다중 반응표면분석법을 이용한 980MPa급 GA강판의 저항 점 용접조건 최적화

최상규^{*,**} · 황인성^{*} · 강문진^{*} · 현승균^{**} · 김영민^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}인하대학교 금속·재료공정공학부

Optimization of Welding Parameters in Resistance Spot Welding of 980 MPa Grade GA Steel Sheet using Multi-Response Surface Methodology

Sang-Gyu Choi^{*,**}, Insung Hwang^{*}, Munjin Kang^{*}, Soongkeun Hyun^{**}, and Young-Min Kim^{*,†}

^{*}Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

^{**}Dept. of Materials Process Engineering, Inha University, 22212, Korea

[†]Corresponding author : ymkim77@kitech.re.kr

(Received July 2, 2018 ; Revised July 31, 2018 ; Accepted August 21, 2018)

Abstract

In this study, the welding quality prediction model with high reliability was developed for the 980 MPa grade TRIP steel with minimum conditions in resistance spot welding process using response surface methodology. The welding time and welding current were selected as the important parameters. The welding quality was predicted by deriving four parameters including tensile shear strength, nugget size, expulsion, and button fracture. The experiment was carried out by using the central composite design. Then, the regression equation derived using the result data was analyzed and the effect of the independent variable on the objective function was analyzed by ANOVA. The welding time had a very small effect on tensile shear strength and nugget, but welding current had a dominant effect on the two properties. Also, the reliability of the derived regression model equation is verified by R correlation coefficient and experiments.

Key Words : Weldments, Resistance spot welding, Response surface methodology, GA steel, ANOVA

1. 서 론

최근 자동차산업은 CO₂ 배출량 절감과 연비향상을 위한 차체경량화의 일환으로 차체소재의 두께를 감소시키기 위해 노력하고 있다. 이러한 두께 감소 요구에 따라 철강제조사에서는 강도와 연신율을 만족하는 새로운 고장력 강판을 지속적으로 개발하고 있다. 하지만 개발된 고장력 강판을 실제 차체부품에 적용하기 위해서는 용접성의 확보가 필수적이며 이에 따라 적정용접조건 범위를 도출하기 위한 용접성 평가가 진행되어야 한다. 또한 용접성 평가 시 개발된 고장력 강판의 동종조합 뿐만 아니라 이종조합에 대한 평가도 진행되어야 하

며 이에 따른 용접조합의 수는 수십에서 수백 개에 달한다. 이로 인해 용접조합 별 용접조건에 따른 전수실험을 할 경우 용접실험의 양이 과도하게 되고 많은 비용과 시간이 소요된다. 차체부품 제조사에서는 이러한 많은 평가실험을 진행하기에는 어려움이 있으며 현재 양산 시 작업자의 경험과 기술에 의존하여 몇 차례의 실험을 통해 용접조건을 설정하고 있어 적정용접조건 범위를 확보하기 어려운 실정이다. 이를 개선하기 위해 전수실험이 아닌 한정된 적은 실험수의 결과를 통하여 최적용접조건을 도출하기 위한 방법이 요구되며 이를 위한 연구가 진행되어야 할 필요가 있다.

차체부품 생산공정에서 가장 많이 사용되는 용접법은 저항 점 용접으로 다른 용접법에 비해 용접조건 변수가

적고 매우 짧은 시간에 용접이 가능하기 때문에 용접품질과 생산성확보에 유리한 특징을 갖고 있다. 저항 점 용접의 용접조건 변수는 크게 3 가지로 가압력, 용접전류, 용접시간이 있다. 일반적으로 가압력은 현장에서 고정하여 사용하는 경우가 많아 용접성 평가를 위한 전수실험 시 용접실험 양에 큰 영향을 미치지 않으나 용접전류와 용접시간은 용접조합에 따라 수 개에서 수십 개의 수준을 가지기 때문에 용접실험 양에 큰 영향을 미친다. 특히 용접강도의 확보가 어렵고 날림이 쉽게 발생하는 고장력 강판의 경우에는 용접 전류와 용접시간의 수준을 세밀하게 선정해야하기 때문에 용접실험 양이 많아지게 된다. 그래서 적정용접조건 범위를 확인하는데 많은 비용과 시간이 소요되며 이는 차체부품 제조사의 부담으로 작용하게 된다. 이러한 부담을 최소화 하기 위하여 적은 용접실험 양으로 많은 용접성 평가 결과를 얻을 수 있는 실험계획법의 사용이 요구되고 있다.

최소한의 용접실험 양으로 많은 목적함수들의 정보를 얻는 방법인 반응표면분석법은 여러 분야에서 많이 사용되고 있다. 저항 점 용접에서는 Park은 590MPa 급 TRIP 강에서 총 17번의 실험으로 강도와 압흔 깊이를 목적함수로 하는 반응표면분석을 하여 최적용접조건을 도출하였다¹⁾. Muhammad는 반응표면분석법으로 연강에서 너깃사이즈와 HAZ부 성장에 용접전류와 용접시간, 홀드타임이 미치는 영향을 9조건의 실험으로 평가하였다²⁾. Darwish는 알루미늄 저항 점 용접에서 용접전류, 가압력, 용접시간, 소재 두께 모두를 고려한 영향을 연구하는데 반응표면분석법을 사용하여 30번의 실험으로 4개의 인자가 갖는 범위에 대한 모든 강도값을 구하였다³⁾.

반응표면분석법은 여러 방식으로 적용이 가능하다. Zhao와 Wan은 저항 점용접에서 티타늄 합금의 최적조건 도출을 연구하였다^{4,5)}. Sudhakaran은 스테인레스소재에서 GTAW 진행시 어떤 인자가 페라이트 상 형성에 영향을 미치는지 연구하였다⁶⁾. Srivastava는 아크용접에서 비드의 기하학적 요소를 예측하는 연구를 사용했으며⁷⁾ Shahi는 GMAW에서 와이어 pre-heating에 관한 연구를 진행하였다⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 최근 개발되어 차체부품에 적용이 되고 있는 고강도 TRIP 강판의 적정용접조건 범위를 도출하기 위해 반응표면분석법을 사용하여 용접실험 양을 최소화하고 인장전단강도, 너깃사이즈, 날림발생 유무와 파단형상을 예측하는 모델을 도출하였다. 그리고 예측모델을 사용하여 적정용접조건 범위를 도출하였으며 검증실험을 통하여 도출된 적정용접조건 범위의

적정성을 검증하였다.

2 반응표면분석법(Response surface methodology)

저항 점 용접에서 용접품질에 영향을 미치는 주요인 자로는 용접전류(weld current), 용접시간(weld time), 가압력(electrode force)이 있다. 본 연구에서는 이 중에서 용접시간, 용접전류를 인자로 선정하여 인장전단강도(tensile shear strength)와 너깃사이즈(nugget size), 날림발생(expulsion), 파단형상(fracture mode)에 어떠한 영향을 미치는지를 반응표면분석법을 사용하여 분석하였다. 반응표면분석법은 수학적 모델링에 있어 유용한 통계기법으로 독립변수들을 설정하고 이 독립변수들이 종속변수에 미치는 반응을 최적화하는 것이다. 이러한 반응표면분석법을 저항 점용접에 적용하여 독립변수는 용접시간과 용접전류로 설정하고 종속변수는 인장전단강도와 너깃사이즈, 날림발생, 파단형상으로 설정하여 회귀모델을 도출하고자 하였다.

식(1)에서 보듯이 독립변수는 x_1, x_2 이며 종속 변수 y 는 독립변수 값에 따라 변화하는 값이다. 실험 오차항을 뜻하는 ϵ 은 측정 오차나 함수에 포함되지 않는 통계적 오류 모두를 포함하고 있다.

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (1)$$

반응표면의 회귀모델은 1차항부터 고차항까지 설정할 수 있으며 2차항에 대한 수학적 표현은 식(2)로 표현된다. 독립변수간 교호작용이 없고 반응이 선형으로 정의될 수 있다면 회귀함수는 1차 회귀모델로 표현될 수 있다. 저항 점용접은 반응표면에 곡률이 있고 독립변수간의 관계는 서로 교호작용을 하여 종속변수에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 2차 회귀 모델을 사용해야 한다. 식(2)에 2개의 독립변수를 적용할 경우 식(3)과 같이 표현된다. 식(3)은 독립변수와 종속변수간의 관계를 2차식으로 표현한 것으로 β 는 각 항에 곱해지는 회귀계수이다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_{11} x_1^2 + \hat{\beta}_{22} x_2^2 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (3)$$

식(4)는 중회귀분석의 최소제곱법을 표현한 수식으로 이를 이용하여 2차 회귀모델의 회귀계수를 구할 수 있다. 여기서 X 는 정규화된 독립변수의 값들에 대한 행렬을 의미하며 y 는 종속변수 값의 열벡터를 의미한다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (4)$$

식(3)과 같이 2차 회귀모델을 구하기 위하여 적은 실험 횟수로 넓은 범위의 독립변수가 가질 수 있는 반응들의 곡면을 추정할 수 있는 실험계획법인 중심합성계획법(central composite design, CCD)을 이용하였다.

3. 실험방법

3.1 실험소재 및 실험조건

본 연구에서 사용된 소재는 합금화아연도금 (galvannealed, GA)된 980 MPa급 TRIP강이며 두께는 1.2 mm이다. 해당 소재의 화학 조성은 Table 1에 나타나 있다.

시험편의 사이즈는 길이 100 mm, 너비 30 mm이며 용접 시 겹침여유를 30 mm로 하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 용접장비는 MFDC(medium frequency direct current) 용접기이며, 전극선단직경은 6mm, 전극직경은 16 mm, 전극선단반경은 40 mm인 돔형전극을 사용하였다. 그리고 가압력은 300 kgf 로 고정하였다.

3.2 실험계획법

본 연구에 사용한 중심합성계획법은 2^k 요인 배치법(2^k factorial experiment)에 축점과 중심점을 추가한 실험계획법이다. 축점과 2^k 요인 배치 실험을 통해 종속변수의 최대값과 최소값, 그리고 교호작용을 파악하고 흥미영역에 2 차원 곡면을 추정한다. 독립변수가 2개일 경우, 이 때의 실험조건은 (1,1), (1,-1), (-1,1), (-1,-1)으로 두 독립변수의 최대, 최소수준의 조합으로 4가지 조건이 설정된다. 축점실험은 각 독립변수가 최대수준과 최소수준 일 때 결과값으로 각 독립변수의 영향을 파악할 수 있다. 2요인일 경우 실험조건은 (1,0), (-1,0), (0,1), (0,-1)으로 설정되며 중심점 (0,0) 조건과 함께 실험을 진행하여 회귀계수의 변동을 최소화하여 보다 실제 측정값에 근접하게 회귀식을 구할 수 있다. 중심합성계획법은 Fig. 1에 나타냈고 각 독립변수의 수준은 Table 2에 나타냈다. 용접전류는 4, 6, 8 kA로 정하였고 용접시간은 250, 333, 417 ms로 정하였다.

중심합성계획법에 따라 정해진 실험조건을 기준으로 실험을 수행하였으며 인장전단강도와 너깃사이즈를 측

Table 1 The chemical composition of 980 MPa grade GA steel

Element	C	Si	Mn	Fe
wt. %	0.20	1.59	2.50	Bal.

Fig. 1 Central composite design, CCD

Table 2 Coding of spot welding parameter

Factor	Codes	Unit	Levels coded		
			-1	0	1
Weld time	T	ms	250	333	417
Weld current	I	kA	4	6	8

정하여 실험결과를 기록하였다. 그리고 용접실험 시 날림발생을 관찰하여 날림이 발생하는 경우를 1로 날림이 발생하지 않는 경우를 0으로 기록하였다. 파단형상은 인장전단강도를 평가한 후 버튼파단(pull-out fracture)이 발생하는 경우를 1로 계면파단(interfacial fracture)이 발생하는 경우를 0으로 기록하였다.

실험조건과 실험결과들은 Table 3과 같다. 동일조건에서 인장전단강도와 너깃사이즈 측정을 각각 5회 반복하여 평균값을 나타내었다. 반복실험의 결과는 Fig. 2의 그래프로 나타내었다.

실험결과 용접시간에 상관없이 8 kA에서 모두 날림이 발생하였고 6 kA 이상의 전류에서는 모두 버튼파단이 발생하였다. 또한 용접전류가 4 kA에서 6 kA로 증가하면 인장전단강도와 너깃사이즈가 매우 큰 폭으로 증가함을 보였다. 반면에 용접시간이 증가할 경우 인장전단강도와 너깃사이즈가 크게 증가하지 않았다.

4. 결과 및 고찰

4.1 회귀식 도출

실험계획법에 의해 수행된 실험결과들을 반응표면 회귀식의 목적함수로 설정하여 인장전단강도, 너깃사이즈, 날림발생, 파단형상에 대한 2차 회귀식 (5), (6), (7), (8)을 도출하였다⁸⁾.

$$\text{Tensile shear strength (kN)} = 15.66 + 0.7 \cdot T + 5.33 \cdot I + 0.27 \cdot T^2 - 2.13 \cdot I^2 + 0.45 \cdot T \cdot I \quad (5)$$

$$\text{Nugget size (mm)} = 5.17 + 0.23 \cdot T + 1.07 \cdot I + 2.22 \cdot 10^{-16} \cdot T^2 - 0.4 \cdot I^2 + 0.18 \cdot T \cdot I \quad (6)$$

$$\text{Expulsion} = 1.67 \cdot 10^{-16} + 0 \cdot T + 0.5 \cdot I + 5.55 \cdot 10^{-17} \cdot T^2 + 0.5 \cdot I^2 + 0 \cdot T \cdot I \quad (7)$$

Table 3 Design matrix and experimental results

DOE Table with responses								
Run order	Process parameters				Responses			
	Weld time (ms)	Wled current (kA)	Weld time code	Weld current code	Tensile shear strength (kN)	Nugget size (mm)	Expulsion	Pullout fracture
1	250	4	-1	-1	8.0	3.6	0	0
2	250	6	-1	0	15.6	5.1	0	1
3	250	8	-1	1	17.8	5.3	1	1
4	333	4	0	-1	8.1	3.6	0	0
5	333	6	0	0	15.9	5.2	0	1
6	333	8	0	1	18.7	5.9	1	1
7	417	4	1	-1	9.0	3.9	0	0
8	417	6	1	0	16.0	5.2	0	1
9	417	8	1	1	20.6	6.3	1	1

Fig. 2 Results of tensile shear strength and nugget size on each conditions.

$$\text{Fracture mode} = 1 + 0 \cdot T + 0.5 \cdot I + 1.11e^{-16} \cdot T^2 - 0.5 \cdot I^2 + 0 \cdot T \cdot I \quad (8)$$

도출된 인장전단강도 회귀식에서 용접전류 1차항의 계수는 5.33인 반면 용접시간의 1차항의 계수는 0.7로 용접전류에 비해 작았다. 너깃사이즈 회귀식에서는 용접시간의 2차항 계수가 $2.22e^{-16}$ 로 0에 가까운 값을 가진다. 날림발생 및 파단형상 회귀식에서도 용접시간 1차, 2차항의 계수와 용접시간, 용접전류의 교호항이 0 또는 0에 가깝다. 따라서 0 및 0에 가까운 계수항을 제거하여 식 (9), (10), (11), (12) 으로 다시 표현하였다.

$$\text{Tensile shear strength (kN)} = 15.66 + 0.7 \cdot T + 5.33 \cdot I + 0.27 \cdot T^2 - 2.13 \cdot I^2 + 0.45 \cdot T \cdot I \quad (9)$$

$$\text{Nugget size (mm)} = 5.17 + 0.23 \cdot T + 1.07 \cdot I - 0.4 \cdot I^2 + 0.18 \cdot T \cdot I \quad (10)$$

$$\text{Expulsion} = 0.5 \cdot I + 0.5 \cdot I^2 \quad (11)$$

$$\text{Fracture mode} = 1 + 0.5 \cdot I - 0.5 \cdot I^2 \quad (12)$$

도출된 인장전단강도 회귀식과 너깃사이즈 회귀식이 실제 측정값을 타당하게 예측하는지 결정계수(coefficient of multiple determination, R²)를 통해 확인하였다. 인장전단강도 회귀식의 결정계수는 0.99이고 너깃사이

Table 4 Results of ANOVA for tensile shear strength

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F ₀	p-value
I	179.77	2	89.88	211.77	<0.0001
T	3.08	2	1.54	3.63	0.1262
Error	1.70	4	0.42	-	-
Total	184.55	8	-	-	-

즈 회귀식의 결정계수는 0.98로 두 회귀식 모두 실제 측정값을 높은 정확도로 예측함으로 품질예측에 있어 유의미한 결과를 나타냈다.

(9), (10) 회귀식에서 각 항의 계수를 확인해 보면 용접시간의 계수는 용접전류의 계수보다 작은 값을 가진다. 두 독립변수가 인장전단강도와 너짓사이즈에 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위해 ANOVA분석을 실시하였다. Table 4에 실제 인장전단강도 측정값을 사용하여 계산한 ANOVA 분석결과를 나타냈다. 기각치는 유의수준 0.05일 때 전체 자유도 8, 에러 자유도 4, 용접전류와 용접시간의 자유도 각각2에서 6.94 이다. 이를 기준으로 용접전류의 기각치는 211.77로 계산되어 유의미 하다는 결과를 얻었고 용접시간의 기각치는 3.63으로 인장전단강도 결과값에 유의미하지 않다는 결론을 얻었다. 정량적으로 확인해보면 용접전류는 인장전단강도에 98.31%의 기여도를 가지며 용접시간은 1.69%의 기여도를 가진다. 용접전류의 P-value는 0.0001이하로 귀무가설을 기각하며 용접시간의 P-value는 0.1262로 인장전단강도에서 용접시간의 영향이 적다.

너짓사이즈에 대한 ANOVA 분석에서도 비슷한 결과가 도출되었다. 기각치 6.94를 기준으로 용접전류의 기각치는 57.9로 유의미하고 용접시간의 경우는 2.65로 너짓사이즈에 유의미하지 않았다. 따라서 용접전류는 너짓 형성에 95.63%의 기여도를 가지며 용접시간은 4.37%의 기여도를 가진다. 용접시간의 P-value 역시 0.1851 매우 높게 나와 유의미하지 않고 용접전류에서는 0.0011로 너짓사이즈에 유의미하다. 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

날림발생 회귀식에서는 계산결과의 중간값인 0.5를

Table 5 Results of ANOVA for nugget size

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F ₀	p-value
I	7.15	2	3.57	57.95	0.0011
T	0.33	2	0.16	2.65	0.1851
Error	0.25	4	0.06	-	-
Total	7.72	8	-	-	-

임계값으로 날림발생을 결정하였다. 0.5 이상일 경우 날림이 발생한다고 판단하며 0.5보다 작을 경우 날림이 발생하지 않는 것으로 판단하였다. 날림발생 회귀식에서 계산값이 0.5일 경우에 용접전류는 7.2 kA 였다. 또한 파단형상 회귀식에서도 날림방생과 마찬가지로 0.5를 임계값으로 설정하여, 0.5 이상이면 버튼파단으로 판단하였고 0.5보다 작으면 계면파단으로 판단하였다. 파단형상 회귀식에서 계산값이 0.5인 경우에 용접전류는 4.8 kA 였다.

4.2 반응표면분석

Fig. 3은 도출된 인장전단강도 회귀식을 이용해 용접시간 200 - 450 ms, 용접전류 3 - 9 kA까지의 범위를 계산하여 그 결과를 반응표면그래프로 표현하였다. 빨간 선은 날림발생 회귀식에서 계산된 날림이 발생되지 않는 용접전류의 상한선을 나타내고 파란선은 파단형상 회귀식에서 버튼파단을 보이는 용접전류의 하한선을 나타낸다. 초록선은 저항 점용접 생산라인에서 용접성 판단 기준으로 사용하는 너짓사이즈 $4\sqrt{t}$, 즉 너짓사이즈가 4.38 mm임을 나타낸다.

날림이 발생하지 전까지 용접전류와 용접시간이 증가할 수록 인장전단강도가 커지지만 용접시간이 미치는 영향은 용접전류의 영향보다 작다. 이는 ANOVA분석에서 용접전류와 용접시간이 인장전단강도에 미치는 영향과 유사하다. 또한 너짓사이즈 $4\sqrt{t}$ 를 나타내는 선이 버튼파단을 나타내는 선에 근접해 있기 때문에 기존 점용접 생산라인에서 사용하는 너짓사이즈 $4\sqrt{t}$ 가 용접성 판단에 적합하다는 결과를 얻었다.

Fig. 4는 인장전단강도 회귀식의 계산결과를 등고선 그래프로 나타낸 것이다. 버튼파단이 발생하는 용접전류부터 날림이 발생하는 용접전류까지의 인장전단강도

Fig. 3 Surface plot of tensile shear strength

Fig. 4 Contour plot of tensile shear strength

Fig. 6 Contour plot of nugget size

Fig. 5 Surface plot of nugget size

는 12 kN에서 20 kN 사이의 값을 보였다. 그리고 용접시간에 따라 인장전단강도 예측값의 변화는 적었으며 반면 용접전류에 따른 인장전단강도의 예측값은 큰 변화를 보였다.

Fig. 5는 너깃사이즈 회귀식을 통하여 용접시간 200 - 450 ms, 용접전류 3 - 9 kA 범위의 너깃사이즈 예측값을 반응표면그래프로 보여주고 있다. 인장전단강도의 반응표면분석 결과와 마찬가지로 너깃사이즈 예측값도 용접시간에 비해 용접전류가 더 큰 영향을 미쳤다.

Fig. 6은 너깃사이즈 회귀식을 통한 예측결과를 나타낸 등고선 그래프이다. 버튼파단이 시작되는 용접전류부터 날림이 발생하는 용접전류 이전까지의 너깃사이즈는 4.2 mm에서 6.2 mm 사이의 값을 나타낸다. 인장전단강도와 마찬가지로 너깃사이즈 $4\sqrt{t}$ 를 나타내는 경계선과 버튼파단이 발생하는 경계선이 근접해 있다.

4.3 검증실험

도출된 4개의 회귀식에서 계산된 예측값과 검증실험

을 통해 측정된 결과값을 비교하여 회귀식의 정확도를 검증하였다. 4가지 실험조건은 무작위로 선정하였다. 1번 실험조건은 날림이 발생하는 조건, 2번과 3번 실험조건은 날림이 발생하지 않고 버튼파단이 발생하는 조건, 4번 실험조건은 계면파단이 발생하는 조건이다. 예측값과 검증실험 결과값을 Table 6에 나타냈다. 인장전단강도의 예측 평균오차율은 5.6 %이며 너깃사이즈의 예측 평균오차율은 3.7 %로 나타났다. 그리고 날림발생과 파단형상 예측은 모두 정확하게 일치하였다. 따라서 도출된 4개의 회귀식이 저항 점용접 품질판단에 적합한 모델임을 검증하였다.

5. 결 론

합금화아연도금 (galvannealed, GA) 되어진 980 MPa

Table 6 Results of verification test

Run No.	1		2		3		4	
Weld parameters	7.4 kA 375 ms		7.2 kA 275 ms		5.0 kA 425 ms		4.4 kA 425 ms	
Kind of data	Meas	Esti	Meas	Esti	Meas	Esti	Meas	Esti
Tensile shear strength	16.1 kN	18.9 kN	17.6 kN	17.5 kN	13.1 kN	13.3 kN	11.0 kN	10.7 kN
Error	17.39 %		0.57 %		1.53 %		2.73 %	
Nugget size	5.7 mm	5.9 mm	5.5 mm	5.4 mm	4.5 mm	4.7 mm	4.0 mm	4.2 mm
Error	3.51 %		1.82 %		4.44 %		5.0 %	
Fracture mode	1	1	1	1	1	1	0	0
Expulsion	1	1	0	0	0	0	0	0

Fracture mode: 1-Pullout fracture, 0-Interfacial fracture
Expulsion: 1-occurred expulsion, 0-Unoccurred expulsion

급 TRIP강의 저항 점용접에 반응표면분석법을 사용하여 최소한의 실험으로 적정용접조건 범위를 도출할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 독립변수는 용접전류와 용접시간으로 설정하였고 종속변수는 인장전단강도, 너깃 사이즈, 날림발생, 파단형상으로 설정하였다. 그리고 검증실험을 수행하여 회귀식의 적정성을 검증하였다.

1) 중심합성계획법을 사용하여 총 9개의 실험조건으로 인장전단강도, 너깃사이즈, 날림발생, 파단형상의 회귀식을 도출하였다. 인장전단강도 회귀식의 결정계수는 0.99, 너깃사이즈 회귀식의 결정계수는 0.98로 도출된 회귀식이 적합함을 확인하였다.

2) 용접전류와 용접시간이 인장전단강도, 너깃사이즈에 미치는 영향을 분석하기 위해 ANOVA 분석을 하였다. 실제 측정결과값을 사용하여 분석한 결과 용접시간이 용접전류에 비해 인장전단강도와 너깃사이즈에 미치는 영향이 작게 나타났다.

3) 반응표면그래프에서 너깃사이즈 $4\sqrt{t}$ 를 나타내는 경계선과 버트파단이 발생하는 경계선이 근접함을 확인하였다. 따라서 저항 점용접 생산라인에서 사용하는 용접부 품질 판단 기준에 만족한다.

4) 검증실험 결과 인장전단강도 및 너깃사이즈의 예측 평균오차율은 각각 5.6 %, 3.7 %였다. 파단형상과 날림발생의 예측은 정확히 일치하였다.

ORCID: Sang-Gyu Choi: <https://orcid.org/0000-0003-3225-3582>

ORCID: Insung Hwang: <https://orcid.org/0000-0001-5572-8670>

ORCID: Young-Min Kim: <https://orcid.org/0000-0003-3573-8753>

References

1. H. Park and T. Kim, Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel using Response Surface Methodology, *Journal of KWS*, 21(2) (2003), 76-81.
2. Norasiah Muhammad and Yupiter HP Manurung, Mohammad Hafidzi, Sunhaji Kiyai Abas, Ghalib Tham, Esa Haruman, Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi-objective Taguchi method and RSM, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (8) (2012), 2365-2370
<https://doi.org/10.1007/s12206-012-0618-x>
3. S. M. Darwish and S.D. Al-Dekhial, Doo Hyun Lee and Choong Don Yoo, The Response Surface Approach to Spot Welding Commercial Aluminum Sheets, *Materials and Manufacturing Processes*, 13(2) (1998), 189-202
<https://doi.org/10.1080/10426919808935235>
4. D Zhao and Y Wang, S Sheng, Z Lin, Multi-objective optimal design of small scale resistance spot welding process with principal component analysis and response surface methodology, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25 (6) (2014), 1335-1348
<https://doi.org/10.1007/s10845-013-0733-2>
5. Xiaodong Wan and Yuanxun Wang, Dawei Zhao, Multi-response optimization in small scale resistance spot welding of titanium alloy by principal component analysis and genetic algorithm, *Int J Adv Manuf Technol*, 83(1-4) (2016), 545-559
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7545-9>
6. R. Sudhakaran and V. VeL Murugan, P. S. Sivasakthivel, M. Balaji, Modeling and analysis of ferrite number of stainless steel gas tungsten arc welded plates using response surface methodology, *Int J Adv Manuf Technol*, 64 (9-12) (2013), 1487-1504
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4117-0>
7. Shekhar Srivastava and R.K. Garg, Process parameter optimization of gas metal arc welding on IS:2062 mild steel using response surface methodology, *Journal of Manufacturing Processes*, 25 (2017), 296-305
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.016>
8. A. S. Shahi and S. Pandey, Welding current prediction in GMAW and UGMAW processes using response surface methodology, *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(3) (2006), 341-346
<https://doi.org/10.1179/174329306X113253>