고장력 강판과 알루미늄 판재의 SPR 공정에서 반응표면법을 이용한 최적조건의 선정

이 상 우* · 김 재 웅**,†

*(주)화신 생산기술

**영남대학교 기계공학부

Selecting Optimum Conditions for SPR Processing of High Tension Steel Plates and Aluminium Sheets Using Response Surface Methodology

Sang Woo Lee* and Jae-Woong Kim**,†

*Manufacturing Engineering, Hwashin Co., Ltd., Yeongcheon, 38898, Korea

**School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, 38541, Korea

†Corresponding author : jaekim@ynu.ac.kr

(Received April 8, 2019 ; Revised June 3, 2019 ; Accepted June 25, 2019)

Abstract

A study to select the optimal conditions for the self-piercing rivetting (SPR) of dissimilar metal plates was performed by analyzing the bond strength factors using experiments carried out with experimental design methods for the rivets, anvils, and press-fitting factor. The SPR process involves an interaction between an anvil and rivet geometry with a press-in factor, and the bond strength and shape are determined by each process parameter. This makes it important to analyze the factors that will have a great influence on the double bond strength and shape, so that the appropriate conditions can be selected and controlled at the production site. For this purpose, a three-level mixed orthogonal array table was constructed and experiments were performed to find the relationship between the design variables and the response values in the selectable design domain. Through this process, some conditions were identified that are applicable in the field of mechanical bonding of heterogeneous materials by SPR in the automobile manufacturing process. Accordingly, this study selected, materials and thicknesses which were actually utilized for automobiles. Samples were prepared and cross-section shapes were analyzed by scanning electron microscope. Also, an optimum condition for the SPR process for dissimilar metal plates was presented using response surface methodology and the bond strength was estimated.

Key Words : Self piercing rivet, SPR, Response surface methodology, RSM, Joining

1. 서 론

자기 천공 리베팅(self piercing rivetting, SPR) 공정은 차량 경량화를 위한 소재 접합에 가장 유리한 기술로 활발한 연구가 이루어지고 있다. SPR에 관련한 연구는 앤빌 및 리벳 형상 설계, 공정 연구 등으로 구분하여 수행되고 있다. 앤빌 및 리벳 형상 설계의 경우

유한요소 해석을 통한 설계 및 검증이 주를 이루고 있으며, 공정 연구의 경우 유한요소 해석 또는 실험적 방법에 의한 검증이 수행되었다.

Kim¹⁾은 유한요소 해석을 통하여 SPR과 판재 간의 접합성을 예측하고, 초고장력강과 알루미늄 합금의 접합조건에 만족하는 새로운 리벳과 앤빌 설계를 통해 해석 결과와 실제 접합 실험에 대한 비교를 수행하였다. Lim²⁾등은 전산해석을 이용한 SPR 접합부의 구조 강

성 및 피로수명에 대한 평가를 수행하여 접합축과 하중 방향의 관계에 따른 피로 수명을 예측하였다. Lee³⁾ 등은 SPR 접합법을 이용하여 Al-5052 판재에 대한 시험편을 통해 인장전단(tensile shear) 시험을 수행하고 조건에 따른 결과를 도출하였으며, 그 결과를 바탕으로 유한요소법을 이용한 피로강도를 예측하였다. Kim^{4,5)} 등은 알루미늄간의 접합 및 알루미늄과 스틸구조의 이중 재료 접합에 대하여 실험적 방법을 이용한 SPR 접합판재의 피로수명을 평가하였으며, 추가적으로 접합강도와 피로 수명 향상을 위해 SPR과 접합재를 병행한 하이브리드 접합의 피로수명을 평가하기도 하였다.

Cho⁶⁻¹¹⁾ 등은 유한요소법을 이용하여 SPR의 형상 설계, 단조 금형 설계, 헬리컬 SPR 설계, 펀치유닛 설계 등 다양한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 초고장력강과 알루미늄 합금과 같은 이중재료의 접합에 대한 최적 조건을 산출하고자 하였다.

SPR에 관련한 연구는 다양하게 수행되고 있으나, 대부분의 연구는 유한요소해석을 통한 리벳 또는 앤빌의 설계를 수행하거나, 그 설계 결과를 바탕으로 실험적 방법으로 검증하는 연구가 주를 이루고 있다. 이러한 연구들은 이론적 배경에 따른 계산 또는 유한요소해석을 통해 그 결과를 도출하고 있으며, 실제 현장적용과는 괴리감이 존재하는 것이 사실이다. 실제 생산현장에서는 공간적, 비용적 문제로 인해 접합되는 금속 판재의 기계적 성질에 따라 다양한 SPR 및 앤빌을 구비하는 것이 거의 불가능하다.

따라서, 본 연구에서는 실제 자동차 제조공정에서 적용되는 판재 및 SPR 공정 조건을 바탕으로, 앤빌, 리벳, 압입 인자 등에 대해 실험계획법을 이용하여 조건을 선정하며, 실험에 의한 접합강도 인자에 대한 분석을 통해 최적조건의 기준을 마련하고자 하였다.

2. 반응표면 분석법

2.1 반응표면법

반응표면 분석(response surface methodology, RSM)은 실험계획을 통한 요인분석이나 최적조건의 선정에서 입력변수 $x_1, \dots, x_n$ 가 결과 y 값과 어떤 관계를 갖고 있는지 분석해 주는 방법이다. 반응표면 분석법은 최적치라고 추정되는 값 주위에서 입력변수와 반응값의 관계를 그림으로 명확하게 표현할 수 있으므로 추정 최적값 주위에서의 변화를 분석하여 새로운 최적점을 구할 수 있으며, 실험요인 수준을 가장 좋은 혹은 원하는 반응값이 되도록 조정할 수 있다.

독립변수 $x_1, \dots, x_n$ 와 종속변수 y 간의 미지의 함수를 f 로 나타내면, $y=f(x)$ 로 나타낼 수 있다. 이러한 미

지 함수를 반응함수라 하며, 반응함수는 일반적으로 k 개의 독립변수에 대한 중회귀모형(multiple regression model)으로, 차수는 1차 내지 2차로 가정하여 풀게 된다. 초기의 주어진 독립변수들을 선형변환(linear transformation) 시켜서 새로운 독립변수 $x_1, \dots, x_k$ 를 정의하고, 실험자가 생각하는 흥미영역(region of interest)의 한 가운데 중심을 잡는다. 대체로 x_i 값들은 -1에서 +1 사이에 위치하도록 한다. 반응함수를 1차 회귀모형(first order regression model)으로 가정하면 식(1)과 같이 표현된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (1)$$

요인이 x_1, x_2 인 2 요인 2차 회귀모델인 경우를 수식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_3 * x_1 x_2 + \beta_4 * x_1^2 + \beta_5 * x_2^2 + \epsilon \quad (2)$$

반응함수가 2차식이고, 인자수가 2 개라면, 다양한 실험조건 (x_1, x_2) 에서 실험을 통하여 얻은 y_i 값들로 최소제곱 추정량 함수를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

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

이를 $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$ 로 $\hat{y}$ 를 미분하여 0이 되는 값을 X_0 라 하면, X_0 를 정상점(stationary point)이라 부르며, 이 정상점은 2차 반응표면에서 다음 세 가지 중 하나가 된다. 1) $\hat{y}$ 가 최대가 되는 점, 2) $\hat{y}$ 가 최소가 되는 점, 3) $\hat{y}$ 가 최대도 최소도 아닌 안부점(saddle point). 이 세가지 경우를 두 개의 독립변수에 대하여 $\hat{y}$ 의 등고선표(contour chart)로 그려보면 X_0 가 최대점이면 멀어질수록 $\hat{y}$ 의 값이 작아지고, 반대로 X_0 가 최소점이면 멀어질수록 $\hat{y}$ 의 값이 커진다. 만약 X_0 가 안부점이면, 증가하는 쪽도 있고 감소하는 쪽도 있게 된다.

반응표면 분석법에서 주로 사용하는 실험계획법에는 중심합성법(central composite design)과 박스-벤켄법(Box-Behnken design)이 있다. 중심합성법은 반응표면설계에서 가장 일반적으로 사용하는 방법이다. 중심합성법은 효율적으로 1차, 2차항을 추정하고자 할 때와 요인배치 실험 후에 추가 실험하여 곡률 반응변수를 모델화할 때 많이 사용된다. 박스-벤켄법은 1차, 2차항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 모든 요인들이 동시에 낮은 수준 혹은 높은 수준이 아니라는 것을 확신할 때, 모든 실험이 안정된 공정영역에서 이루어진다고 확신할 때 활용한다.

2.2 설계 변수 및 직교배열

SPR 접합부는 공정 조건에 따라 상이한 단면 형상 및 접합 강도를 나타낸다. 본 연구에서는 현장에서 적용 가능한 범위에서 인자들의 실험 구간을 선정하였다.

앤빌은 상하부로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 지름 5.3 mm, 길이 5 mm, 경도 480 HV인 리벳에 적합한 형상의 앤빌을 사용하였다. 실험 인자로는 압입 인자 중 스트로크(stroke), 압입 속도, 클램프(clamping) 압력의 3 가지 요인을 선정하여 실험을 수행하였다. 각 인자의 최소/최대값은 기존 실험을 통해 얻은 데이터와 실험 장비의 특성, 생산성 등을 고려하여 선정하였다. 여기서 스트로크는 SPR 품질기준 중 리벳 헤드 높이 허용치(Over 0.3 mm/Under 0.5 mm)를 만족시킬 수 있어야 하는데, 이를 만족하는 스트로크 범위가 177 mm에서 183 mm 사이임을 기존 실험을 통해 구하였으며, 이를 최소/최대값으로 선정하였다. 압입 속도는 생산성(작업 속도)을 고려하여, 최소값을 50 mm/s 그리고 최대값은 SPR 체결용 장비의 최대 압입속도인 100 mm/s로 선정하였다. 클램프 압력은 시편을 상호 밀착시킬 수 있는 최소 압착력인 3.0 kN을 시편에 눌림 자국과 변형이 없는 조건을 만족하는 최대 압착력 6.0 kN을 선정하였고, 리벳 및 하부 앤빌 주요 치수는 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용한 소재는 자동차부품 제조에 사용되고 있는 것으로, 두께 1.4mm, 인장강도 590MPa급의 아연 도금 고장력 강판 (SGAF590)과 두께 2.0mm, 인장강도 290MPa급의 알루미늄 판재 (A5083)를 대상으로 하였다.

또한 독립변수 3 개, 수준은 3 수준으로 선정하여 박스-벤켄 실험계획법을 적용한 직교배열표를 작성하였으며, 실험조건은 Table 1과 같이 총 15가지로 선정하였다.

3. 실험

3.1 실험 방법

본 연구의 목적은 SPR 공정에서의 변수를 선정하고

Fig. 1 Schematic illustration and dimension of rivet and lower anvil

Table 1 Box-Behnken design orthogonal array

	Stroke (mm)	Speed (mm/sec)	Clamp force (kN)
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	+1	0	-1
7	-1	0	+1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

각 조건에 따른 단면 형상과 접합 강도를 분석 및 평가하여 현장에서 적용 가능한 최적의 조건을 선정하는 것이다. 실험은 접합하고자 하는 상판과 하판의 종류 및 두께를 선정하고, 현장에서 적용 가능한 금형과 리벳을 이용하여 SPR 공정을 수행하였다. 이후 시편에 대한 단면 커팅, 단면 그라인딩 작업을 거쳐 전자 현미경을 이용하여 단면 측정 및 검사를 수행하였다. 단면 분석 이후 시편에 대한 접합강도를 평가하고 조건에 따른 결과를 분석하고자 하였다. SPR 접합부의 접합강도를 평가하는데 있어서 별도의 규격이 마련되어 있지 않은 관계로, 점 용접(spot welding)의 접합강도 평가 규격을 참고하여 시험을 실시하였다.

본 연구에서 수행한 실험 절차 및 방법을 Fig. 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 2 Procedure and methods for the experiments

3.2 실험 결과 및 고찰

3.2.1 단면형상

SPR 공정 변수인 스트로크, 압입 속도, 클램프 압력에 따라, 리벳 접합부의 단면 형상은 결정된다. 여기서 SPR 접합부의 품질 기준을 먼저 검토하면 다음과 같다.

Fig. 3에 나타낸 1번 항목은 남아 있는 바닥두께(T-min)로 최소 0.2 mm보다 큰 값이 되어야 하며, 그보다 작을 때는 균열, 리벳 돌출과 같은 품질 문제가 발생한다. 2번 항목인 인터록(interlock)은 소재간 체결 상태를 결정하는 중요한 품질 요소로 0.2mm 이상이 되어야 안정된 결합 상태를 유지할 수 있다.

Fig. 4에는 본 연구에서 수행한 각 시편에 대해 단면 커팅 및 단면 연마작업 후 측정된 단면의 형상과 결과를 일부 나타낸 것이다. 단면 측정은 남아있는 바닥 두께(T-min), 좌측 인터록(Left), 우측 인터록(Right)으로 구분하여 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Fig. 4와 Table 2의 결과를 검토한 결과 좌측 인터록과 우측 인터록의 편차가 크지 않은 것으로 판단되며, 이는 SPR 공정 중 리벳 피딩시 경사가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 또한 좌/우측 인터록(min. 0.2)과 바닥 두께(min. 0.2)를 모두 충족함을 알 수 있다.

3.2.2 단면 형상에 미치는 요인

박스-벤켄법을 이용한 실험결과를 바탕으로 회귀모형을 구한 후 요인분석을 하였다. 시편에 대한 단면 분석 결과 좌측 인터록과 우측 인터록의 편차가 크지 않으므로 인터록 평균값과 남아 있는 바닥두께에 대해 회귀모형을 구하였다.

인터록(y1)과 바닥 두께(y2)에 대한 2차 회귀 모형은 각각 다음과 같다.

Fig. 3 Schematic representation of SPR quality criteria

(a) 50 mm/sec, 177 mm, 4.5 kN

(b) 75 mm/sec, 180 mm, 4.5 kN

(c) 100 mm/sec, 183 mm, 4.5 kN

Fig. 4 Photography examples of joint cross section

Table 2 Result of cross section measurement

Stroke (mm)	Speed (mm/sec)	Clamp force (kN)	T-MIN (mm)	Left interlock (mm)	Right interlock (mm)	Interlock avg. (mm)	result
177	50	4.5	0.96	0.53	0.52	0.525	OK
183	50	4.5	0.88	0.63	0.65	0.64	OK
177	100	4.5	0.94	0.54	0.55	0.545	OK
183	100	4.5	0.9	0.65	0.64	0.645	OK
177	75	3	0.94	0.53	0.53	0.53	OK
183	75	3	0.88	0.63	0.62	0.625	OK
177	75	6	0.93	0.55	0.56	0.555	OK
183	75	6	0.88	0.7	0.7	0.7	OK
180	50	3	0.87	0.57	0.56	0.565	OK
180	100	3	0.9	0.6	0.61	0.605	OK
180	50	6	0.89	0.61	0.61	0.61	OK
180	100	6	0.94	0.57	0.58	0.575	OK
180	75	4.5	0.88	0.64	0.63	0.635	OK
180	75	4.5	0.88	0.64	0.63	0.635	OK
180	75	4.5	0.88	0.64	0.63	0.635	OK

$$y1 = -69.6 + 0.0765 \text{ stroke} + 0.0105 \text{ speed} - 0.326 \text{ force} - 0.002103 \text{ stroke} \cdot \text{stroke} - 0.000055 \text{ speed} \cdot \text{speed} - 0.00841 \text{ force} \cdot \text{force} + 0.000000 \text{ stroke} \cdot \text{speed} + 0.00248 \text{ stroke} \cdot \text{force} - 0.000476 \text{ speed} \cdot \text{force} \quad (4)$$

$$y2 = 88.9 - 0.955 \text{ stroke} - 0.030 \text{ speed} - 0.018 \text{ force} + 0.002597 \text{ stroke} \cdot \text{stroke} + 0.000023 \text{ speed} \cdot \text{speed} + 0.00148 \text{ force} \cdot \text{force} + 0.000149 \text{ stroke} \cdot \text{speed} + 0.000000 \text{ stroke} \cdot \text{force} + 0.000119 \text{ speed} \cdot \text{force} \quad (5)$$

회귀모형의 유효성을 분석하기 위해 Table 3 과 같은 분산분석표를 구하였다. 실험과 회귀모형을 통해 얻은 값 사이의 근사 오차의 정도를 나타내는 R^2 (결정계수)는 회귀변동 (SSR)과 총변동 (SST)의 비율 (SSR/SST)로 얻어진다. R^2 와 adjust R^2 (수정결정계수)의 경우 0과 1 사이의 값을 가지고, 1에 가까울수록 근사화가 잘 되었음을 의미한다. 본 연구에서는 각각의 획득된 결과를 바탕으로 각 인자들에 대한 F-값 및 결정계수를 통해 실험식의 유효성을 검토하였다.

SPR 공정에 따른 인터록 분석 결과의 경우, 결정계수는 97.41%로 비교적 높게 나타났고, F-값도 기각치보다 훨씬 큰 값을 나타내어 회귀식이 유효함을 나타내고 있다. 남아있는 바닥 두께 분석 결과의 경우, 결정계수는 89.73%로 나타났으며, F-값도 기각치보다 더 큰 값을 나타내어 회귀식이 유효함을 알 수 있다.

요인분석으로 인터록 평균값과 바닥 두께에 대한 스트로크, 압입 속도, 클램프 압력의 주효과도 분석을 수행하였다.

인터록의 경우 각 그래프의 기울기가 가장 크게 나타

나고 있는 스트로크의 영향이 가장 큰 것으로 판단된다. 또한 압입 속도 및 클램프 압력의 경우 평균값 근처에 분포하며 변곡점이 존재함을 알 수 있으며, 상대적으로 스트로크와 비교해 결과에 미치는 영향은 작다

(a) Main effects of interlock

(b) Main effects of floor thickness

(c) Interaction of interlock

(d) Interaction of floor thickness

Fig. 5 Main effect and interaction for each factor(stroke, speed, clamp force)

Table 3 Regression analysis of response

Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares
Regression	0.035058	9	0.003895
Error	0.000933	5	0.000187
Total	0.035991	14	
P-Value	R2	F0	F(α)
0.002	97.41%	20.8288	4.77

(a) Regression analysis for interlock

Source of variance	Sum of squares	Degree of freedom	Mean of squares
Regression	0.010226	9	0.001136
Error	0.001171	5	0.000234
Total	0.035991	14	
P-Value	R2	F0	F(α)
0.048	89.73%	4.8547	4.77

(b) Regression analysis for floor thickness

고 할 수 있다.

남아있는 바닥 두께의 경우 인터록 결과와 기울기가 반대인 결과를 보이는데 인터록 수치가 상승할수록 더 깊은 방향으로 리벳이 파고들며 따른 결과로 판단된다. 남아있는 바닥 두께 역시 인터록과 같이 스트로크의 영향이 가장 큰 것으로 판단되나, 미치는 영향은 인터록의 결과와 상반되는 결과를 나타내고 있다. 압입 속도 및 클램프 압력의 경우 평균값 근처에 분포하며 변곡점이 존재함을 알 수 있으며, 상대적으로 스트로크와 비교해 결과에 미치는 영향 역시 작은 것을 알 수 있다.

인자별 주효과도에 대한 분석 이후 각 인자에 대한 교호작용을 검토한 결과, 인자별 교호작용이 존재하는 것을 알 수 있다. 교호작용은 독립 변수 간에 상호 작용을 하여 서로의 작용에 영향을 주는 것을 말하며, 인터록에 대한 교호작용은 압입 속도와 클램프 압력간의 교호작용이 크게 나타났고 스트로크와 압입 속도는 정배열의 경우 교호작용이 거의 나타나지 않았으나, 역배열의 경우 교호작용이 있었다. 이를 통해 교호작용이 존재하는 하나, 미치는 영향은 적을 것으로 판단할 수 있다. 스트로크와 클램프 압력의 경우도 비슷한 결과를 나타내었다.

남아있는 바닥 두께에 대한 교호작용은 인터록과 결과와 유사하게 나타나고 있으나, 각 그래프의 기울기가 인터록과는 기울기가 반대 경향을 나타내고 있다. 압입 속도와 클램프 압력과의 교호작용이 크게 있었고, 변수에 대한 상호 영향이 크게 나타났다. 정배열의 경우 스트로크와 압입속도 및 스트로크와 클램프 압력에서는 스트로크의 값이 커질수록 교호작용이 크게 있었으나, 역배열의 경우 인터록 결과와 마찬가지로 교호작용이 있었다.

4 표면반응법을 이용한 최적화

4.1 접합부강도에 미치는 단면현상의 영향

만능시험기를 이용한 인장전단(tensile shear), 십자(cross) 인장전단 및 필(peel) 시험을 각각 수행하였다. Table 4와 같이 인터록이 최소, 중간, 최대값을 가지는 시편 3 종류에 대한 각 시험을 5회씩 수행하였다. 시험

Table 4 Specimens for joint strength test

Case	Interlock (mm)	T-min (mm)	Stroke (mm)	Speed (mm/s)	Clamp force
1	0.52	0.96	177	50	4.5kN
2	0.605	0.90	180	100	3.0kN
3	0.7	0.88	183	75	6.0kN

Fig. 6 Average value of tensile shear, cross tensile shear, and peel test results

결과는 Fig. 6와 같으며, 여기서 시험의 종류와 관계없이 스트로크 조건이 183 mm 일 때 최대 강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 분산분석을 통해 살펴본 결과에서 인터록과 남아있는 소재 두께가 최대가 되는 조건에서 스트로크의 주효과가 가장 크게 나타난 것과 비교하여 결과를 도출할 수 있다.

주효과가 가장 크게 나타난 스트로크가 접합부 강도에 가장 큰 영향을 미치며, 압입 속도와 클램프 압력은 상호간 교호작용으로 영향이 상쇄되어 결과에 큰 영향을 미치지 않았다. 스트로크의 수치가 높아질수록 인터록의 양이 증가하며, 그에 따라 인장전단시험에서 최대 강도가 증가하였다.

4.2 호감도 함수의 설계

산업 현장에서의 이중 소재 접합부에 대한 품질관리는 접합강도 측정이 아닌 인터록 측정으로 이루어지고 있다. 이는 생산제품의 접합부를 절단하여 인장전단시험 시편으로 제작하는 것이 어렵기 때문이다. 반면 인터록은 생산제품을 작은 크기로 절단하여 접합부 확인이 가능하고, 주기적 품질관리가 가능하므로, 산업 현장에서는 인터록에 의한 접합부 관리가 이루어지고 있는 것이다

인터록이 증가할수록 인장전단강도가 증가함을 전술한 시험결과를 통해 보였으며, 주효과 분석 결과 인터록과 남아있는 바닥 두께 값이 서로 상반된 결과 값을 가지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 최적화 과정을 단순화하기 위해 가용범위내서 최대 스트로크를 선정해 적용하는 것도 가능한 방법이었으나, 보다 안정적인 품질관리를 위해서는 최적화 기법을 이용하여 최적 조건을 찾는 것이 요구된다.

(a) Desirability function of interlock

(b) Desirability function of floor thickness

Fig. 7 Desirability function of interlock and floor thickness

본 연구는 최종적으로 접합강도가 최대가 되는 조건의 선정이 목표이다. 이를 위해 허용되는 범위 내에서 최대의 인터록과 최소의 바닥 두께를 도출하는 조건을 찾고자 하며, 이에 적합한 호감도 함수를 설계하는 것이 필요하다.

Fig. 7는 최대의 접합강도를 나타내는 조건의 최적화를 위한 호감도 함수이다. 인터록 호감도 함수는 SPR 품질기준에 준하여 최소값인 0.2 mm 이상에서 호감도 함수값을 선형적으로 부여하고, 인장전단 시편 조건의 최대 인터록 값인 0.7 mm 이상에 대해서는 최대값인 1을 부여하였다.

남아 있는 바닥 두께 또한 품질 기준에 준하여 최소값인 0.2 mm일 때부터 호감도 함수값을 부여하고, 단면 분석 결과에 따라 최소 남겨진 바닥 두께인 0.30 mm부터 0.87 mm까지 최대 호감도 함수값인 1을 부여하여 설계하였다.

4.3 최적조건의 선정

인터록이 최적화될 수 있도록 반응 최적화를 수행하였다. 다중 반응 예측 결과 스트로크 183 mm, 압입 속도 66.16 mm/sec, 클램프 압력 5.12 kN일 때 가장 최적의 결과를 나타내었다. 이때 예상되는 인터록은 0.68 mm, 남아있는 바닥 두께는 0.88 mm로 나타났다. 합성된 호감도 함수는 0.95로 최적화 입력값 선정이 우수함을 알 수 있다

Table 5 Derived optimum condition

Stroke, mm	Speed, mm/s	Clamp force, kN	T_min Fit, mm	Interlock Fit, mm	Composite desirability
183.0	66.16	5.12	0.87515	0.68284	0.9528

Fig. 8 Graphical result of optimum conditions **Fig. 9** Photograph of joint cross section by the optimum condition

Table 5는 반응 최적화 결과를 나타낸 것이고, Fig. 8은 반응 최적화에 대한 그래프 결과를 제시한 것이다.

반응 최적화를 통해 선정된 조건을 적용하여, SPR 공정을 수행하여 단면에 대한 재검토를 수행하였다. 박스-벤첸법에서는 요인배치 실험에서 축점을 갖지 않으며, 반응 최적화를 통해 도출된 결과는 앞선 실험에서는 포함되지 않는 조건이라 할 수 있다. Fig. 8은 반응 최적화를 통해 도출된 조건에 따라 SPR 공정을 수행한 시편의 단면 형상이다. 인터록은 좌우 평균값이 0.6727 mm로 측정되었으며, 남아있는 바닥 두께는 0.8821 mm로 측정되었다. 반응 최적화를 통해 예측된 값과 시편 측정 결과를 비교하였을 때, 인터록의 경우 98.5 % 수준으로 나타났으며, 남아있는 바닥 두께의 경우 약 100.9 % 수준을 보여 최대 1.5% 범위 내의 매우 근접한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구는 자동차 경량화를 위해 적용이 증가하고 있는 SPR 공정에 있어 실제 현장에서 적용 가능한 범위 내에서 공정변수를 최적화하기 위한 목적으로 수행하였다. 이를 위해 반응 표면법을 위한 직교배열표를 구성하였으며, 실험을 수행한 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) SPR 공정이 수행되는 현장에서 제어 가능한 변수 및 범위를 지정하고, 박스-벤켄 실험계획을 적용한 조건 배열표를 구성하였다.

2) 박스-벤켄 실험계획을 통해 제시된 조건에 따라 실험을 수행하였으며, 그 시편에 대한 분석을 통해 인터록, 남아 있는 바닥 두께에 대한 결과를 도출하였다.

3) 모든 조건에 대한 단면검사 결과, 실제 현장에서 적용되는 요구기준을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

4) 실험결과를 이용하여 인터록, 남아있는 바닥 두께에 대한 각각의 회귀 방정식을 도출하였고, 분산분석 및 회귀 분석을 통해 실험결과 및 회귀식에 대한 타당성을 확인할 수 있었으며, 스트로크가 다른 조건들에 비해 주효과도가 가장 높은 것을 알 수 있었다.

5) SPR 공정에 의한 이종 소재의 접합강도를 확인하기 위하여 인장전단, 십자 인장전단 및 필 시험을 수행하였으며, 시험결과 인터록이 접합강도에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

6) 최적조건의 선정을 위해 인터록은 가능한 큰 값, 남아있는 바닥 두께는 가능한 작은 값이 되는 만족도 함수를 선정하였으며, 다중 반응 예측 결과 스트로크 183 mm, 압입 속도 66 mm/sec, 클램프 압력 5.1 kN 일 때 가장 최적의 결과를 나타내었다. 이때 예상되는 인터록은 0.68 mm, 남아있는 바닥 두께는 0.88 mm로 나타났다. 합성된 호감도 함수는 0.95로 최적화 입력 값 선정이 우수함을 알 수 있다.

7) 본 연구를 통해 경험에 의존하여 수행되었던 SPR 공정에 대한 최적화의 근거를 마련하였으며, 향후 이러한 수행 과정 및 절차를 통해 다양한 두께에 대한 이종 재료 접합 조건을 구하는데 유용하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

ORCID: Sang Woo Lee: <https://orcid.org/0000-0001-8792-6495>

ORCID: Jae-Woong Kim: <https://orcid.org/0000-0003-0291-0844>

References

1. D. Kim, Ph. D. thesis, Design of SPR Considering Mechanical Properties of Sheet Metals, *Chunbuk National University, Jeonju, Korea* (2015).
2. B. K. Lim, J. C. Kim, G. Y. Lee, S. H. Shin, Y. W. Choi, D. I. Kim, D. H. Kim and M. C. Kim, Assessment of Fatigue Properties of SPR Jointed Various Specimens Using Finite Element Method, *Korean Weld. Join. Soc. Spring Conference*, Samcheok, Korea 46 (2006) 310-312.
3. M. S. Lee, K. T. Kim, S. H. Kang and H. Y. Kim, Fatigue Strength of Al-5052 Tensile-Shear Specimens using a SPR Joining Method, *J. Korean Soc. Safety*, 29 (4) (2014) 9-14.
<https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2014.29.4.009>
4. T. H. Kim, J. Suh, H. S. Kang, Y. S. Lee and C. D. Park, Fatigue Assessment Using SPR and Adhesive on Dissimilar Materials, *J. Korean Soc. Precis. Eng.* 28 (10) (2011) 1204-1209.
5. T. H. Kim, J. Suh, H. S. Kang and Y. S. Lee, Study on the structural stiffness analysis in SPR(Self-Piercing Rivet) Joint, *The Korean Soc. Automotive Eng. Conference*, Busan, Korea (2010) 1087-1090.
6. H. Y. Cho, D. B. Kim, K. W. Kim, J. Suh, M. Y. Lee and B. J. Park, Shape Design of SPR by using Finite Element Method, *Korean Soc. Precis. Eng. Spring Conference*, Jeju, Korea (2011) 1321-1322.
7. D. B. Kim, K. W. Kim and H. Y. Cho, Shape Design of Self-Piercing Rivet for Joining Dissimilar Sheet Metals, *J. Korean. Soc. Mech. Technol.* 14 (3) (2012) 93-99.
<https://doi.org/10.17958/ksmt.14.3.201206.93>
8. H. Y. Cho, D. B. Kim, K. W. Kim, I. H. Lee and H. S. Shin, Dies Design of SPR Forging using Finite Element Method, *J. Industrial Science and Technology Institute*, 26 (2) (2012) 13-18.
9. D. B. Kim, Y. G. Chu and H. Y. Cho, Design of self-piercing rivet to joint in advanced high strength steel and aluminium alloy sheets, *J. Weld. Join.* 33 (3) (2015) 75-80.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.75>
10. D. B. Kim, K. W. Kim and H. Y. Cho, Design of Helical SPR for Joining Advanced High Strength Steel and Aluminum Alloy Sheets, *J. Weld. Join.* 33 (3) (2015) 55-59.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.12.1209>
11. J. B. Lim, J. I. Han and H. Y. Cho, Design of Punch Unit for Strengthening Joint of Helical SPR, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 41 (12) (2017) 1209-1214.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.12.1209>