연 구 논 문

저항 점 용접에서 반응표면분석법을 이용한 고장력 TRIP강의 최적 용접 조건 설정에 관한 연구

박 현 성* · 김 태 형** · 이 세 헌***

*기아자동차 차체 생기팀
**한양대학교 대학원 정밀기계공학과
***한양대학교 공과대학 기계공학부

Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel using Response Surface Methodology

Hyunsung Park*, Taehyung Kim** and Sehun Rhee***

*Body Manufacturing Engineering Team, KIA Motors, Kwangmyung-shi, 423-701, Korea
**Department Precision Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
***Department Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract

Due to the environmental problem, automotive companies are trying to reduce the weight of car body. Therefore, TRIP(TRansformation Induced Plasticity) steels, which are high strength and ductility have been developed. The application of the TRIP steel to the members has been reported to increase the energy absorption capability.

Welding process is a complex process; therefore deciding the optimal welding conditions is an effective method on the basis of the experimental data. However, using a trial-and-error method from the beginning in such a wide area, in order to decide the optimal conditions requires too many numbers of experiments. To overcome these problems and to decide the optimal conditions, response surface methodology was used. Response surface methodology is a collection of mathematical and statistical techniques that are for the modeling and analysis of problems in which a response of interest is influenced by several variables and the objective is to optimize this response. The introduced method was applied to the resistance spot welding process of the TRIP steel and the welding parameters were optimized.

(Received December 6, 2002)

Key Words : Resistance spot welding, Transformation induced plasticity, Response surface methodology, Central composite design, CCD, Desirability function, Shear strength, Indentation

1. 서 론

저항 점 용접(resistance spot welding)은 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 시행착오(trial-and-error)를 통해 그 조건을 설정하는 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 CO_2배출량의 저감 등 환경규제에 대비하기 위한 경량차체의 개발은 차량개발의 최대 이슈가 되고 있다. 최근에는 off-set 충돌평가가 의무화 되면서 충돌안정성 향상을 위해서도 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 고장력강판은 대부분 350-400MPa급의 강판이 주류를 이루고 있다. 이렇게 고장력강판의 적용이 제한적인 이유는 인장강도상으로는 요구되는 강판이 개발되었으나 성형성이 나빠 단순 형상의 부품에만 적용되고 있기 때문이다. 최근에는 TRIP강(TRIP steel)이라는 강도가 높으면서도 연신율(elongation)이 좋은 신강종이 개발되어 고장력강판(high tensile steel)의 적용이 늘어날 것으로 예상된다.

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

2. 반응표면분석법(Response surface methodology)

2.1 반응표면분석법을 이용한 최적 조건 선정

저항 점 용접 공정의 경우, 용접 품질을 결정지을 수 있는 여러가지 제어인자와 외부 환경 조건이 있다. 이러한 인자들로 용접 전류(welding current), 통전 시간(welding time), 가압력(electrode force), 용접부 모재의 표면상태, 전극팁의 마모, 용접부 모재의 두께 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이 중에서 용접 품질에 가장 큰 영향을 끼치는 세가지 인자인 용접 전류, 용접 시간, 가압력을 사용하여 용접 품질을 분석하였다. 이러한 인자들이 점 용접부 강도(shear strength)나, 오목자국의 깊이(indentation), 날림(expulsion) 발생여부에 어떠한 영향을 끼치는 그 영향을 파악하고자 하였고, 이를 위해서 반응표면분석법[1,2]을 이용하였다. 이와 같이 구성된 실험을 통해서 구해진 데이터를 이용하여 용접부 품질을 나타낼 수 있는 용접 공정 모델을 구하였다. 이 모델을 사용해 적정 용접 조건을 구하고자 관심 있는 영역(region of interest)에서 최적값을 구하였다.

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

우선, 입력변수로 용접 전류, 통전 시간, 가압력을, 출력변수는 용접부 전단강도와 오목자국깊이를 사용하였다. 그리고, 저항 점 용접에서 세가지 입력변수 들과 출력변수 들은 서로 복잡한 관계를 가질 것이므로, 반응 표면 모형은 (1)과 같이 2차 회귀 모델(regression model)을 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_i는 입력변수들(용접전류, 용접시간, 가압력)의 coded unit이고, y_k는 저항 점 용접에서 품질을 나타내는 출력변수(전단강도, 오목자국깊이)이며, 실험 결과 데이터에 의해서 구해진 β는 회귀계수(regression coefficient)이다. β는 최소자승법(the method of least squares)에 의해 구해진다.

위 모델식 (1)을 구하기 위해서는 실험을 통해 용접 품질과 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.

2.2 목적함수의 최적화

실험계획법을 이용해 얻은 데이터를 이용해 저항 점 용접 공정에서 입력변수와 출력변수와의 관계를 나타내는 두가지 반응 표면을 (1)에서 제시한 2차 모델로 구하였다. 하나는 전단강도와 관련된 모델이고, 다른 하나는 날림여부를 판단할 수 있는 근거중의 하나인 오목자국깊이를 나타내는 모델이다. 이 모델들을 이용하여 관심있는 입력변수 영역에서 용접 품질을 최적화 시키는 조건을 찾으려고 할 때, 용접 품질을 나타내는 목적함수(objective function)로 호감도함수(desirability function)를 사용하였다. 호감도함수를 이용한 방법은 다중 응답에 대한 최적화된 값으로 입력값을 찾아주는 효과적인 방법으로 계획된 실험과 회귀분석(regression analysis)으로부터 유도된 회귀 모델을 사용하여 각 응답에 대한 호감도함수를 정의한다. 호감도함수는 각 응답(response)에 대한 만족도(fitness)를 나타내는 지수로 만족도가 클수록 1로 접근하고 만족도가 작을수록 0으로 접근하도록 정의하면, 호감도함수의 범위는 [0, 1]이다. 본 연구에서는 Derringer & Suich[3]가 제안한 각 응답에 대한 호감도함수를 단일 목적 함수로 정의한 복합호감도함수(overall desirability function)를 사용하여 최적조건을 구하였다.

3. 실 험

3.1 실 험

일반적으로 저항 점 용접에서 용접부 품질은 전단강도, 너깃 지름(nugget size), 오목자국깊이등을 기준으로 하고 있다. 특히 전단강도 값과 너깃 지름은 용접부 품질을 판단하는 중요한 지표이다. 그러나 본 연구

Table 1 Chemical compositions of TRIP (wt %)

C	Si	Mn	P	Fe
0.071	0.982	1.46	0.77	Bal.

에서는 날림이 발생하지 않는 최적 용접 조건을 구하고자 하였으므로 오목자국 깊이를 사용하여 날림 발생 여부를 판단하는 조건으로 삼았다.

저항 점 용접에서 전단강도와 오목자국깊이는 용접 전류, 통전 시간, 가압력에 의해 결정되므로, 이 값들을 이용하여 실험을 수행하였다. 사용된 용접기는 60Hz 단상 교류 저항 점 용접기를 사용하였다. 용접 될 모재는 인장강도 590MPa 의 고장력 TRIP강(590MPa TRIP steel)으로 항복강도는 408MPa, 연신율은 31 이며, 시험편 두께는 1.2mm이다. 강판의 화학조성은 Table 1과 같다. 이때 사용한 전극은 돔형 전극으로써 선단경은 6mm이다.

3.2 실험 계획법

중심합성계획은 2^k요인 배치법(2^k factorial experiment)과 같은 실험 방법으로는 변수의 수준변화에 따라서 발생하는 반응 표면의 곡면의 변화를 감지할 수가 없으므로, 이런 단점을 보완하고 보다 적은 실험횟수로 곡면을 추정하기 위해서 2^k 요인실험에 중심점(central point)과 축 점(axial point)을 추가한 실험 계획법이다.

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 용접전류 9kA, 통전시간 15cycle, 가압력 3.14kN의 경우에는 과도한 날림이 발생할 수가 있다. 그러므로 중심합성계획을 수정하여 관심 실험영역으로 설정하였다.

중심합성계획을 수정하기 위한 기준으로 다음과 같은 제한(constraint)을 두었다[4,5].

Table 2 Factors and levels for experimental design

Factor	Factor name	-1 level	0 level	1 level
ξ_1	welding force [kN]	4.12	3.63	3.14
ξ_2	welding current [kA]	7	8	9
ξ_3	welding time [cycle]	7	11	15

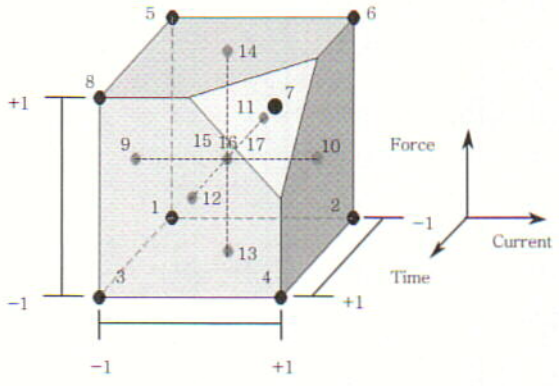

Fig. 1 Modified central composite design

$$\begin{aligned} &-1 \le x_1 \le 1 \\ &-1 \le x_2 \le 1 \\ &-1 \le x_3 \le 1 \\ &x_1 + x_2 + x_3 \le 2 \end{aligned} \tag{2}$$

위 세 조건을 만족하는 실험영역을 Fig. 1에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

수정된 중심 합성 계획을 통해 총 17번의 용접을 수행한 후 얻어진 각 응답은 Table 3과 같다.

설정된 관심 실험영역에서 실험을 통해 얻어진 결과를 이용해 구하는 반응표면으로 2차 회귀 모델을 사용하기로 하였으므로 각 입력인 용접 전류, 가압력, 통전시간에 대한 출력 전단강도(S)와 오목자국깊이(I)의 회귀식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{CR} = {} & 13.938 + 0.092x_1 + 0.632x_2 + 0.164x_3 - 0.201x_1^2 - 0.671x_2^2 \\ & - 0.363x_3^2 - 0.003x_1x_2 - 0.029x_1x_3 - 0.287x_2x_3 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} I_{CR} = {} & 0.331 - 0.714x_1 + 0.356x_2 + 0.247x_3 - 0.034x_1^2 - 0.109x_2^2 \\ & + 0.238x_3^2 + 0.005x_1x_2 - 0.107x_1x_3 - 0.069x_2x_3 \end{aligned} \tag{4}$$

최소제곱법에 의해 결정된 2차 회귀 모델의 타당성은 분산 분석(analysis of variance)의 F검정(F test)과 결정 계수(coefficient of multiple determination, R^2)에 의해 판단 할 수 있다.

분산 분석에서 F_0는 회귀의 평균제곱합(sum of mean squares form regression)을 잔차의 평균제곱합(sum of residual mean square)과의 비율로 나타낸 지수로써, 이 비율이 크면 회귀에 대한 평균제곱합이 잔차의 평균제곱합보다 커서 입력과 출력과의 관계를 설명하는데 유의하다는 의미를 가진다. F 분포표를 이

Table 3 Modified central composite design and experimental result

	Natural variables			Coded variables			Response	
no	ξ_1	ξ_2	ξ_3	x_1	x_2	x_3	I	S
1	4.12	7	7	-1	-1	-1	0.10	11.99
2	3.14	7	7	1	-1	-1	0.05	11.40
3	4.12	9	7	-1	1	-1	0.95	12.67
4	3.14	9	7	1	1	-1	0.50	12.51
5	4.12	7	15	-1	-1	1	0.25	13.40
6	3.14	7	15	1	-1	1	0.25	13.37
7	4.12	9	15	-1	1	1	0.80	12.89
8	3.30	8.7	13	0.7	0.7	0.7	0.40	14.00
9	4.12	7	11	-1	0	0	0.30	13.75
10	3.14	7	11	1	0	0	0.35	13.74
11	3.63	9	11	0	-1	0	0.20	13.41
12	3.63	9	11	0	1	0	0.50	13.43
13	3.63	8	7	0	0	-1	0.15	12.37
14	3.63	8	15	0	0	1	0.35	14.18
15	3.63	8	11	0	0	0	0.30	13.93
16	3.63	8	11	0	0	0	0.30	13.85
17	3.63	8	11	0	0	0	0.30	13.90

용하여 주어진 유의수준(level of significant)과 자유도(degree of freedom) (ϕ_R, ϕ_E)에 따른 기각치(ϕ_R, ϕ_E ; α)(critical)를 구하여, $F_0 > F(\phi_R, \phi_E ; \alpha)$이면 회귀식이 유의하다고 할 수 있다. 위 회귀식에 대해서 유의수준(level of significant, α)을 0.05로 선택하면, 기각치는 $F(\phi_R, \phi_E ; \alpha) > F(9, 7 ; 0.05) = 3.68$이다. 이 기각치와 반응변수에 따른 각각의 와 Table 4와 Table 5를 비교하면 식(3), (4)의 회귀식들은 모두 유의함을 알 수 있다.

이번에는 결정계수 값을 비교해 보면, 각 회귀식에 대한 결정계수값은 0.955, 0.893 이다. 회귀식에 대한 이 결정계수의 의미는 전단강도 총 변동의 95.5%, 오목자국깊이 총 변동의 89.3%가 회귀식에 의해 설명된다는 것이다.

따라서, 각 회귀 모델에 대해 F 검정과 결정계수값을 살펴본 결과, 저항 점 용접 공정을 잘 표현하는 모델임을 알 수 있다.

회귀 모델 식(3), (4)는 최적 조건을 구하고자 하는 관심 실험 영역에서 각 입력변수에 대한 응답을 예측해 주고 있으므로, 이를 이용해서 저항 점 용접에서 양호한 용접을 만드는 최적입력변수 값을 결정하는데 이용

Table 4 Analysis of variance for the regression model of shear strength

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	F_0
regression	9	9.588	1.065	16.409
error	7	0.455	6.493E-02	
total	16	10.043		

Table 5 Analysis of variance for the regression model of indentation

Source of variance	Degree of freedom	Sum of squares	Mean squares	F_0
regression	9	0.763	8.481E-02	6.518
error	7	9.109E-0.2	1.301E-02	
total	16	0.854		

할 수 있다. 본 연구에서 사용된 출력응답인 전단강도와 오목자국깊이 두가지 값을 모두 만족시키는 용접전류, 용접시간, 가압력 조건을 찾기 위해서, 다중 출력변

수에 대한 최적 입력값을 찾아내는 방법 중의 하나인 호감도함수를 사용하였다. 전단강도의 경우 응답이 최대로 되어야 할 때 사용되는 한면 호감도함수(one-sided desirability function)을 이용하였으며, 오목자국깊이의 경우는 응답이 목적값을 가지고 있을 때 쓰이는 양면 호감도 함수(two-sided desirability function)를 이용하였다.

전단강도기준에서 하한치는 1.2mm 저항 점 용접 강판의 자동차사 기준 강도인 11.9kN을 사용하였고 상한치는 용접실험 결과 최고인 15kN을 사용하였다. 오목자국깊이는 AWS 에서 권고하는 기준을 사용하여 판두께의 25%인 0.6mm를 넘으면 호감도함수를 0으로 결정하였다[6].

$$d(\hat{S}(\mathbf{x}))=\begin{cases}0 & if \quad \hat{S}\le 11.9\\ \left(\dfrac{\hat{S}-11.9}{15-11.9}\right) & if \quad 11.9<\hat{S}<15\\ 1 & if \quad \hat{S}\ge 15\end{cases} \tag{5}$$

$$d(\hat{I}(\mathbf{x}))=\begin{cases}0 & if \quad \hat{I}<0\\ \left(\dfrac{\hat{I}-0}{0.4-0}\right) & if \quad 0\le\hat{I}\le 0.4\\ \left(\dfrac{\hat{I}-0.6}{0.4-0.6}\right) & if \quad 0.4\le\hat{I}\le 0.6\\ 0 & if \quad \hat{I}>0.6\end{cases} \tag{6}$$

여기서, $d(\hat{S}(\mathbf{x}))$는 전단강도의 호감도함수이며, $d(\hat{I}(\mathbf{x}))$는 오목자국깊이의 호감도함수이다.

각 응답에 대한 호감도함수의 기하학적 평균(geometric mean)으로 정의된 복합 호감도 함수를 구하면 다음과 같다.

$$D(\mathbf{x})=\left(d(\hat{S}(\mathbf{x})\cdot d(\hat{I}(\mathbf{x})\right)^{1/2} \tag{7}$$

정의된 목적함수인 식 (7)을 이용하여 관심 실험영역에서 목적함수를 최대로 하는 입력 변수를 구하였다. 그 방법으로 관심실험영역을 작은 격자로 나누어 각 격자에서 목적 함수 값을 구하는 격자탐색법(Grid-search method)을 이용하였다. 일반적으로 목적함수값을 최대로 만드는 입력 값을 구하기 위한 최적화하는 알고리즘을 사용하지만, 본 연구에서는 전 영역에 대해 걸쳐 그 값을 비교하여 최적 입력값을 정하였다.

격자탐색법을 이용하여 구한 입력변수의 최적 coded values는 $(\chi_1,\ \chi_2,\ \chi_3)$= (0.2, 0.85, 0.15)이고, natural values($\xi_1,\ \xi_2,\ \xi_3$) = (3.53, 14, 8.15) 이며, 이때의 복합 호감도 함수는 0.8498이다. 이 최적 조건에서 예측된 출력변수는($\hat{S},\hat{I}$)= (14.14, 0.39) 이며, 실제 용접 실험을 통해 얻어진 측정 값은 ($S,\ I$) = (14.30, 0.35)이다. 두 값을 비교해 볼 때, 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 2는 최적 가압력인 3.14kN에서의 전류와 시간에 따른 전단강도의 호감도 함수 분포이다. 대체적으로 저전류와 짧은 시간의 영역에서 전단강도가 작게 나오며, 중간전류와 긴 용접시간 부근에서 전단강도가 크게 나타난다. 또한 그래프의 형상으로부터 최적조건이 정상점이라는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 오목자국깊이에 대한 호감도 함수의 분포이다. 이것은 전단강도와는 달리 양면 호감도 함수를 사용하였기 때문에 전류의 coded value가 0.3부근에서 호감도 함수의 최고값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 복합 호감도 함수는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 두 출력응답을 동시에 나타내주고 있다. 저전류와 고전류 영역에서는 전류부족과 날림

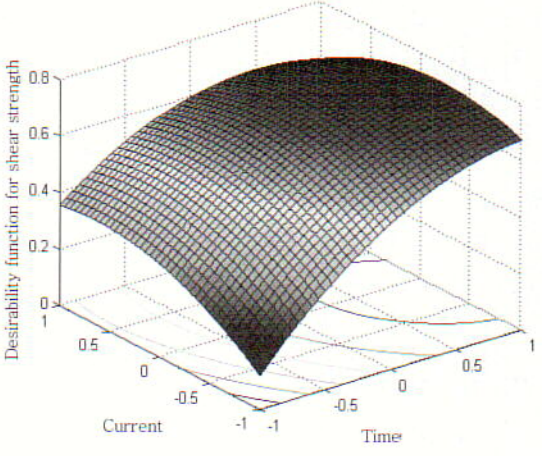

Fig. 2 Result of desirability function for shear strength

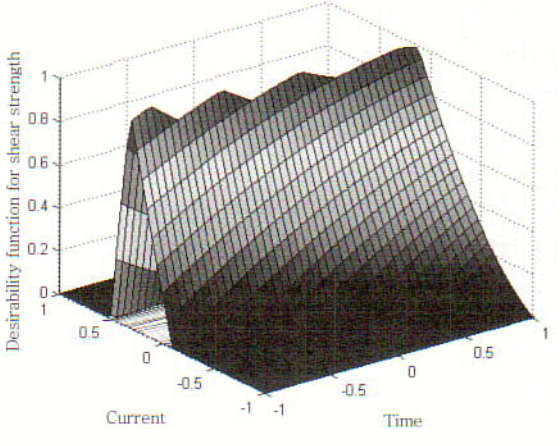

Fig. 3 Result of desirability function for indentation

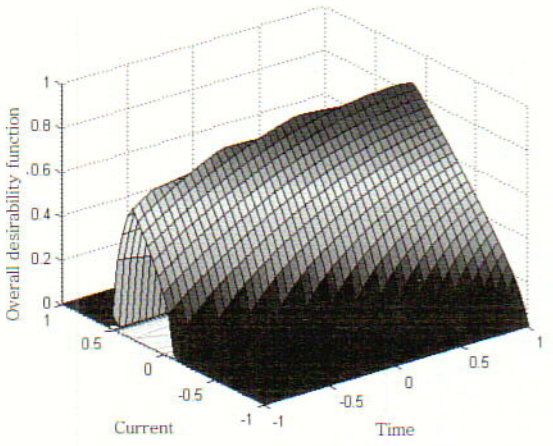

Fig. 4 Result of overall desirability function

의 발생에 의해 오목자국깊이를 만족하지 못해 0에 가까운 값을 보인다. 따라서 적정전류영역에서 긴 용접시간 부근이 가장 높은 호감도 함수를 나타내는 최적의 용접조건 임을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 TRIP강의 경우에는 일반강에 비해 낮은 전류에서 최적의 용접이 되는 것을 알 수 있다. 이는 비저항(resistivity)이 1×10^4 Ωm 로 다른 성분에 비해 큰 Si과 C, Mn 등의 함유량이 높음으로 인하여 저항용접시 발열이 많이 발생하기 때문이다.

5. 결 론

생산 현장에서 필요로 하는 고장력 TRIP강에 저항 점 용접 공정을 적용하기 위해서는 용접부 품질을 양호하게 만드는 최적 입력조건의 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 회귀모델을 얻었다. 보다 적은 회수의 실험과 관심영역에서의 효과적인 회귀 모델을 위해 수정된 중심합성계획을 설계하였다. 얻고자 하는 두 반응 표면의 출력값을 모두 만족시키고자 복합 호감도 함수를 적용하여 최적 용접 조건을 구하였다. 반응표면분석을 통해 얻은 최적 용접 조건의 예측값과 실제 측정값을 비교해봄으로써 그 값의 타당성을 검증하였다.

6. 후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 청정생산기술 과제의 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. R.H. Myers and D.C. Montgomery : Response surface methodology, Process and product optimization using
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**(1980), 214-219
4. E.D. Casttillo, D.C. Montgomery, and D.R. Mccarville :Modified desirability functions for multiple response optimization, Journal of Quality Technology, **Vol.28** (1996),337-345
5. D. Kim and S. Rhee : Design of an optimal fuzzy logic controller using response surface methodology, IEEE Trans. on Fuzzy systems, **9-3**(2001)
6. H.K.Lee : A Study on Solid Particle Erosion Wear Chateriracstics of High Cr White Iron Hardfacing by Response Surface Method, Journal of KWS, **20-4** (2002),145-150 (in Korean)
7. Recommended Practices for Automotive Weld Quality-Resistance Spot Welding, Supersedes AWS D8.7-78, SAE J-1188, An American National Standard
8. Phenomena of Resistance Welding and It' s Application, JWS, **8-2**(1983), 101-108 (in Japanese)