수를 최적화하기 위해서는 목적함수가 필요하고, 본 연구에서는 용접 품질에 중요한 영향을 주는 용접 비드 형상인 비드 높이와 용입 깊이를 이용하여 다음과 같은 목적함수를 만들었다

$$J = (y_{h,d} - y_h)^2 + (y_{p,d} - y_p)^2 \quad (1)$$

여기서 $y_{h,d}, y_{p,d}$ 는 설계자가 원하는 비드 높이와 용입 깊이이고 본 연구에서는 완전용입 용접부를 얻기 위해 각각 1.5와 5.5로 설정하였다. 따라서 원하는 비드 형상은 J 를 최소화 하거나 $1/(J+1)$ 를 최대로 하는 용접 공정 변수를 찾는다는 것을 의미한다. 그리고 용접 공정 변수의 탐색 범위, 변수의 레벨수를 Table 1과 같이 하였다. 따라서 총 탐색점의 수는 16,384였다. Table 1에서 용접 전류의 범위가 처음 실험 영역보다 좁아진 이유는 실험영역중 용락현상을 나타내는 데이터를 제거하고 회귀 모델을 구성하였기 때문이다. 이런 탐색공간으로부터 유전알고리즘과 CRS를 이용하여 최적인 용접 변수를 결정하였다.

Table 1 Search range for welding parameters

Parameter	Range	Number of bits	Number of levels
Root gap	0 - 1.5 (mm)	2	4
Welding current	115 - 190 (A)	4	16
Welding voltage	15 - 30 (V)	4	16
Welding speed	3 - 10.5 (mm/s)	4	16

유전알고리즘과 CRS의 방법을 공정하게 비교하기 위해 초기 가능한 해(possible solutions)는 똑같이 10개로 하였다. 유전알고리즘에서는 이 초기 10개에 대한 목적함수값에 기초하여 유전연산자를 이용하여 다음 탐색점을 10개를 만들어내는 반면에, CRS에서는 다음 탐색점을 한 개 만들어내어 탐색을 진행한다. 두 알고리즘의 종료 조건은 $J < 0.5$ 로 하였다. 탐색의 성능비교는 종료조건때까지 계산한 목적함수의 개수로 하였다. 목적함수의 개수가 적을수록 실제 용접시 적은 용접실험을 통해 최적인 용접 공정변수를 결정한다는 것을 의미한다.

유전알고리즘의 탐색과정의 다음과 같다. 먼저 유전알고리즘의 제어파라미터를 초기화한다. 다음에 이진 스트링으로 이루어진 가능 해 10개를 발생시키고 각 이진스트링을 Table 1의 범위의 값으로 변환시킨다. 그리고 이 변환된 용접 공정 변수값을 회귀모델에 대입하여 용접 비드 높이와 용입 깊이를 계산한 후 식 (1)에 의해 목적 함수값을 계산하고, 그 값을 이용하여 적합도 함수($1/(J+1)$) 값을 계산한다. 이 적합도 함수값과 유전연산자를 이용하여 다음세대의 가능 해 10개를 만들어 내고 이 과정을 종료 조건이 만족될 때까지 되풀이한다.

CRS의 탐색과정은 다음과 같다. 먼저 미리 정해진 일정개수의 가능 해를 랜덤하게 발생시킨다. 본 연구에서는 유전알고리즘과 비교하기 위해 초기 가능해를 10개로 하였고 유전알고리즘과 똑같은 가능해를 이용하여 탐색을 수행하였다. 그리고 10개의 용접조건을 회귀모델에 대입하여 용접 비드 높이와 용입 깊이를 계산한 후 식 (1)에 의해 목적 함수값을 계산한다. 최대의 목적함수값을 나타내는 용접조건 M과 그 목적함수값 f_M 및 최소의 목적함수값을 나타내는 용접조건 L과 그 목적함수값 f_L 를 결정한다. 그리고 나서 L을 제외한 9개의 용접 조건으로부터 4차원에 대한 심플렉스를 구성하기 위해 4개의 용접조건을 랜덤하게 선택하고 L과 이 4개의 용접조건으로부터 식 (2)에 의해 다음 탐색점을 결정한다.

$$P = 2G - R_{n,1} \tag{2}$$

여기서 P는 다음 탐색점을 나타내고, $R_{n,1}$ 는 가장 나중에서 선택된 용접조건이고, G는 $R_{n,1}$ 를 제외한 점들의 도심을 의미한다. 점 P로 설정된 탐색점이 탐색영역 내에 존재하면서 목적함수값 f_P 가 f_M 보다 작으면 M점을 초기 가능해 집단에서 제거하고 그 대신 P점을 가능해 집단에 포함시켜 탐색을 진행한다.

같은 가능해집단에 대하여 탐색을 5회 수행한 결과를 비교하였다. Fig. 2는 유전알고리즘을 5회 수행한 결과를 보여주고 있고 Fig. 3은 CRS를 5회 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 심벌은 각 탐색 단계까지의 최소의 목적함수값을 나타내고 목적함수값이 작은 값으로 수렴해가는 것을 할 수 있다. Fig. 2에서 각 세대는 10의 탐색점으로 구성되고, Fig. 3에서 iteration 0는 10개의 탐색점으로 구성되지만 그 이후는 1개의 탐색점으로 구성된다. 따라서 원하는 목적함수값에 도달하는데 필요

한 평균 탐색점의 수는 유전알고리즘은 42개, CRS는 32.4개였다. 위의 결과로부터 실제 용접 공정에 적용할 경우 CRS는 유전알고리즘보다 적은 실험 회수로 만족할 만한 용접조건을 찾을 수 있다는 것을 알 수 있다.

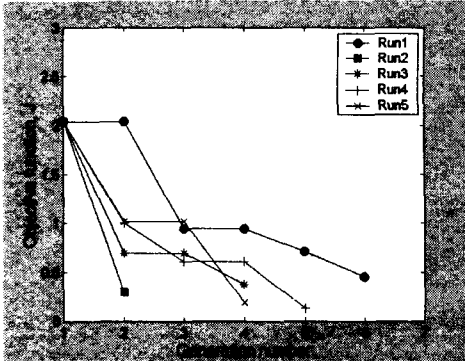


Fig. 2 Result of genetic algorithm.

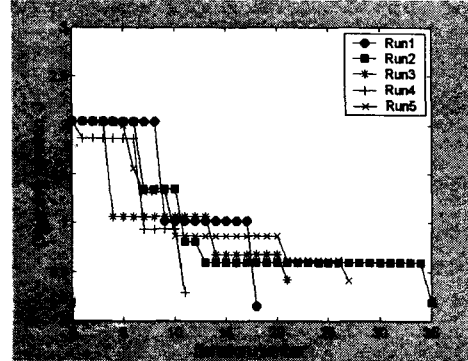


Fig. 3 Result of CRS.

5. 결론

CRS를 이용하여 아크 용접 공정에서 최적인 용접 공정 변수를 결정하는 효과적인 방법을 제안하였고 유전알고리즘과 비교하였다. 아크 용접 공정에서 용접 비드 형상은 용접 품질을 결정하는 중요한 인자이고, 본 연구에서는 완전 용입 용접 형상을 만들어내는 용접 공정 변수를 CRS를 이용하여 결정하였다. CRS를 이용한 용접 공정의 최적화에서는 목적함수가 미분가능할 필요가 없고 다른 알고리즘에 비하여 상대적으로 구현하기 쉬운 장점을 지니고 있다. 제안된 방법으로 용접공정과 같이 모델링하기 어려운 시스템에 대하여 체계적인 실험을 통해 최적 용접조건을 결정할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. Konkol, P.J., and Koons, G.F.: Optimization of parameters for two-wire AC-AC submerged arc welding, *Welding Journal*, Vol.57, No.12, (1978), pp.367s-374s.
2. Li, P., Fang, M.T.C., and Lucas, J.: Modeling of submerged arc weld beads using self-adaptive offset neural networks, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 71, (1997), pp.288-298.
3. Goldberg, D.E.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, (1989).
4. Price, W.L: Global optimization by controlled random search., *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 74, No. 3, (1983), pp.333-348.