

차체용 1.2GPa급 초고장력 TRIP강판의 저항 점 용접 강도 예측에 관한 연구

신 석 우^{*.†} · 이 중 훈^{**} · 박 상 흡^{***}

^{*}한국생산기술연구원 중소기업기술인력지원단

^{**}(주)가진테크 기술연구소

^{***}공주대학교 기계자동차공학부

Strength Estimation Model of Resistance Spot Welding of 1.2GPa Grade Ultra High Strength TRIP Steel for Car Body Applications

Seok-Woo Shin^{*.†}, Jong-Hun Lee^{**}, and Sang-Heup Park^{***}

^{*}Technology Service Division for SMEs, KITECH, Cheonan, 31056, Korea

^{**}GajinTech Co., Ltd., Cheonan, 31028, Korea

^{***}Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

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

(Received December 21, 2017 ; Revised January 15, 2018 ; Accepted January 22, 2018)

Abstract

Recently, in the automobile industry, it has become necessary to increase the fuel efficiency and the safety regulations to make the vehicle lightweight. Therefore, it is necessary to manufacture the dual phase steel, the complex phase steel, the MS steel, the TRIP steel, and TWIP have been increasingly applied to high strength steel with a tensile strength of 700MPa or more. In order to apply ultra high tensile steel to the body, welding process is essential. Resistance spot welding, which is advantageous in terms of cost, is applied more than 80% in body welding. It is generally known that ultra high tensile strength steel has poor weldability because it increases the alloy element content to improve strength. In the case of resistance spot welding of ultra high tensile steel, it has been reported that the proper welding condition area is reduced and interfacial fracture and partial interfacial fracture occur in the weld zone. In order to overcome such problems, researches on welding quality judgment that can predict the defect and quality in real time are actively conducted. In this study, the dynamic resistance of the weld is monitored using the secondary circuit process variables detected during resistance spot welding, and the factors necessary for welding quality determination are extracted from the dynamic resistance pattern. Using the analyzed factors, a regression model that could estimate weld strength was developed. Two regression equations of model were suggested depending on the factors, and it was showed that the model developed by backward elimination method was effective one for weld quality estimation. Based on this, a regression model that can be applied to the field was suggested.

Key Words : Dynamic resistance, Regression model, Resistance spot welding, TRIP steel, Weld strength

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 연비향상 및 안전규제 강화

에 따라 차량 경량화가 필수적으로 요구됨에 따라 DP강(Dual Phase steel), CP강(Complex Phase steel), MS강(Martensitic Steel), TRIP강(Transformation Induced Plasticity steel), TWIP강(Twinning Induced

Plasticity steel) 등과 같은 인장강도 700MPa 이상인 초고장력강(Ultra High Strength Steel)의 적용이 증가하고 있다¹⁾. 초고장력강을 차체에 적용하기 위해서는 용접공정이 필수적이며, 원가 측면에서 유리한 전기저항점용접(Resistance Spot Welding, RSW)이 차체 용접에서 80%이상으로 가장 많이 적용되고 있다²⁾.

초고장력강은 강도향상을 위해 합금원소 함량을 늘리기 때문에 일반적으로 용접성이 열악한 것으로 알려져 있다³⁾. 이러한 초고장력강의 저항점용접의 경우 적정 용접조건 영역이 축소되고 용접부에서 계면파단 및 부분계면파단이 발생하는 것으로 보고되어 있어 결합 및 품질을 실시간으로 예측할 수 있는 용접품질 판정 연구가 활발히 진행되고 있다.

초기의 연구에서는 음극선 오실로스코프를 이용하여 모니터링한 저항 점 용접 공정의 전기적 변수들을 이용하여 동저항을 구하고 용접부 형성에 따른 이 패턴들의 변화를 고찰하였다. 이후 Savage 등⁴⁾ 및 Dickinson 등⁵⁾의 연구에서는 저항 점 용접 공정에서 계측할 수 있는 가압력, 재료의 표면 상태, 용접 전류, 용접 전압, 동저항 및 입력 에너지 등을 검출하여 너겟의 형성을 고찰하고자 하였다. 특히, 동저항의 변화 양상에 따른 용접 특성과의 관계를 도식적으로 설명하여 이들 관계를 효과적으로 설명하였다.

한편 국내에서는 용융부 형성 및 성장에 대한 물리적 현상들을 잘 설명할 수 있는 동저항의 패턴을 인공 신경 회로망에 적용함으로써 용접부의 품질을 판단하는 연구가 진행되었으며, 퍼지 알고리즘을 이용하여 용접부의 품질을 실시간으로 예측하고자 하는 연구도 진행되었다⁶⁾. 하지만 기존의 연구들은 계측방법의 특성상 현장에서 실시간으로 용접품질을 판정하기에는 많은 문제점이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 저항 점 용접을 수행할 때 검출되는 2차 회로 공정 변수를 이용하여 용접부의 동저항을 모니터링하고, 이 동저항 패턴에서 용접 품질 판단에 필요한 인자들을 추출하였다. 추출한 인자들을 상관 분석하여 용접 품질과의 상관성을 파악하였으며, 상관성이 높은 인자들을 이용하여 회귀분석을 실시하였다. 이를 근거로 현장 적용이 가능한 회귀 모델을 제시하였다.

2. 용접실험

본 연구에서 사용된 재료는 자동차 차체 제작용으로 사용되는 1.2GPa급 초고장력 TRIP강판 SGAF1180 1.2t를 사용하였다. 이들 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 제작하였다. 시험편의 치수는 길이 100mm, 폭 30mm로 선단경 6mm인 Cu-Cr소재의 전극을 사용하여 저항 점

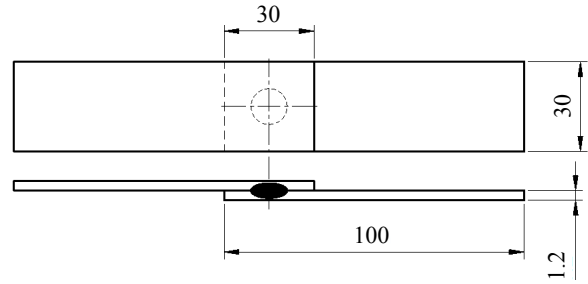


Fig. 1 Schematic drawing of the specimen (Unit: mm)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the investigated base metal

Wt(%)					UTS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)
C	Si	Mn	P	S			
0.12	0.1	2.4	0.01	0.002	1229	835	10

Table 2 Welding condition

Variables	Minimum value	Maximum value	Increase value
Current[kA]	3	11	1
Time[Cycle]	12	24	3
Force[kgf]	200, 300, 400		

용접을 실시하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 강재의 화학성분과 기계적 성질을 나타내었다.

Table 2는 용접조건을 나타낸 것으로 가압력, 유지 시간 등은 ISO 18278-2에서 추천하는 용접조건으로 고정하고, 용접전류와 용접시간을 변화하여 실험하였다.

3. 로브 곡선

저항 점 용접에서 로브곡선을 이용하여 용접성을 평가한다. 로브곡선은 크게 3개의 영역으로 구성되며, 용접부 너겟의 크기나 혹은 인장전단강도가 기준보다 낮은 영역과 적정 용접영역 그리고 스파터가 발생하는 영역이다⁷⁾.

본 연구에서는 SGAF1180 1.2t 두 장을 점 용접하여 인장전단 강도와 스파터 발생을 기준으로 로브곡선을 생성하였고 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 기준 인장전단강도는 자동차사에서 제시하는 강도를 적용하였다. 용접성 로브는 하한선 및 적정 용접구간, 상한선을 각각 색깔로 구분하였다. 하한선부터 옅은 회색으로 하여 상한선은 진한 회색으로 표시하였다. 하한선과 상한선 중간을 적정용접구간으로 중간 회색으로 나타내었다.

Table 3에서 보는 바와 같이 용접부의 인장전단강도는 용접전류가 증가하고 용접시간이 늘어날수록 증가하

Table 3 Welding lobe curve for SG AFC 1180 1.2t sheet

Time[cycle]	Current[kA]									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
24	3.81	10.29	15.21	18.38	19.89	20.06	-	-	-	
21	3.89	9.90	14.39	18.34	18.55	19.78	-	-	-	
18	3.68	9.72	14.54	17.81	18.17	19.61	-	-	-	
15	3.67	8.81	14.03	17.46	17.58	18.83	-	-	-	
12	3.54	8.56	13.75	17.13	17.92	18.54	19.27	-	-	

(a) Electrode force : 200 kgf

Time[cycle]	Current[kA]									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
24	0	6.49	12.13	17.84	19.95	20.76	21.06	21.29	-	
21	0	6.13	11.93	17.50	19.42	20.06	21.76	21.83	-	
18	0	6.27	11.75	17.71	19.07	20.11	21.32	21.41	-	
15	0	5.81	11.58	16.83	18.63	19.28	20.73	21.02	-	
12	0	6.04	11.32	15.83	18.27	19.12	20.12	21.29	-	

(b) Electrode force : 300 kgf

Time[cycle]	Current[kA]									
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
24	0	0	9.83	17.85	19.52	20.61	20.97	21.98	22.25	
21	0	0	9.07	17.72	19.82	20.42	20.34	21.87	21.64	
18	0	0	9.21	17.37	19.29	19.90	20.13	21.79	21.05	
15	0	0	9.23	16.76	19.16	20.52	20.63	21.18	20.61	
12	0	0	8.97	16.28	19.56	20.05	19.97	20.54	19.81	

(c) Electrode force : 400 kgf

는 것을 확인할 수 있다. 이는 접촉 저항에 의한 발열이 전류나 시간이 증가할수록 너겟 지름을 증가시키고 이에 따라 인장전단강도가 증가한다. 또한 같은 전류대나 시간일 때 가압력이 증가할수록 인장전단강도는 감소하게 되는데, 이는 전극 가압력이 늘어나면서 재료의 계면이 파괴, 연화되면서 계면 접촉저항이 줄어들어 발열량이 줄어들기 때문이다. 전극의 가압력이 200kgf, 300kgf, 400kgf 로 늘어날수록 적정용접조건외의 범위가 넓어지는 것을 확인할 수 있다.

이는 가압력이 증가하면서 접촉저항은 감소하여 높은 전류를 요구하여 하한선은 오른쪽으로 이동하고, 전극 가압력이 늘어나면서 용융금속의 분출압력보다 전극 가압력이 커지게 되면서 상한선 또한 오른쪽으로 이동하게 되는데 하한선보다 상한선이 이동하는 전류 폭이 크기 때문에 전체적으로 적정용접구간의 범위는 넓어지게 된다.

4. 동저항과 예측인자 추출

4.1 동저항 계측

동저항(전극 양단에서 용접사이클별로 측정된 전기저

항)은 저항점용접 공정 중에 모니터링 할 수 있는 중요한 공정 변수로 사용되어 왔다. 그래서 많은 범용 용접 모니터들이 용접 사이클 동안에 발생하는 열·물리적 변화를 반영하는 동저항 신호의 다양한 패턴들을 샘플링하기 위해 사용되었다.

용접부의 용접 품질과 밀접한 관계를 갖고 있는 2차 동저항을 측정하기 위하여 사용한 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 2차 회로의 실효값들을 측정하기 위하여 전압 계측 장치와 홀 센서를 사용하였다. 용접 전압은 전

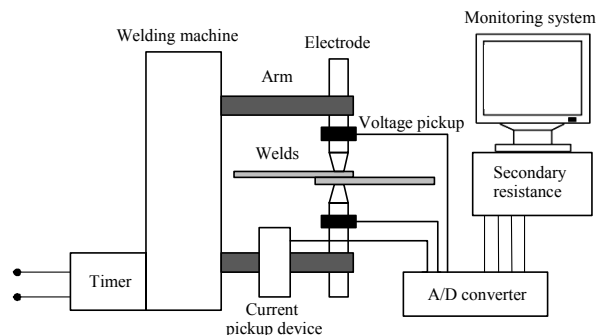


Fig. 2 Schematic diagram of the conventional secondary dynamic resistance monitoring system

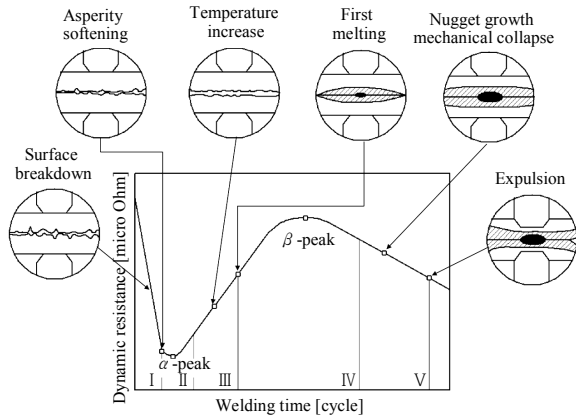


Fig. 3 Typical dynamic resistance curve

극 팁의 양 선단에 직접 클립을 부착하여 전압강하의 순시값을 계속하였으며, 최대용량 20kA의 홀 센서를 용접기의 아래 팔에 위치시켜 2차 회로에 흐르는 전류를 측정하였다.

일반적인 동저항의 형태와 그에 따른 너겟 형성 거동을 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 용접이 시작됨과 동시에 급격한 저항 감소를 보이고 있는 I 단계에서는 초기 전류의 통전과 동시에 금속 표면에 금속 오염물질들이 붕괴되면서 이러한 현상이 발생한다. II 단계에서는 접촉면의 요철부가 사라지면서 전류가 흐를 수 있는 접촉면적이 증가해서 용접부의 저항이 감소함과 동시에 접촉부의 온도 상승으로 비저항(resistivity)은 증가한다. 이에 따라 두 가지 저항 변화가 평형을 이루어 α-peak라고 하는 극점을 이룬다. 이후에는 온도증가에 의한 비저항의 증가로 동저항이 계속 증가하다가 IV 단계에 접어들면서 접촉부에서 용융이 시작된다. 이 단계에서는 모재와 접촉부의 온도 증가에 의한 비저항 증가가 용융부 확장에 의한 통전영역 증가 및 기계적 소성 변형에 의한 통전 거리 단축으로 인한 저항 감소와 평형을 이루어 β-peak라는 극점을 이룬다. 이 점을 지나면 용융 너겟의 성장과 소성변형에 의한 두께 감소는 더욱 두드러져 동저항은 현저한 감소 경향을 보이다가 전극의 가압력을 받고 있는 너겟 주위 고상 금속이 더 이상 용융 금속을 지탱하지 못하게 되면 중간 날림(expulsion) 현상이 발생하고 이로 인하여 순간적인 동저항의 불연속적 감소를 유발한다⁷⁾.

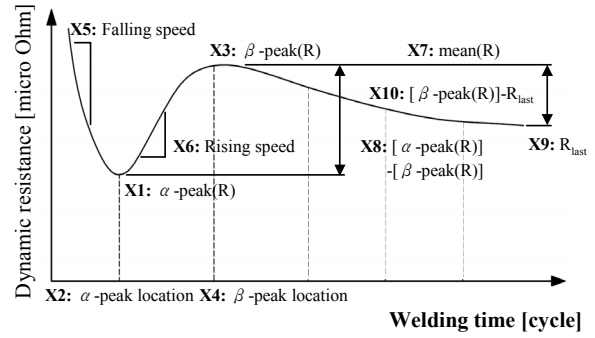


Fig. 4 Secondary dynamic resistance pattern and feature extraction

4.2 용접강도 예측인자 추출

저항 점 용접의 용접 품질을 좌우하는 너겟 생성과 성장 현상은 용접기의 2차 회로에서 얻은 공정 변수를 이용하여 계산한 2차 회로 동저항에 의해 직접적으로 파악될 수 있다.

2차 회로 동저항은 일반적으로 Fig. 4와 같은 형태를 나타내며, 이러한 동저항의 패턴을 근거로 용접 강도 예측 모델에 사용될 10가지 인자를 추출하였다. 먼저, 동저항의 기하학적 추출 인자로서, 너겟의 생성 시점과 관련된 α-peak 동저항 X1과 위치 X2, 너겟의 성장 속도와 관련된 β-peak 동저항 X3와 위치 X4, α-peak 이전의 동저항 하강속도 X5, α-peak 이후의 동저항 상승속도 X6, 모든 동저항의 평균 X7, α-peak와 β-peak 동저항의 차 X8, 최종저항 X9, β-peak와 최종저항의 차 X10을 이용하였다⁸⁾. Table 4에 독립변수인 추출인자 값의 예를 나타내었다. Fig. 5는 용접 조건 별 2차 회로의 전극에서 검출한 실효 전압과 실효 전류에 의해 측정된 동저항 패턴을 나타내었다. 낮은 전류에서의 경우 β-peak 이후 상대적으로 높은 동저항을 나타냈으며, 적정 전류에서는 전형적인 동저항 패턴이 관찰되었다. 가압력 별 지나친 용접 전류가 가해진 경우에는 중간날림(expulsion) 현상으로 인한 저항의 급격한 감소가 관찰되었다.

5. 용접 강도 예측 모델 개발

5.1 상관행렬과 상관관계

본 절에서는 회귀분석을 수행하기에 앞서 종속 변수

Table 4 The independent variables of the dynamic resistance pattern factors for the regression analysis (Electrode force=400kg, 15cycle, 5kA)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Variables	256	1.44	283	3.24	178	87	284	27	226	57

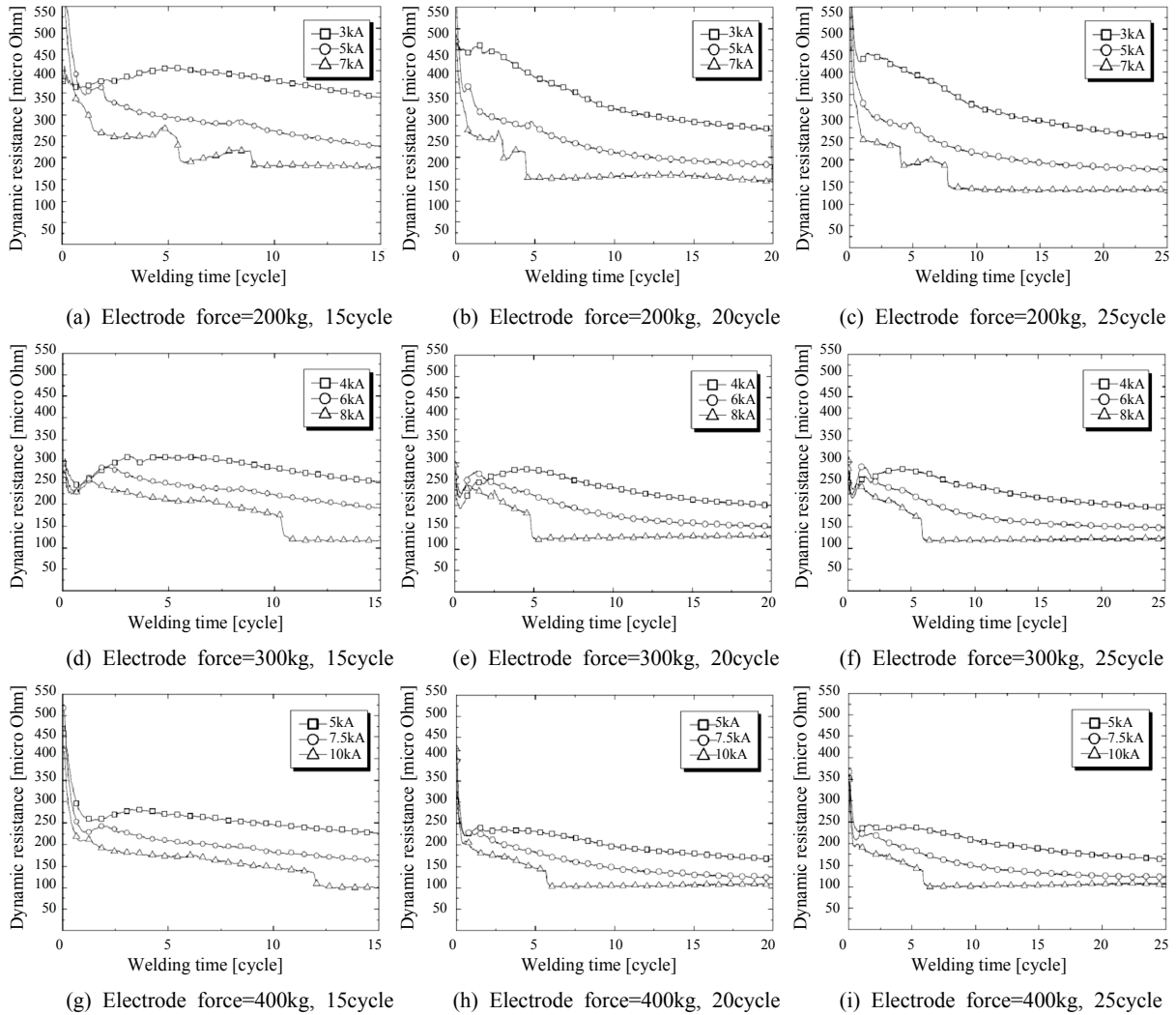


Fig. 5 Dynamic resistance monitoring results

인 용접강도 YS 와 독립 변수인 판단 인자 X1~X10 사이의 상관 행렬을 구하여 상호간의 관계를 파악하였다. 일반적으로 판단 인자와 종속 변수 사이의 상관 관계가 클수록 그 인자가 용접 품질에 미치는 영향이 크다고 볼 수는 있으나, 단지 변수들 사이의 선형적인 관계에만 의존하므로 큰 상관 계수를 갖는 인자들이라 할지라도 회귀모델에 부적합할 수 있다. 반면에 낮은 상관 계수를 지닌 변수임에도 불구하고 회귀모델의 오차를 줄이는데 기여할 수 있는 변수들도 존재한다. Table 5는 용접 강도에 대한 변수들 상호간의 관계를 상관행렬로 나타낸 것으로 β -peak 동저항의 최대값 X3과 그 위치 X4가 상대적으로 용접 강도 YS와 0.9이상의 상관 계수를 나타내고 있어 좋은 선형성을 보여준다. X3과 X4 사이는 상관계수 0.971의 높은 상관성을 나타내고 있으므로 이들 변수들이 회귀모델에 사용될 경우 주의를 필요로 한다.

5.2 다중 선형 회귀모델 개발

판단 인자들의 상관행렬을 바탕으로 동저항에서 추출한 10개의 동저항 패턴 특성 인자 중에서 상관 계수의 값이 0.971으로 나타난 X4와 다중공선성이 큰 X3를 제외한 9개의 인자 들을 이용하여 선형 회귀 분석을 실시하였다. 회귀 모델은 식 (1)와 같이 다중선형회귀모델 (multiple linear regression model)을 사용하였다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + \beta_9 X_9 + \beta_{10} X_{10} \quad (1)$$

9개의 독립변수들을 동시에 투입하여 분석한 모델 I의 결과를 살펴보면, 수정된 결정계수(adjusted coefficient of determination, R^2)는 0.975, 추정값의 표준 오차 (standard error of the estimate)는 0.1216로 용접 강도의 변동 중 97.48% 이상이 본 회귀모델로 설

Table 5 Correlation matrix of independent variables

	YS	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
YS	1.000	-0.592	-0.052	-0.935	-0.960	-0.166	0.807	-0.897	-0.897	-0.742	-0.124
X1	-0.592	1.000	0.339	0.783	0.608	-0.037	-0.457	0.289	0.289	0.567	0.467
X2	-0.052	0.339	1.000	0.080	0.101	-0.808	-0.343	-0.188	-0.188	0.297	-0.167
X3	-0.935	0.783	0.080	1.000	0.971	0.177	-0.730	0.893	0.821	0.748	0.281
X4	-0.960	0.608	0.101	0.971	1.000	0.123	-0.861	0.850	0.861	0.729	0.127
X5	-0.166	-0.037	-0.808	0.177	0.123	1.000	0.078	-0.049	0.306	-0.116	0.415
X6	0.807	-0.457	-0.343	-0.730	-0.861	0.078	1.000	-0.757	-0.704	-0.627	-0.065
X7	-0.828	0.794	0.318	0.893	0.850	-0.049	-0.757	1.000	0.647	0.834	0.180
X8	-0.897	0.289	-0.188	0.821	0.861	0.306	-0.704	0.647	1.000	0.632	0.005
X9	-0.742	0.567	0.297	0.748	0.729	-0.116	-0.627	0.834	0.632	1.000	-0.265
X10	-0.124	0.467	-0.167	0.281	0.127	0.415	-0.065	0.180	0.005	-0.265	1.000

Table 6 Significance probability values of regression coefficients for model I

	Constant	X1	X2	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Probability value	3.83E-11	0.00262	0.0770	1.17E-15	0.955	0.927	0.0611	0.0010	0.0639	0.0874

Table 7 Unstandardized regression coefficients of model II

Model No.	Entered factors								R ² (adj)	Std. Error of estimate
	Constant	X1	X2	X4	X7	X8	X9	X10		
Model II-1	2.818	-0.246	-0.054	-0.208	0.098	-0.059	-0.097	-0.003	0.962	0.1529
Model II-2	2.829	-0.276	-0.046	-0.205	0.079	-0.060	-0.061	-	0.965	0.1494
Model II-3	2.810	-0.263	-	-0.213	0.063	-0.055	-0.073	-	0.967	0.1467
Model II-4	2.806	-0.229	-	-0.203	-	-0.055	-0.048	-	0.969	0.1439
Model II-5	2.793	-0.249	-	-0.209	-	-0.56	-	-	0.970	0.1420

명 가능함을 알 수 있다. 또한 회귀식이 통계적으로 유의한지를 검정하기 위한 분산분석에 의하여 F검정 통계량이 157.058이고, 이에 따른 유의 확률은 9.157E-27을 나타내어 판단 인자 9가지를 사용하여 추정된 회귀식은 유의하다고 판단 할 수 있었으며, 이 회귀식을 식 (2)에 나타내었다. 이때 얻은 추정된 회귀 방정식의 회귀계수의 유의성을 검증하기 위하여 회귀계수들의 통계적 유의확률을 Table 6에 나타내었다

$$\begin{aligned}
 Y = & 2.807 - 0.258X_1 - 0.054X_2 - 0.202X_4 \\
 & - 0.002X_5 + 0.010X_6 + 0.098X_7 \\
 & - 0.059X_8 - 0.092X_9 - 0.002X_{10}
 \end{aligned} \tag{2}$$

선형 다중회귀분석의 두 번째 방법으로 부분상관계수와 회귀계수의 유의확률에 따라 회귀 모델에 적용될 변

수들을 단계적으로 탈락시키는 후진 제거(backward elimination)를 사용하여 변수를 선택하였다. Table 7은 단계별 참여 인자와 그들 계수의 유의확률 그리고 각 단계별 모델에 따르는 수정된 결정계수 및 추정값에 의한 표준오차를 나타낸 것이다.

전체 독립변수를 회귀 모델에 투입한 뒤 회귀 계수의 유의 확률이 0.10 이상이 되면 탈락시킨 결과 각 단계별 수정된 결정계수는 증가하고 표준오차는 감소되어 회귀식에 따른 예측 성능이 향상되고 있음을 알 수 있다. 모델 II-5에서는 변수 X1, X4, X8 만 투입되어 수정된 결정계수 0.970과 표준오차 0.1420을 나타내었으며, 이를 선형 다중회귀분석의 최종적인 회귀식으로 제시하였다. 식 (3)은 모델 II-5의 회귀식을 나타내고 있다.

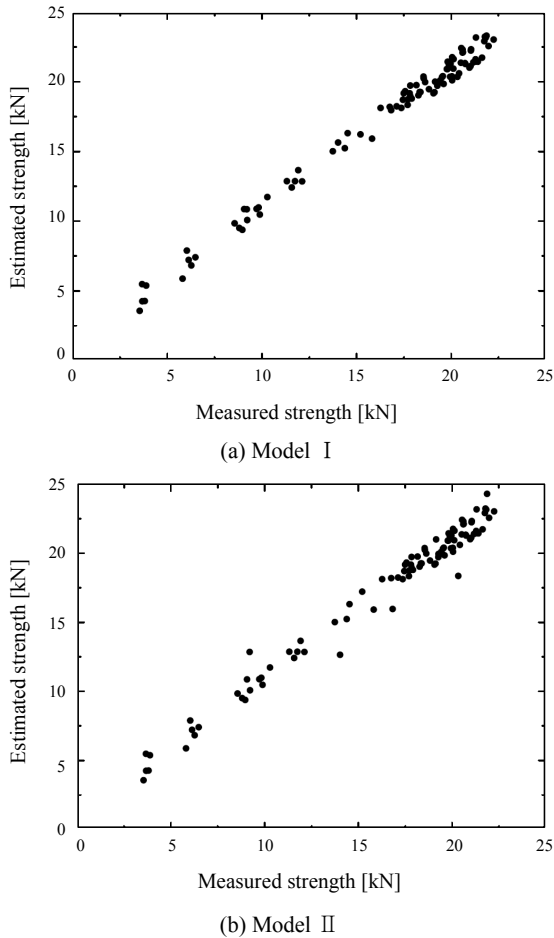


Fig. 6 Relationship between measured and estimated tensile strength by regression models

$$Y = 2.793 - 0.249X_1 - 0.209X_4 - 0.56X_8 \quad (3)$$

5.3 회귀모델에 의한 용접 강도 예측

회귀 모델을 이용하여 용접부의 용접강도를 Fig. 6에 나타내었다. 회귀 모델 결정에 사용되었던 100개의 데이터를 회귀식에 적용시켜 얻은 예측 용접 강도와 인장 전단시험을 통하여 얻은 결과를 비교하여 그래프로 나타내었다. Fig. 6(a)와 같이 동저항에서 추출한 9개의 인자를 모두 이용한 모델 I의 경우, 실제 강도와 예측된 강도는 강도가 낮은 영역에서 높은 영역까지 고무 좋은 선형성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 판단 인자의 후진제거법에 의하여 회귀 모델을 결정한 모델 II 중에서 최종적으로 얻은 모델 II-5에 대한 결과를 Fig. 6(b)에 나타내었다. 세 가지 인자만을 사용하였음에도 불구하고 모델 I과 흡사한 선형성을 보이고 있으며, 수정된 결정계수에 의한 변동의 설명도도 3% 이내를 나타내고 있으므로 용접강도 예측에 효과적인 모델로 판단된다.

이 모델에 사용된 세 가지 인자들의 표준화된 회귀

Table 6 Standardized regression coefficients for the Model II-5

Entered factors	X1	X4	X8
Standardized regression coefficients	-0.172	-0.489	-0.426

계수를 Table 6에 나타내었다. 이 결과에 따르면 용접 강도 예측에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 β -peak의 위치 X4이며, β -peak 동저항과 α -peak 동저항의 차 X8이 다음으로 중요한 인자로 판명되었다. 여기서 X4에 해당하는 β -peak의 발생시간이 빠를수록 강도가 증가하였으며, X8의 경우 X4와 비슷한 경향을 나타내었다.

6. 결 론

자동차 차체의 경량화를 위한 1.2GPa급 초고장력 TRIP강판의 저항 점 용접성을 평가하고 용접 강도를 예측하여 이를 현장에 적용 가능한 예측 모델을 개발하고자 동저항을 모니터링 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동저항에서 10가지 판단 인자들을 추출하여 용접부의 용접 강도와 직접적으로 관련 있는 인자들을 상관 분석과 회귀분석을 이용하여 찾아내었다.
- 2) 너겟의 성장 속도와 관련된 β -peak 동저항 X3와 위치 X4 사이에는 큰 다중공성성이 존재함으로 X3를 제외한 9가지 판단 인자를 사용하여 회귀분석을 수행하였으며, 이상의 독립변수들을 동시에 투입하여 계산한 선형 다중회귀 분석결과, 이 모델로서 총변량 97.48%를 설명할 수 있고 표준오차도 0.1616에 불과하였다.
- 3) 후진제거법에 의한 회귀 분석 결과에 의하면 β -peak의 위치 X4, β -peak 동저항과 α -peak 동저항의 차 X8이 용접 강도를 예측할 수 있는 지배적 인자임이 밝혀졌으며, 세 가지 인자만을 사용했음에도 불구하고 수정된 결정계수 0.970과 표준오차 0.1420의 예측 성능을 보였다.
- 4) 이상의 회귀식을 저항 점 용접기에서 적절히 사용하면, 용접이 완료됨과 동시에 용접부의 용접 강도를 예측할 수 있으며 이에 따른 품질 관리도 가능하리라 사료된다.

ORCID: Seok-Woo Shin: <http://orcid.org/0000-0002-6049-9275>

References

1. R. Kuziak, R. Kawalla, S. Waengler, Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2) (2008), 103-117
2. T. K. Han, K. Y. Lee and J. S. Kim, Recent Developments

- and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, *Journal of KWJS*, 27(2) (2009), 131-132
3. Du-youl Choi, Young-gon Kim, Trend of Joining Technology for Automotive Sheet Steels, *Journal of KWJS*, 27(2) (2009), 125-130
 4. Savage, W. F, Nippes, E. F. Nippes, and Wassell, F. A Wassell, Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, *Welding Journal*, 57(2) (1978), 43s-50s
 5. Dickinson, D. W., Franklin, J. E. Franklin, and Stanya, A. Stanya, Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring, *Welding Journal*, 59(6) (1980), 170s-176s
 6. Young-joon Cho, Se-hun Rhee, Ki-woan Um, A Study of Real-Time Weldability Estimation of Resistance Spot Welding using Fuzzy Algorithm, *Journal of KWJS*, 16(5) (1998), 76-84
 7. Chang-Seok Son, Young-Whan Park, Lobe Curve Characteristic Analysis of Resistance Spot Welding for Sheet Combination of 780MPa Steel Sheet Using Simulation, *Journal of KWJS*, 30(6) (2012), 68-73
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.6.554>
 8. Young-joon Cho, A Study of Dynamic Resistance Monitoring and Intelligent Quality Estimation for the Manufacturing Process Automation during Resistance Spot Welding, *Ph.D. Thesis, Hanyang University* (2000), 11-51