

시뮬레이션을 이용한 고효율 차체용 780MPa급 강판의 저항 점 용접 강도 예측 모델 개발

Strength Estimation Model of Resistance Spot Welding in 780MPa Steel Sheet Using Simulation for High Efficiency Car Bodies

손창석* · 박영환***

Chang-Seok Son* and Young-Whan Park***

(Received 23 January 2015, Revision received 25 March 2015, Accepted 26 March 2015)

Abstract: Nowadays, car manufacturers applied many high strength steels such AHSS or UHSS to car bodies for weight lightening. Therefore, a variety of applied steel sheet to car bodies increased and the needs of simulation to evaluate weldability also increased in order to reduce the cost and time. In this study, resistance spot welding simulations for DP 780 Steel with 1.0 and 1.4 mm thickness were conducted with respect to lobe curve. 2 regression models to estimate tensile shear strength were suggested and they were second order polynomial regression model and optimized second order regression model. The performance of these models was evaluated in terms of the coefficient of determinant and average error rate.

Key Words : Resistance spot welding, Simulation, Lobe Curve, Regression Model

1. 서 론

동력 기계중의 하나인 자동차는 선박과 비행기와 더불어 중요 운송수단의 하나이다. 자동차는 연소 과정을 통해 엔진에서 발생된 에너지를 동력원으로 사용하며, 환경오염, 배기가스 및 CO₂ 가스 규제등과 맞물려 최근 엔진의 효율을 극대화하기 위한 다양한 노력이 진행되고 있다. 자동차의 에너지 효율을 극대화하기 위하여 차체의 경량화를 통해 적은 연료로 주행할 수 있는 방안

이 이용되고 있다. 차체를 경량화하여 에너지 효율을 높이는 대표적인 방법으로는 기존 강판을 고강도 강판으로 바꾸고 두께를 줄이는 방법이 주로 사용되고 있으며, 이에 따라 자동차에 사용되는 강판도 저탄소강에서 고강도 강판 혹은 초고강도 강판까지 다양해지고 있다.¹⁾

고강도 강판을 이용하는 경우, 실제 차체에 적용되기 전에 반드시 고려해야 하는 것 중에 하나는 새로운 강판의 용접성이다. 일반적으로 차체는 저항 점 용접으로 수행되며, 저항 점 용접성을 평

*** 박영환(교신저자) : 국립부경대학교 기계공학과
E-mail : parkyw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6148
*손창석 : 국립부경대학교 기계공학과

*** Young-Whan Park(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.
E-mail : parkyw@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6148
*Chang-Seok Son : Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

가하거나 저항 점 용접 후 용접부 강도에 대한 평가 결과는 차체의 설계에 매우 중요한 데이터를 제공할 수 있다.

차체의 종류와 두께가 다양해지고 있으며, 이러한 모든 강종과 두께에 대하여 실험에 의존하여 결과를 얻는다면, 많은 실험 데이터와 시간, 비용 등이 소모된다. 그러므로 이를 극복하기 위한 방법으로 시뮬레이션 기법이 적용되고 있다. 그와 함께 다양한 강종과 두께에 적용하기 위하여 강도를 예측할 수 있는 모델이 개발된다면 그 효용성은 매우 크다고 볼 수 있다.

저항 점 용접에서 일반적으로 용접성 로브를 이용하여 용접성을 확인하고 최적 용접 조건을 구한다.²⁾ 용접조건을 최적화하는 과정에서 강도나 너겟의 크기를 예측모델이 필요로 하며 예측 모델링을 통하여 용접조건을 최적화하는 과정이 필요하다. 이러한 예측 모델링을 위해 Hong³⁾ 등은 저항 점 용접의 용융부를 신경회로망과 회귀모델을 사용하여 예측하였다. 또한 Muhammad⁴⁾은 중심합성계획법을 이용하여 용접 공정변수를 설계하고 회귀식을 이용하여 너겟 및 열영향부(HAZ)를 예측하였다. 한편, 용접조건에 적정구간을 유추하기 위하여 인공 신경망으로 적정구간을 트레이닝 시키고 예측모델의 성능을 평가한 연구도 발표되었다⁵⁾. 이러한 기존 연구는 실험을 바탕으로 한 것으로 소재 다양화에 적극적으로 대응할 수 없다는 한계가 있다.

그러므로 본 연구에서는 780MPa급 고강도 강판에 대하여 다양한 두께 조합에 대한 저항 점 용접 시뮬레이션을 통해 용접부의 강도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 이를 위하여 먼저 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하기 위하여 시뮬레이션 결과와 용접 실험 결과를 비교하였다. 또한 다양한 용접 조건에 따라 780MPa급 판재의 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 이용하여 로브곡선을 얻을 수 있었다. 각 용접 조건에서 얻어진 용접 강도를 예측할 수 있는 모델로 회귀분석을 2차 회귀모형을 제안하였고, 입력 인자를 최소화 한 수 정된 2차의 회귀모델을 제안할 수 있었다.

2. 저항 용접 시뮬레이션

저항 점 용접 시뮬레이션을 위하여 Fig. 1과 같이 전극과 용접 강판을 모델링을 하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 강판은 중앙에 걸쳐 있으며 상하부로 전극이 맞닿아 있는 형태이다. 모델링에 사용된 전극은 돔(Dome)형 전극으로 자동차에 저항 점 용접을 실시할 때 가장 많이 사용하는 전극 형상이며 재질은 CuCr 합금으로 하였다. 또한 20℃의 냉각수가 4 L/min의 유량으로 전극 상하부에 흐르도록 경계조건을 설정하였다. 시뮬레이션은 현장에서 쓰이는 재료와 전극을 원통형 대칭(cylindrical symmetric) 모델의 형태로 구성하였으며, 또한 메쉬 모델은 4각 메쉬 형태를 이용하였다.

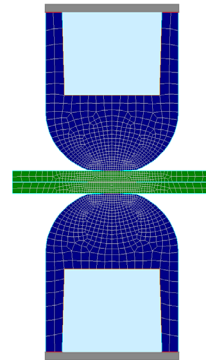


Fig. 1 Mesh of steel sheet and electrode for numerical simulation

시뮬레이션에 사용된 재료는 AHSS의 강재 중 하나인 DP780을 기준으로 하여 시뮬레이션을 수행하였으며 두께는 1.0t와 1.4t를 이용하였다. 동종 및 이종 두께의 재료 조합으로 시뮬레이션을 진행하였다. 각 강판의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Element composition for DP780 (wt%)

Element	C	Mn	Si	Cr
Contents	0.07	2.4	1.05	0.1
Element	Mo	other	Fe	
Contents	0.03	0.21	Re	

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle	미접합				
Nugget(mm)	0	3.9	4.9	5.5	5.9
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.7	4.4	5.1	6.1	6.6
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	4.1	5.3	5.6	6.3	6

(a) Experimental Result

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.358	3.553	4.36	5.053	5.551
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.99	4.132	4.815	5.461	5.819
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.715	4.66	5.288	5.839	6.205

(b) Simulation Result

Fig. 2 Nugget diameter and cross section of DP780 1.0t steel sheets

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.7	4.1	4.8	5.8	6.1
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.5	4.9	5.9	6.6	6.7
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	4.3	5.6	6.7	7.5	6.6

(a) Experimental Result

200kgf					
current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.42	3.781	4.615	5.216	5.863
300kgf					
current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21cycle					
Nugget(mm)	2.921	4.273	5.143	5.796	6.285
400kgf					
current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21cycle					
Nugget(mm)	3.813	4.951	5.691	6.235	6.652

(b) Simulation Result

Fig. 3 Nugget diameter and cross section of DP780 1.4t steel sheets

저항 점 용접 시뮬레이션을 진행할 때 전류의 형태는 60Hz 의 교류식 용접기로 설정을 하였다. 전류는 용접시간(welding time) 동안 교류식 용접의 전형적인 형태의 파형을 가지고, 전극 가압력은 초기 가압시간(squeeze time)에 가압되어 유지시간(holding time)까지 유지된다. 가압력은 용접이 시작되면 초기 가압시간부터 유지 시간까지 일정한 가압력이 유지되며, 이후에 전극이 떨어지며 가압이 해제된다.

시뮬레이션에 사용된 주요 용접 공정변수는 전극 가압력을 200kgf에서 400kgf까지 100kgf씩 증가 시켰으며, 용접 전류는 3kA에서 11kA까지 1kA씩 증가 시켰고, 용접 시간은 12cycle 에서 24cycle 까지 3cycle 씩 증가 시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 각 조합마다 총 135가지의 조건으로 시뮬레이

션을 진행하였으며, 총 405가지의 용접조건으로 시뮬레이션을 진행하였다. 또한 시뮬레이션의 시간적 절약을 위하여 상대적으로 높은 전류나 긴 용접시간이 설정되어 있어 과도한 발열로 인해 스파터가 발생하는 구간에 대하여 연속 두 번 스파터가 발생하면 멈추도록 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 저항 용접 시뮬레이션의 신뢰성 평가

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 특정 용접 조건에 대하여 용접 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 용접조건은 용접 시간 21cycle, 가압력 200kgf에 대하여 3~7kA 까지 5개의 전류에 대하여 비교하였다. DP780 1.0t와 1.4t

의 총 30개 조합에 대하여 비교하였으며 그 결과는 Fig. 2와 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 평균 너겟 오차율은 9.5 %, 최대 오차율은 19.19 %, 최소 오차율은 0.79 % 였다. 오차율이 큰 영역은 입열량이 적은 저 전류의 영역대인 3kA 에서 4kA 인 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 상에서는 미세하게 용접부가 형성되었지만, 실제 용접

에서는 너겟은 형성이 되나 용접 후 바로 계면 파단이 발생하여 너겟의 크기를 측정할 수 없는 경우도 발생하였다. 3kA에서 4kA의 저 전류 영역의 평균 오차율은 11.64% 이며 이를 제외한 적정 용접 조건에서의 오차율은 8.19% 이었다. 이를 통하여 적정용접조건 영역에 대한 시뮬레이션의 예측 성능은 우수함을 알 수 있었다.

Table 2 Weld Lobe curve for DP780 1.0t sheets (unit: kN)

200	24	5.81	9.46	11.56	13.38	14.86	16.06			
	21	5.05	9.38	11.51	13.34	14.66	15.78			
	18	4.30	9.35	11.36	12.81	14.22	15.33			
	15	3.96	9.32	10.97	12.46	13.92	14.99			
	12	3.97	8.81	10.62	12.11	13.42	14.33	15.22		
300	24	0	7.90	11.14	12.83	14.60	15.99	16.89	18.06	
	21	0	7.90	10.91	12.71	14.42	15.37	16.66	17.77	
	18	0	7.90	10.71	12.60	14.07	15.11	16.36	17.32	
	15	0	7.89	10.57	12.35	13.63	14.85	15.78	16.73	
	12	0	7.77	10.22	11.80	13.27	14.23	15.12	16.12	
400	24		0	9.84	12.53	14.10	15.61	16.68	17.83	19.25
	21		0	9.81	12.31	13.97	15.42	16.38	17.61	18.64
	18		0	9.76	12.02	13.86	14.90	16.15	17.29	18.05
	15		0	9.44	11.77	13.51	14.52	15.82	16.56	17.61
	12		0	8.88	11.28	12.78	14.04	14.98	16.08	16.81
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 3 Weld Lobe curve for DP780 1.4t sheets (unit: kN)

200	24	5.72	14.07	20.54	23.87	26.44				
	21	5.50	13.41	19.98	22.82	25.65	27.73			
	18	4.45	12.94	18.50	22.21	24.75	26.83			
	15	3.64	12.36	16.94	21.46	23.76	25.68			
	12	3.11	11.06	15.65	20.23	22.31	24.24			
300	24	0	8.36	18.55	22.87	26.13	28.32	30.34		
	21	0	7.49	17.13	22.50	25.36	27.49	29.16	31.18	
	18	0	6.63	16.32	21.74	24.52	26.61	28.53	30.43	
	15	0	5.62	15.42	20.57	23.36	25.68	27.38	28.30	
	12	0	4.63	13.49	19.07	22.13	24.09	26.15	27.66	
400	24	0	0.36	14.94	22.23	25.34	27.92	30.06	31.72	
	21	0	0.15	13.64	21.66	24.89	27.27	29.10	31.02	
	18	0	0	12.56	20.76	24.18	26.44	28.39	30.30	31.60
	15	0	0	11.66	20.27	22.87	25.32	27.30	28.81	30.64
	12	0	0	8.39	18.51	22.01	24.14	26.09	27.61	29.02
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Table 4 Weld Lobe curve for DP780 1.0t and 1.4t (unit: kN)

200	24	6.26	9.80	12.19	13.91	15.14				
	21	6.15	9.76	12.01	13.77	15.02	16.22			
	18	6.07	9.61	11.82	13.48	14.65	15.73			
	15	6.01	9.37	11.21	12.78	14.25	15.21			
	12	5.87	9.14	10.77	12.29	13.68	14.66			
300	24	0	8.26	11.49	13.53	15.12	16.35	17.69		
	21	0	8.06	11.24	13.37	14.89	16.12	17.18	18.31	
	18	0	7.53	11.10	13.05	14.63	15.54	16.60	17.75	
	15	0	7.53	10.80	12.60	13.98	15.07	16.19	17.13	
	12	0	6.53	10.59	12.01	13.51	14.66	15.30	16.36	
400	24	0	0.55	10.47	13.11	14.80	16.15	17.45	18.62	19.97
	21	0	0.46	10.36	12.66	14.55	15.97	17.17	18.03	19.53
	18	0	0.38	10.09	12.48	14.15	15.64	16.46	17.66	18.78
	15	0	0.16	9.82	12.15	13.85	14.97	16.11	17.14	18.14
	12	0	0	9.43	11.87	13.25	14.32	15.43	16.31	17.12
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

4. 저항 점 용접 시뮬레이션 결과

저항 점 용접에서 로브곡선이라는 것을 이용하여 용접성을 평가한다. 로브곡선은 크게 3개의 영역으로 구성되며, 용접부 너겟의 크기나 혹은 인장전단강도가 기준보다 낮은 영역과 적정 용접 영역 그리고 스패터가 발생하는 영역이다. 본 연구에서는 기준 전단인장 강도와 스패터 발생을 기준으로 3개의 판재 조합에 따라 로브곡선으로 저항 점 용접 시뮬레이션 결과를 구하였고 그 결과는 Table 2에서 4와 같다. 본 연구에서 사용된 기준 전단강도는 자동차사의 현장 라인에서 사용하는 기준을 이용하였다.

Table 2에서 4는 각각 DP780 1.0t와 1.4t 그리고 1.0t와 1.4t의 조합의 용접 로브곡선이다. 용접성 로브는 하한선 및 적정용접구간, 상한선을 각각 색깔로 구분하였다. 하한선부터 열은 회색으로 하여 상한선은 진한 회색으로 표시하였다. 하한선과 상한선 구간을 적정용접구간으로 중간 회색으로 나타내었다.

표에서 보는 바와 같이 용접부의 인장전단강도는 용접전류가 증가할수록, 용접시간이 늘어날수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 접촉 저

항에 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 200 kgf, 300 kgf, 400 kgf 로 늘어날수록 적정용접구간의 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.

5. 인장강도 예측 모델 개발

5.1 통계적 회귀모델

본 논문에서는 저항 점 용접부의 인장전단강도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였다. 일반적으로 실험은 그 조건에 따라 이산(discrete)의 조건에

대한 정보를 얻을 수 밖에 없다.⁶⁾ 그러나 예측 모델을 개발하면 실험을 통하지 않고도 중간값에 대한 정보를 얻을 수 있어 다양하고 유용하게 사용할 수 있다.

본 연구에서는 용접부의 품질을 대표할 수 있는 인장전단강도를 예측하기 위하여 회귀 분석을 사용하여 모델을 개발하였다. 사용된 모델의 형태는 2차 다항 회귀모델(second order polynomial regression model)로 그 식은 식 (1)과 같다.

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i}^5 \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

각 회귀모델의 입력변수는 주요공정변수인 용접전류, 용접시간, 가압력을 각각 x_1, x_2, x_3 로 정의하였고, 강판의 조합에 따라 상부 강판의 두께를 x_4 , 하판의 두께를 x_5 로 하였다. β 는 회귀모델의 계수이며 그 첨자는 각 입력변수의 첨자와 같고 그 값은 최소제곱법(least square method)으로 구하여 오차의 제곱을 최소화 할 수 있도록 한다. 모델에 대한 계수는 Table 5와 같다.

Table 5 Coefficient values for 2nd order polynomial regression model

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
2.594	-0.093	-0.343	-0.019	0
β_5	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}
0	0.027	0.007	5.034	0.041
β_{23}	β_{24}	β_{25}	β_{34}	β_{35}
0	0.473	0.053	-0.022	-0.001
β_{45}	β_{11}	β_{22}	β_{33}	β_{44}
-11.44	-0.430	-0.005	0	0
β_{55}				
4.766				

Table 6 Coefficient values for optimized 2nd order polynomial regression model

β_0	β_2	β_3	β_{12}
5.866	-0.553	-0.031	0.025
β_{13}	β_{14}	β_{24}	β_{34}
0.007	5.051	0.5	-0.023
β_{45}	β_{11}	β_{55}	
-11.78	-0.430	5.31	

2차 다항 회귀모델의 경우 그 입력인자의 값이 많으므로 과대 적합(overfitting)의 위험이 있다. 그러므로 이를 극복하기 위해 통계적으로 유의성이 떨어지는 변수를 제거하여 최적화된 회귀 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 모든 회귀 입력 변수를 대입하고 통계적으로 유의하지 않는 변수를 제거하는 후진 제거 방법을 이용하였고 이를 통하여 2차 회귀모델을 최적화하였다. 최적화된 식도 2차 회귀 모델과 같이 식 (1)과 같고, 이때 계수는 Table 6과 같다. 식 (1)에서 사용된 입력 인자의 수는 20개이지만 최적화된 2차 회귀 모델의 입력 인자의 수는 10개가 된다.

5.2 회귀모델의 예측 성능

각 회귀 모델의 예측 성능을 평가하기 위하여 예측된 값과 실제 값의 상관성을 그래프를 이용하여 표현하였다. Fig. 4와 5는 2차 다항 회귀 모델과, 최적화된 2차 다항 회귀 모델의 실제값과 예측값의 비교 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 2차 모델의 경우 둘 다 전체적으로 예측 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 최적화된 2차 모델의 경우 2차 회귀모델보다 10개의 변수가 적음에도 불구하고 2차 회귀 모델과 예측 성능이 비슷한 것을 알 수 있다.

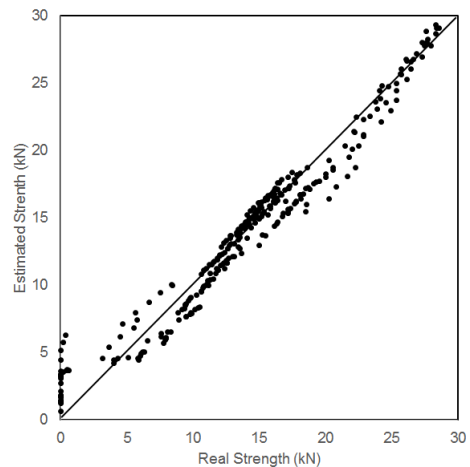


Fig. 4 Strength comparison between simulation values and estimated values for 2nd order polynomial model

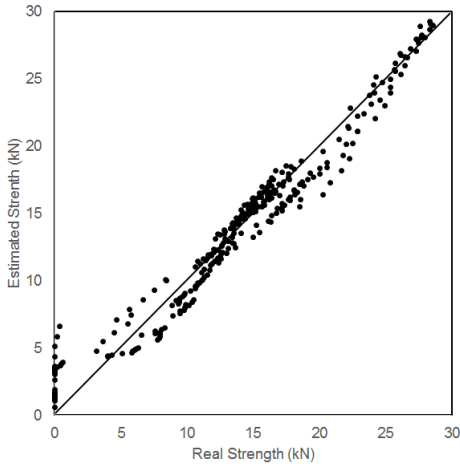


Fig. 5 Strength comparison between simulation values and estimated values for optimized 2nd order polynomial model

회귀모델의 예측 성능의 정량적 평가는 F-검증, 상관계수, 결정계수, 평균 오차율 등의 다양한 방법으로 수행한다. 본 연구에서는 각 모델에 대하여 결정계수(coefficient of determination: CoD) 및 평균 오차율(average error rate: AER)을 이용하여 각 모델에 대한 예측 성능을 평가하였다. 결정 계수와 평균 오차율의 식은 각각 식 (2)와 (3)과 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (2)$$

$$AER(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (3)$$

여기서 R^2 는 결정계수이고 AER 은 평균 오차율이다. i 는 데이터 번호, n 은 데이터의 총 개수이다. y 는 시물레이션 결과의 인장전단강도, \bar{y} 는 y 의 평균값, \hat{y} 는 예측모델에 의해 예측된 인장전단강도, $\bar{\hat{y}}$ 는 \hat{y} 의 평균값이다. 평균 오차율을 구할 때 시물레이션 상에서 0이 나오는 용접이 되지 않는 조건에 대한 데이터는 배제하였다.

본 연구에서 제안한 모델에 대한 예측 성능은

Table 7과 같다. 표에서 보는 바와 같이 평균 오차율에서 2차 모형이 아주 미세하게 좀 더 우수한 예측 성능을 갖고 있음을 알 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 최적화된 모델이 적은 변수로 거의 비슷한 예측 성능을 가짐을 알 수 있다. 2차 모형의 경우 많은 입력인자로 인하여 발생할 수 있는 과대 적합(overfitting)의 위험을 피하면서, 2차 모형과 거의 비슷한 예측성능을 갖는 것을 확인할 수 있으며, 두 모델 모두 우수한 예측성능을 갖고 있음을 알 수 있다.

Table 7 Coefficient of determination and average error rate for each regression model

Regression model	DoC	AER
2nd order	0.966	7.49%
Optimized 2nd order	0.966	7.57%

6. 결 론

본 연구는 동력기계 중 대표적인 자동차의 엔진 효율 극대화를 위한 차량 경량화에 적용되는 DP 780 강판의 저항 점 용접 특성을 시물레이션을 통하여 확인하였다. 이를 위하여 FEM 시물레이션을 통하여 1.0t와 1.4t의 동종 강판과 1.0-1.4t 이종 두께 강판에 대하여 로브곡선을 통하여 용접성을 판단하였다. 또한 시물레이션 결과를 근거로 하여 용접부의 인장전단강도를 예측할 수 있는 모델을 2차 다항 회귀 모델로 제안하였다. 많은 입력 인자로 인하여 과대 적합(overfitting)의 위험이 있어 이를 피할 수 있도록 후진 제거법을 도입한 최적화된 2차 다항 회귀모델을 제안하였다. 두 모델의 예측 성능을 결정 계수와 평균 오차율로 평가하였으며 두 모델 모두 우수한 예측성능을 갖고 있음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (C-D-2012-0485)

References

1. T. K. Han, K. Y. Lee, and J. S. Kim, 2009, "Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications", Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 27, No. 2, pp. 13-18.
2. C. M. Calva and T. W. Eagar, 1990, "Enhancement of the Weldability in Resistance Spot Welding", AWS Detroit Section, Sheet Metal Welding Conference IV.
3. T. M. Hong, Y. B. Choi, S. P. Kim, J. H. Lee, and H. S. Chang, 1993, "Estimation of Nugget Size Using Artificial Neural network & Comparison to Regression Method for Resistance Spot Welding", Proceedings of KSME Spring Conference, Vol. 1, No. 1, pp. 929-932.
4. N. Muhammad and Y. H. Manurung, 2012, "Design Parameters Selection and Optimization of Weld Zone Development in Resistance Spot Welding", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 6, No. 11, pp. 1220-1225.
5. J. H. Cho, 2013, "Prediction of Arc Welding Quality through Artificial Neural Network", Journal of Korean Welding and Joining Society, Vol. 31, No. 3, pp. 44-48.
6. Y. S. Kong and Y. W. Park, 2014, "Mechanical Property and Process Variables Optimization of Tube-to-Tube Friction Welding for Steel Pipe with 36 mm External Diameter", Journal of the Korea Society For Power System Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 50-56.