

# 고장력 TRIP강의 저항 점용접 공정변수 최적화와 점용접성 평가

## Optimization of Resistance Spot Welding Process Parameter and Weldability Evaluation for TRIP Steel

박현성\*, 오영근\*, 김태형\*\*, 이세현\*\*\*

\* 기아자동차 생기개발팀

\*\* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\* 한양대학교 기계공학부

### 1. 서 론

저항 점 용접은 비교적 간단한 원리와 값싼 설비비로 인해 자동차 차체와 같은 박판 조립 공정에 널리 사용되어 왔다. 하지만 이와 같이 적용하기 쉬운 저항 점 용접의 경우에도 용접 품질을 결정 지을 수 있는 인자들이 서로 연관되어 작용하므로 양호한 용접 품질을 얻는 일이 쉽지 않다. 이를 위해서 수많은 실험과 시행착오법을 통해 그 조건을 설정하는 것은 비효율적인 일이므로, 보다 적은 실험과 용접 품질을 나타낼 수 있는 용접 공정 모델을 사용하여 양호한 용접부를 얻기 위한 최적 용접 조건을 얻을 필요가 있다.

자동차업계에서 지구 온난화 방지를 위한 저연비차의 개발은 차량개발의 최대 이슈가 되고 있으며, 최근에는 충돌안정성 향상을 위하여 많은 연구를 수행하고 있다. 이와 같이 안정성과 경량화의 상반된 목표를 달성하기 위한 고안전 경량차체를 개발하기 위해서는 현재 사용되고 있는 강재보다 고장력 강판의 사용을 늘려야만 한다. 현재 자동차의 고장력강판 적용비율은 전체 적용강판중 약 30-40%에 머물고 있으며, 대부분 35-40kg/mm<sup>2</sup> 급의 강판이 주류를 이루고 있다. 이렇게 고장력강판의 적용이 제한적인 이유는 인장강도상으로는 요구되는 강판이 개발되었으나 성형성이 나빠 단순형상의 부품에만 적용되고 있기 때문이다. 최근에는 TRIP강이라는 신강종이 개발되어 고장력강판의 적용이 늘어날 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 자동차 생산현장에서 필요로 하는 고장력 TRIP강의 저항 점용접 최적조건을 구하기 위해서 반응표면 분석법을 사용하여 용접 품질을 양호하게 하는 최적 용접 조건을 선정하였다.

### 2. 실험계획

#### 2.1 반응표면 분석법을 이용한 최적조건 선정

반응 표면 분석법은 입력변수와 출력변수사이의 근사모델링을 만들기 위한 실험계획법, 출력변수와 입력변수 사이의 관계를 나타내는 통계적 모델링, 그리고 출력변수 최적화 과정을 통해 수행된다.

우선, 입력변수로 용접 전류, 용접 시간, 가압력을, 출력변수는 용접부 전단 인장강도와 오목자국깊이(indentation)을 사용하였다. 그리고, 저항 점 용접에서 세가지 입력변수들과 출력변수들은 서로 복잡한 관계를 가질 것이므로, 반응 표면 모형은 (1)과 같이 2차 회귀모델을 설정하였다.

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

여기서,  $x_i$ 는 입력변수들(용접전류, 용접시간, 가압력)의 coded unit 이고,  $y_k$ 는 저항 점 용접에서 품질을 나타내는 출력변수(전단인장강도, 오목자국깊이)이며, 실험 결과 데이터에 의해서 구해진  $\beta$ 는 회귀계수이다.  $\beta$ 는 최소자승법(the method of least squares)에 의해 구해진다.

위 모델식을 구하기 위해서는 실험을 통해 용접품질과 관련된 자료를 얻어야 한다. 이와 같은 실험도 시행착오나 수많은 실험을 통해 구하고자 한다면 경제적 어려움이 발생할 가능성이 있으므로,

본 연구에서는 효과적인 실험 계획법 중의 하나인 중심 합성 계획법(central composite design, CCD)을 수정하여 사용하였다.

실험계획법을 이용해 얻은 데이터를 이용해 저항 점 용접 공정에서 입력변수와 출력변수와의 관계를 나타내는 두 가지 반응 표면을 (1)에서 제시한 2차 모델로 구하였다. 하나는 전단인장강도와 관련된 모델이고, 다른 하나는 날림발생의 여부를 판단할 수 있는 근거중의 하나인 오목자국깊이를 나타내는 모델이다. 이 모델들을 이용하여 관심 있는 입력변수 영역에서 용접 품질을 최적화시키는 조건을 찾으려고 할 때, 용접 품질을 나타내는 목적함수로 desirability function approach를 이용하였다. desirability function approach는 다중 응답에 대한 최적화된 값으로 입력값을 찾아주는 효과적인 방법으로 계획된 실험과 회귀분석으로부터 유도된 회귀 모델을 사용하여 각 응답에 대한 desirability function을 정의한다. desirability function은 각 응답에 대한 만족도를 나타내는 지수로 만족도가 클수록 1로 접근하고 만족도가 작을수록 0으로 접근하도록 정의하면, desirability function의 범위는 [0, 1]이다. 본 연구에서는 Derringer & Suich가 제안한 각 응답에 대한 desirability function을 단일 목적 함수로 정의하여 overall desirability function을 정의하였으며, 이 overall desirability function을 최대로 하는 입력변수 값을 결정하여 저항 점 용접 공정에서 최적 용접 조건을 정하였다.

## 2.2 용접실험

중심합성계획(central composite design)은  $2^k$ 요인배치법과 같은 실험방법으로는 변수의 수준변화에 따라서 발생하는 반응표면의 변화를 감지할 수 없으므로, 이런 단점을 보완하고 보다 적은 실험 횟수로 곡면을 추정하기 위하여  $2^k$ 요인실험에 중심점과 축점을 추가시킨 실험계획법이다.

본 연구에서는 기존의 중심합성계획을 일부 수정하여 실험을 수행하였다. 저항 점 용접의 경우, 용접 공정 중에 중간날림이 발생할 경우 용접 불량을 일으킬 경우가 많다. 따라서 중간날림이 생기지 않는 범위에서 용접 공정을 수행하여야 한다. 기존의 중심합성 계획을 사용하여 실험할 경우, 용접 조건이 9kA, 15cycle, 320kgf의 경우에는 과도한 날림이 발생할 수가 있다. 그러므로 중심합성계획을 수정하여 관심 실험영역으로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

설정된 관심 실험영역에서 실험을 통해 얻어진 결과를 이용해 구하는 반응표면으로 2차 회귀 모델을 사용하기로 하였으므로 각 입력인 용접 전류, 가압력, 용접시간에 대한 출력값 전단인장강도와 오목자국깊이의 회귀식을 나타내면 다음과 같다.

$$S = 13.907 - 0.087x_1 + 0.611x_2 + 0.128x_3 - 0.088x_1^2 - 0.383x_2^2 - 0.292x_3^2 + 0.001x_1x_2 + 0.029x_1x_3 - 0.247x_2x_3 \quad (2)$$

$$I = 2.123 - 0.262x_1 - 0.121x_2 - 0.788x_3 - 0.136x_1^2 + 0.025x_2^2 - 0.190x_3^2 + 0.061x_1x_2 - 0.267x_1x_3 + 0.194x_2x_3 \quad (3)$$

최소자승법에 의해 결정된 2차 회귀모델의 타당성은 분산분석에 의해  $F$ -검정과 결정계수로 판단하였다.  $F_0$ 에 의해 회귀식이 모두 유의한 것을 알 수 있었으며, 결정계수에 의해 저항 점용접 공정을 잘 표현하는 모델임을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용된 출력응답인 전단인장강도와 오목자국깊이 두가지 값을 모두 만족시키는 용접 전류, 용접시간, 가압력 조건을 찾기 위해서 다중 출력변수에 대한 최적 입력값을 찾아내기 위해 desirability function approach를 사용하였다. 전단인장강도의 경우 응답이 최대로 되어야 할때 사용되는 one-sided desirability function을, 오목자국깊이의 경우는 응답이 목적값을 가지고 있을 때 쓰이는 two-sided desirability function을 이용하였다. 각 응답에 대한 desirability function의 geometric mean으로 정의된 overall desirability를 구하면 다음과 같다.

$$D(x) = (d_1(y_1(x)) \cdot d_2(y_2(x)))^{1/2} \quad (4)$$

정의된 목적함수인 식 (4)를 이용하여 관심 실험영역에서 목적함수를 최대화 하는 입력 변수를 구하였다. 그 방법으로 관심실험영역을 작은 격자로 나누어 각 격자에서 목적 함수 값을 구하는 Grid-search method를 이용하였다. 일반적으로 목적함수값을 최대화 하는 입력 값을 구하기 위한 최적화하는 알고리즘을 사용하지만, 본 연구에서는 전 영역에 대해 걸쳐 그 값을 비교하여 최적 입력값을 정하였다.

Grid-search method를 이용하여 구한 입력변수의 최적 coded values는  $(x_1, x_2, x_3) = (-0.16, 0.79, 0.12)$ 이고,  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = (362, 14, 8.1)$ 이다. 이 최적조건에서 예측된 출력변수는 전단인장강도 14.15kN, 오목자국깊이 0.4mm이며, 실제 용접실험을 통해 얻어진 측정값은 14.30kN, 0.35mm이다. 두 값을 비교해 볼 때, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

생산 현장에서 필요로 하는 고장력 TRIP강에 저항 점 용접 공정을 적용하기 위해서는 용접부 품질을 양호하게 만드는 최적 입력조건을 설정이 필요하다. 본 연구에서는 이 최적 조건을 구하기 위해 반응표면분석법을 이용하는 방법을 제안하였다. 입력변수인 가압력, 용접시간, 용접전류와 출력변수인 전단인장강도, 오목자국깊이의 관계를 나타내는 반응표면을 구하기 위해 용접 실험을 수행한 후 얻어진 데이터를 사용하여 회귀 모델을 얻었다. 보다 적은 회수의 실험과 관심영역에서의 효과적인 회귀 모델을 위해 수정된 중심합성계획을 설계하였다. 얻고자 하는 두 반응 표면의 출력값을 모두 만족시키고자 overall desirability approach를 적용하여 최적 용접 조건을 구하였다. 반응표면분석을 통해 얻은 최적 용접 조건의 예측값과 실제 측정값을 비교해봄으로써 그 값의 타당성을 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 청정생산기술사업의 지원으로 수행되었습니다

#### 참고문헌

1. R.H. Myers and D.C. Montgomery, Response surface methodology, Process and product optimization using designed experiments, John Wiley & Sons, Inc., 1995
2. D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments 5th Ed, John Wiley & Sons, Inc., 2001
3. G.. Derringer and R. Suich, Simultaneous optimization of several response variables, Journal of Quality Technology, Vol.12, pp.214-219, 1980
4. E.D. Castillo, D.C. Montgomery, and D.R. Mccarville, Modified desirability functions for multiple response optimization, Journal of Quality Technology, Vol.28, pp.337-345,1996
5. 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
6. Recommended Practices for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding, Supersedes AWS D8.7-78, SAE J-1188, An American National Standard