

시뮬레이션을 통한 1500MPa급 강재의 저항 용접 특성 (I)

- 저항 점 용접의 로브곡선 특성 분석 -

이 종 중* · 손 창 석* · 박 영 환* †

*국립부경대학교 기계공학과

Resistance Spot Welding Characteristic of 1500MPa Steel Sheet Using Simulation (I)

- Lobe Curve Characteristic Analysis of Resistance Spot Welding -

Jong-Jung Lee*, Chang-soek Son*, and Young Whan Park* †

*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

†Corresponding author : parkyw@pknu.ac.kr

(Received May 7, 2018 ; Revised May 29, 2018 ; Accepted June 8, 2018)

Abstract

Nowadays, environmental regulations have been strengthened globally and the greenhouse gas emissions should be reduced in the future. Therefore, many car manufacturers have to tried to improve fuel efficiency to solve this problem. One way to improve fuel efficiency is the weight loss of automobiles, and high strength steels such as AHSS(Advanced High Strength Steel) and UHSS(Ultra High Strength Steel) have been applied to the body of automobiles to achieve this. However, the combination of lecture type and thickness are very various and it will take a lot of time to conduct welding evaluation through experiments. In order to solve these problems, evaluation of resistance spot welding is being performed using simulation. In this study, the resistance spot welding with various combinations of homogeneous and heterogeneous alloys for 1500 MPa grade high strength steel sheet was evaluated by simulation. Weld lobe curve was determined according to combinations of steel type and thickness of 1500 MPa grade hot stamping and DP (dual phase) steels.

Key Words : Resistance spot welding, Simulation, Advanced high strength steel, Weld lobe curve, Nugget formation

1. 서 론

지구 온난화 문제로 인하여 전 세계적으로 환경규제가 강화되면서 온실가스 배출의 19%를 차지하고 있는 수송 분야에서는 이를 개선하기 위한 연비향상이 이슈화되고 있다. 자동차는 동력 기계중의 하나로서 선박 및 비행기와 더불어 중요 운송수단 중의 하나이다. 이에 자동차 회사에서는 온실가스 배출을 최대한 줄이기 위한 노력으로 고효율의 자동차 개발에 힘쓰고 있다. 이를 위한 방법의 하나로 자동차 차체의 경량화는 매우

중요한 방법이며 AHSS(Advanced High Strength Steel), UHSS(Ultra High Strength Steel)와 같은 고강도강을 자동차 차체에 적용하고자 노력하고 있다. 이러한 고강도강이 차체에 적용되기 위해서는 신강종의 저항 점 용접에 대한 용접성 평가 및 최적조건 설정이 필요하며 이와 관련된 일을 주로 실험으로 수행¹⁾되고 있다. 하지만 도금, 두께, 이종 강종 등에 따른 조합이 기하급수적으로 증가함에 따라 이 모든 경우의 수에 대해 실험을 통해 용접성을 평가하고 최적조건을 도출하는 데에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시뮬레이션을 이용하여 저항 점 용접 해석에 대한

평가가 수행되어지고 있다. 전극 가압력을 고려한 시물레이션²⁾ 그리고 전기 및 열적 모델을 커플링하여 해석한 시물레이션³⁾ 등의 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 또한 시물레이션을 이용한 아연 도금 강판의 용접 특성 및 전극의 마모 특성에 대한 연구⁴⁾와 스테인레스강의 저항 점 용접 특성에 대한 연구⁵⁾가 수행되었다. Park⁶⁾ 등은 780MPa급 강재의 용접 시물레이션을 통해 점용접 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 시물레이션을 통하여 1500MPa급 고강도 강판의 동종 및 이종에 대한 여러 조합의 저항 점 용접성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 금형에 의해 열처리된 1500MPa급 핫스탬핑강의 동종, 두께, 강종, 두께와 강종을 다르게 하여 용접성을 평가하였으며 또한 이에 따른 최적 용접 조건인 로그곡선을 도출하였고, 로그곡선을 이용하여 1500MPa급 강재의 다양한 조합에 따른 용접성 데이터베이스를 제안하였다. 이후 수집된 데이터베이스를 이용해 로그곡선 특성을 분석하여 이에 따른 저항 점 용접 너겟 지름의 예측 모델을 만들었다.

2. 저항 점 용접 시물레이션

2.1 시물레이션 방법

본 연구에서 시물레이션을 이용한 저항 점 용접 결과를 분석하였다. 이와 같은 해석은 열, 기계, 전기적인 해석이 중요하며, 이는 서로 연성되어 있다. 이들 중에서도 발열에 가장 중요한 요소인 접촉 저항의 계산이 매우 중요하다.

발열의 가장 큰 요소인 저항은 접촉저항에서 가장 높게 나타나며 시물레이션 상에 쓰이는 저항 모델은 아래의 식 (1)과 같다^{7,8)}.

$$\rho_{contact} = 3 \left(\frac{\sigma_{s_soft}}{\sigma_n} \right) \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2} + \rho_{contaminant} \right) \quad (1)$$

식 (1)에서의 $\rho_{contact}$ 는 접촉저항을 의미하며, ρ_1, ρ_2 는 맞닿아 있는 금속 재료의 고유저항을 나타낸다. $\rho_{contaminant}$ 는 접촉부 표면 오염에 의한 저항을 의미한다. 또한 σ_n 는 계면의 접촉수직응력을 나타내며 σ_{s_soft} 는 접촉된 두 금속 중에 경도가 약한 금속의 응력을 나타낸다.

시물레이션을 위해 모델링된 전극 및 판재는 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 4각 형태의 메쉬를 이용하였으며, 용접이 일어나는 부분에 대해서는 메쉬의 크기를 작게 모델링을 하였다. 전극은 축대칭의 모델을 이용하였고, 전극은 xy 축 대칭 형태를 이용하였다.

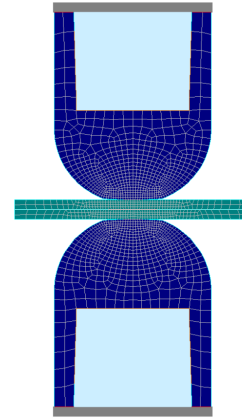


Fig. 1 Mesh of steel sheet and electrode for numerical simulation

2.2 시물레이션 조건

저항 점 용접 시물레이션을 위한 조건으로 사용된 용접기는 60Hz 교류용접기로 설정하였으며, 사용된 전극은 일반적인 저항 점 용접에 많이 쓰이는 돛형 전극으로 직경 16mm, 선단경 6mm인 CuCr소재의 전극을 이용하였다. 냉각수는 20℃로 4 l/min의 유량으로 전극에 흐르도록 경계조건을 설정하였다.

시물레이션에 사용된 재료는 1500MPa급 핫스탬핑강으로 본 연구에서는 HS1500으로 명명하였다. HS1500 강재는 1.0mm와 1.4mm 두께를 이용하였다. 이종 강재의 조합에 따른 시물레이션을 위해서 추가적으로 DP590과 DP780 1.0mm와 1.4mm를 이용하였다. 각각 두께 조합에 따른 동종 및 이종강종에 대한 조합으로 총 7가지 조합에 대하여 Table 1과 같은 용접조건으로 시물레이션 하였고 각 재료의 화학적 성분은 Table 2와 같다.

Table 1 Simulation condition

Variables	Minimum value	Maximum value	Increase value
Current (kA)	3	11	1
Force (kgf)	200	400	100
Time (Cycle)	12	24	3

Table 2 Chemical composition (wt%)

Steel	C	Mn	Si	Cr	Mo	B	Fe
HS1500	0.235	1.3	0.25	0.155	-	0.0037	Re
DP590	0.095	1.9	0.16	-	0.09	-	Re
DP780	0.07	2.4	1.05	0.1	0.03	-	Re

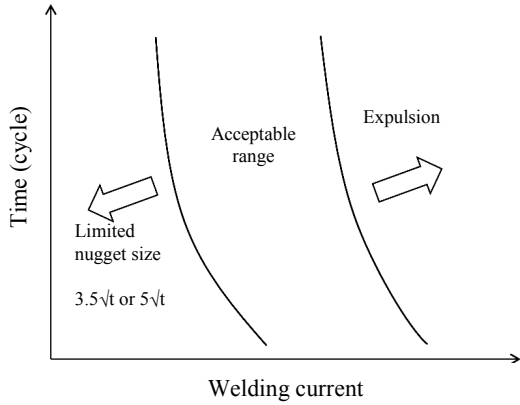


Fig. 2 Lobe curve

2.3 로브곡선

저항점 용접에서 용접성을 표현하는 방법으로 주로 사용되는 방법이 로브곡선을 활용한다⁶⁾. 본 연구에서도 용접 조건에 따른 로브곡선을 활용하여 용접성을 평가하고 적정 용접 조건의 영역을 표시하였다. 일반적인 로브곡선은 Fig. 2와 같이 표현되며 입열량이 적어 충분한 너겟을 생성되지 않은 왼쪽 경계선과 입열량이 많아 스파터가 발생하는 오른쪽 경계선으로 구분할 수 있으며 양쪽 경계선 사이를 적정용접조건으로 한다. 보통 왼쪽 경계선은 로브곡선 작성 기준인 ISO-14327에 따라 재료두께가 t일 때 $3.5\sqrt{t}$ 의 너겟 지름을 기준으로 한다. 기존 연구 결과⁹⁾에서는 $3.5\sqrt{t}$ 으로 하나 본 연구에서는 $4\sqrt{t}$ 의 너겟 지름을 최소 허용 너겟 지름을 기준으로 한다. 기존의 연구결과⁶⁻¹¹⁾에서 보는 바와 같이 시뮬레이션의 결과는 실제 용접 결과가 매우 유사한 것을 확인할 수 있었고, 본 연구에서는 실험적 방법이 아닌 시뮬레이션을 이용하였다. 로브곡선의 오른쪽 경계선인 스파터의 발생은 전극 가압력과 너겟부의 용융 너겟의 압력 및 금속학적 공정과 관련이 있으며 이에 대한 선행 연구^{10,11)}를 바탕으로 시뮬레이션 상에서 스파터의 발생여부를 판단하였다.

3. 시뮬레이션을 이용한 로브곡선

3.1 동종 HS1500소재의 용접 로브곡선

HS1500 1.0mm 두 장을 점용접 시뮬레이션 한 결과와 이에 따른 로브곡선을 가압력 별로 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 가로축은 용접 전류를 나타내고 있고, 세로축은 가압력과 용접시간을 표현하고 있다. 각각의 용접조건에 따른 결과는 용접부 너겟 지름 값을 표현하고 있다. 왼쪽은 너겟의 형성이 되지 않는 경우 혹은

Force (kgf)	Time (cycle)	Welding current (kA)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA		
200	24	2.76	3.73	4.08	4.40	5.90	6.32					
	21	2.75	3.73	3.95	4.40	5.88	6.28					
	18	2.75	3.71	3.90	4.40	5.83	6.12					
	15	2.69	3.68	3.84	4.35	5.64	5.99					
	12	2.55	3.49	3.80	4.27	5.40	5.80					
300	24	0.00	3.47	4.01	4.30	5.81	6.22	6.60	6.89			
	21	0.00	3.47	4.01	4.27	5.75	6.18	6.49	6.80			
	18	0.00	3.47	3.98	4.27	5.68	6.02	6.38	6.72			
	15	0.00	3.36	3.90	4.27	5.62	5.86	6.22	6.54			
	12	0.00	3.23	3.82	4.22	5.34	5.71	5.93	6.28			
400	24	0.00	2.75	3.83	4.25	5.75	6.11	6.39	6.78	7.54		
	21	0.00	2.74	3.79	4.25	5.69	6.06	6.32	6.73	7.53		
	18	0.00	2.53	3.73	4.20	5.59	5.94	6.22	6.67	7.39		
	15	0.00	2.19	3.68	4.14	5.48	5.78	6.14	6.44	7.11		
	12	0.00	2.04	3.62	4.07	5.33	5.64	5.85	6.24	6.82		

Fig. 3 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm sheets

최소 허용 너겟 지름 보다 낮은 구간이며, 상한의 경우는 스파터가 발생한 구간이다. 스파터의 발생이 2회 이상이 연속인 경우는 이후의 시뮬레이션은 진행하지 않았다.

Fig. 3의 로브곡선에서 가압력 200kgf, 300kgf, 400kgf로 구분하여 나타내었다. 같은 용접전류와 용접 시간에서 가압력이 증가할수록 너겟 지름이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 가압력이 증가하면서 접촉 저항의 감소를 유발하게 되고 그로인해 용접부에서 발생하는 발열량이 적어지게 되어 너겟 지름이 작게 형성되기 때문이다. 또한 가압력이 증가하면서 로브곡선의 하한선과 상한선이 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 접촉저항의 감소로 인해 고전류의 용접전류를 요구하게 되기 때문에 하한선 및 상한선이 오른쪽으로 이동하게 되기 때문이다. 또한 가압력이 증가하면서 용융금속의 팽창압력보다 가압력이 높아지고 스파터를 억제하여 상한선이 오른쪽으로 하한선 보다 상대적으로 많이 이동하여 전체적인 적정용접 구간이 넓어지게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 HS1500 1.4mm의 두겹 용접의 결과이다. 1.0mm 일 때와 마찬가지로 가압력이 증가할수록 로브곡선이 오른쪽으로 이동하면서 로브 영역이 확대되는 것을 확인할 수 있다.

HS1500 1.0mm의 조합과 비교하였을 때 로브영역 왼쪽 경계선 및 오른쪽 경계선이 부분적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두께가 두꺼워지면서 비저항이 커지고 그로인하여 입열량이 많아져 더 낮은 전

Force (kgf)	Time (cycle)	Welding current (kA)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA		
200	24	2.55	3.79	4.55	4.77	6.48	6.82					
	21	2.52	3.71	4.28	4.73	6.45	6.75					
	18	2.41	3.67	4.15	4.67	6.27	6.54					
	15	2.25	3.67	4.09	4.51	5.95	6.31					
	12	1.88	3.41	3.88	4.17	5.64	5.98					
300	24	0.00	3.58	4.14	4.64	6.48	6.73	7.15				
	21	0.00	3.54	4.10	4.61	6.25	6.62	7.02				
	18	0.00	3.46	4.10	4.58	6.14	6.51	6.75				
	15	0.00	3.33	3.92	4.25	5.87	6.20	6.57	6.86			
	12	0.00	3.00	3.72	4.08	5.56	5.95	6.23	6.57			
400	24	0.00	2.67	3.75	4.49	6.29	6.67	7.10				
	21	0.00	2.52	3.75	4.47	6.21	6.55	6.99				
	18	0.00	2.22	3.74	4.45	6.05	6.43	6.80	7.10			
	15	0.00	1.58	3.62	4.26	5.76	6.17	6.52	6.79			
	12	0.00	0.00	3.43	4.07	5.50	5.85	6.21	6.53	7.13		

Fig. 4 Welding lobe curve for HS1500 1.4mm sheets

류 영역에서 스패터가 발생하기 때문이다.

3.2 이중 두께의 HS1500강 용접 로브곡선

HS1500강에서 이중 두께에 대한 용접성을 평가하기 위하여 HS1500 1.0mm와 HS 1500 1.4mm에 대한 로브곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 이중 두께 조합에서도 가압력이 높아질수록 경계선이 오른쪽으로 이동하면서 넓어지는 것을 확인 할 수 있으며 같은 전류대에서 가압력이 높을수록 너겟 지름이 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

이 또한 가압력이 높아질수록 접촉저항이 감소하게 되고 스패터에 대한 민감도가 감소하여 적정 용접 영역이 오른쪽으로 이동되면서 영역이 커지게 됨을 알 수 있다. 또한 높은 가압력 일수록 접촉저항이 낮아져 입열량이 적어지고 그에 따라 너겟 지름이 작아지는 것을 알 수 있다.

3.3 HS1500강과 이중 강재의 로브곡선

이중 강종에 대한 용접성을 평가하기 위하여 HS1500 1.0mm와 DP590 1.0mm 조합과 HS1500 1.0mm와 DP780 1.0mm 조합을 시뮬레이션 하여 로브곡선을 작성하여 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 앞의 조합과 마찬가지로 두 조합 또한 가압력이 증가할수록 로브곡선이 오른쪽으로 이동하면서 영역이 넓어지는 것을

Force (kgf)	Time (cycle)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA	
200	24	2.88	3.79	4.35	4.72	6.18	6.57				
	21	2.81	3.71	4.26	4.71	6.12	6.51				
	18	2.75	3.70	4.22	4.68	6.05	6.43				
	15	2.66	3.70	4.15	4.62	5.88	6.16				
	12	2.73	3.47	3.87	4.36	5.65	5.94				
300	24	1.28	3.73	4.32	4.77	6.15	6.90	6.85	7.13		
	21	0.97	3.73	4.27	4.71	6.04	6.38	6.70	7.05		
	18	0.64	3.73	4.20	4.51	5.93	6.21	6.58	6.95		
	15	0.00	3.64	4.14	4.37	5.73	6.12	6.42	6.65		
	12	0.00	3.53	4.11	4.37	5.56	5.86	6.13	6.47		
400	24	0.00	2.94	3.99	4.47	6.08	6.40	6.75	7.09		
	21	0.00	2.93	3.98	4.42	6.02	6.28	6.62	7.01		
	18	0.00	2.83	3.92	4.40	5.77	6.16	6.55	6.87		
	15	0.00	2.55	3.76	4.39	5.69	6.04	6.33	6.63	7.25	
	12	0.00	2.15	3.66	4.19	5.38	5.75	6.13	6.38	7.02	

Fig. 5 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm and 1.4mm sheets

Force (kgf)	Time (cycle)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA	
200	24	2.50	3.60	3.83	4.37	5.77	6.13				
	21	2.49	3.56	3.82	4.37	5.72	6.09				
	18	2.34	3.47	3.74	4.30	5.64	5.96				
	15	2.09	3.43	3.70	4.25	5.49	5.80				
	12	1.87	3.34	3.66	4.02	5.27	5.56	5.80			
300	24	0.00	3.05	3.75	4.33	5.71	6.08	6.32	6.68		
	21	0.00	2.87	3.73	4.27	5.66	6.03	6.24	6.62		
	18	0.00	2.82	3.66	4.09	5.58	5.83	6.16	6.47		
	15	0.00	2.81	3.58	4.06	5.42	5.71	5.99	6.23		
	12	0.00	2.46	3.44	4.03	5.18	5.54	5.72	6.02	6.59	
400	24	0.00	0.00	3.25	4.04	5.61	5.93	6.24	6.64	7.49	
	21	0.00	0.00	3.04	4.02	5.45	5.88	6.18	6.58	7.30	
	18	0.00	0.00	2.80	3.86	5.36	5.77	6.10	6.38	7.08	
	15	0.00	0.00	2.75	3.74	5.29	5.60	5.94	6.19	6.78	
	12	0.00	0.00	2.26	3.48	5.11	5.39	5.70	6.04	6.56	

Fig. 6 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm and DP590 1.0mm sheets

Force (kgf)	Time (cycle)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA	
200	24	2.56	3.37	4.13	4.36	5.81	6.16				
	21	2.52	3.33	3.91	4.36	5.74	6.10				
	18	2.33	3.33	3.80	4.35	5.66	5.94				
	15	2.09	3.33	3.75	4.24	5.49	5.77				
	12	1.85	3.25	3.71	4.07	5.28	5.56	5.80			
300	24	0.00	3.21	3.73	4.23	5.71	6.12	6.36	6.69		
	21	0.00	3.04	3.73	4.19	5.65	6.05	6.27	6.65		
	18	0.00	2.91	3.70	4.13	5.59	5.82	6.17	6.50		
	15	0.00	2.91	3.62	4.07	5.36	5.70	5.97	6.24		
	12	0.00	2.91	3.49	4.03	5.21	5.56	5.72	6.03	6.62	
400	24	0.00	1.74	3.18	4.18	5.63	6.03	6.29	6.65	7.54	
	21	0.00	1.44	3.10	4.12	5.51	5.95	6.19	6.59	7.35	
	18	0.00	0.69	2.96	4.06	5.38	5.78	6.11	6.38	7.15	
	15	0.00	0.00	2.96	3.87	5.30	5.64	5.98	6.20	6.84	
	12	0.00	0.00	2.69	3.82	5.06	5.43	5.71	6.04	6.57	

Fig. 7 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm and DP780 1.0mm sheets

확인할 수 있었고 같은 전류대 일 때 가압력이 증가할수록 너겟 지름은 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

HS1500 1.0mm와 DP590 1.0mm 조합과 HS1500 1.0mm와 DP780 1.0mm 조합을 비교하였을 때 로브의 오른쪽 경계선은 일치하는 것을 확인할 수 있지만 로브의 왼쪽 경계선은 HS1500와 DP780 1.0mm 일 때 가압력 200kgf, 전류 5kA와 가압력 400kgf, 전류 6kA 에서 더 넓은 영역대를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 DP780의 높은 강도에 의한 강성 및 경도가 크기 때문에 초기 가압시 접촉 저항의 감소가 상대적으로 작고 이로 인하여 발열이 커지기 때문이다. 로브곡선의 오른쪽 경계선은 일치하지만 왼쪽 경계선은 더 낮은 전류대에서 경계선이 형성되는 것을 알 수 있다.

3.4 HS1500강과 이중 두께 강재의 로브곡선

이중 강종 및 이중 두께에 대한 용접성을 평가하기 위하여 HS1500 1.0mm와 DP590 1.4mm 조합과 HS1500 1.0mm와 DP780 1.4mm 조합을 시뮬레이션 하여 로브곡선을 작성하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 앞의 조합과 마찬가지로 두 조합 또한 가압력이 증가할수록 로브곡선이 오른쪽으로 이동하면서 영역이 넓어지는 것을 확인할 수 있었고 같은 전류대 일 때 가압력이 증가할수록 인장전단강도 값은 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

Force (kgf)	Time (cycle)										
		3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA	
200	24	2.53	3.72	4.28	4.72	6.06	6.46				
	21	2.51	3.70	4.21	4.63	5.96	6.31				
	18	2.37	3.67	3.99	4.48	5.82	6.18				
	15	2.02	3.52	3.82	4.27	5.65	5.97				
	12	1.41	3.48	3.82	4.17	5.39	5.63	5.94			
300	24	0.00	3.14	3.84	4.32	5.98	6.29	6.88	7.03		
	21	0.00	2.90	3.74	4.31	5.85	6.21	6.57	6.87		
	18	0.00	2.74	3.68	4.21	5.71	6.07	6.39	6.67		
	15	0.00	2.74	3.62	4.15	5.49	5.86	6.22	6.48		
	12	0.00	2.19	3.42	4.04	5.25	5.59	5.95	6.20	6.75	
400	24	0.00	0.00	3.25	4.19	5.80	6.25	6.62	6.91		
	21	0.00	0.00	3.15	4.18	5.74	6.13	6.45	6.76	7.56	
	18	0.00	0.00	2.81	4.10	5.56	5.88	6.27	6.64	7.37	
	15	0.00	0.00	2.35	3.88	5.37	5.73	6.09	6.39	7.07	
	12	0.00	0.00	0.86	3.48	5.18	5.51	5.77	6.13	6.74	

Fig. 8 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm and DP590 1.4mm sheets

200	24	2.58	3.71	4.25	4.72	6.09	6.44			
	21	2.54	3.69	4.19	4.61	6.01	6.27			
	18	2.36	3.65	4.02	4.48	5.35	6.17			
	15	2.02	3.45	3.81	4.23	5.64	5.93			
	12	1.58	3.39	3.79	4.15	5.39	5.60	5.93		
	9	0.00	3.40	4.03	4.33	6.02	6.35	6.71	7.05	
300	21	0.00	3.32	3.96	4.26	5.86	6.22	6.57	6.91	
	18	0.00	3.30	3.84	4.26	5.75	6.09	6.41	6.71	
	15	0.00	3.14	3.81	4.16	5.53	5.82	6.22	6.48	
	12	0.00	2.93	3.67	4.10	5.28	5.58	5.93	6.20	6.79
	9	0.00	1.99	3.67	4.17	5.83	6.25	6.63	6.96	
	6	0.00	1.62	3.55	4.11	5.74	6.19	6.48	6.80	7.59
400	18	0.00	0.70	3.31	4.07	5.58	6.02	6.31	6.68	7.30
	15	0.00	0.00	3.10	3.97	5.37	5.79	6.13	6.40	7.05
	12	0.00	0.00	2.55	3.66	5.17	5.50	5.81	6.16	6.71
	9	0.00	0.00	2.55	3.66	5.17	5.50	5.81	6.16	6.71
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Fig. 9 Welding lobe curve for HS1500 1.0mm and DP780 1.4mm sheets

HS1500 1.0mm와 DP590 1.4mm 조합과 HS1500 1.0mm와 DP780 1.4mm 조합을 비교하였을 때 로브의 오른쪽 경계선은 일치하는 것을 확인할 수 있지만 로브의 왼쪽 경계선은 HS1500와 DP780 1.4mm 일 때 가압력 300kgf, 전류 5kA에서 더 넓은 영역대를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 DP780의 높은 강도에 의한 강성 및 경도가 크기 때문에 초기 가압시 접촉 저항의 감소가 상대적으로 작고 이로인하여 발열이 커지기 때문이다. 로브의 오른쪽 경계선은 일치하지만 왼쪽 경계선은 더 낮은 전류대에서 경계선이 형성되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 1500MPa급 핫스탬핑강에 대해 동종 재료, 이종재료, 동종두께, 이종두께에 대하여 FEM 시뮬레이션을 이용하여 저항 점 용접의 다양한 강종 조합에 따른 로그곡선 및 저항 점 용접 데이터베이스를 얻을 수 있었고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 동종강종의 용접인 경우, 재료의 가압력의 증가에 따라 스패터 발생이 억제되어 로브곡선의 적정 범위가 증가하며, 두께 증가에 따라 비저항 증가로 인하여 낮은 전류에서 스패터가 발생한다.

2) 이종 재료의 용접인 경우, 비저항 및 재료의 강성 차이로 인해 동종재료의 조합인 HS1500 1.0mm와 HS1500 1.0mm의 조합일 때보다 이종재료의 조합인 HS1500 1.0mm와 DP590 1.0mm의 조합 및 HS1500 1.0mm와 DP780 1.0mm 조합에서 로브 영역의 왼쪽 경계선이 높은 전류대로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 현장에서 적용할 수 있는 적정 용접조건을 점 용접 시뮬레이션을 통해 로브곡선으로 도출할 수 있었고 1500MPa급 강재의 다양한 조합에 따른 로브곡선을 제안하였다.

후 기

이 논문은 2014학년도 부경대학교 연구년(Ⅱ) 교수 지원사업에 의하여 연구되었음 (C-D-2014-0716)

ORCID:Jong-Jung Lee: <http://orcid.org/0000-0003-2414-3906>

ORCID: Young Whan Park: <http://orcid.org/0000-0002-5280-2764>

References

- V. B. Hernandez, M. L. Kuntz, M. I. Khan, and Y. Zhou, Influence of Microstructure and Weld Size on the Mechanical Behaviour of Dissimilar AHSS Resistance Spot Welds, *Science and Technology of Welding and Joining*, 13-8 (2008), 769-776
<https://doi.org/10.1179/136217108X325470>
- B. H. Chang and Y. Zhou, Numerical Study on the Effect of Electrode Force in Small-scale Resistance Spot, *Welding Journal of Materials Processing Technology*, 139 (2003), 635-641
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00613-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00613-7)
- E. Feulvarch, V. Robin, and J. M. Bergheau, Resistance Spot Welding Simulation, A General Finite Element Formulation of Electro-thermal Contact Conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154 (2004), 436-441
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.096>
- N. Athi, J. D. Cullen, M. Al-Jader, S. R. Wylie, A. I. Al-Shamma'a, A. Shaw, and M. Hyde, Experimental and Theoretical Investigations to the Effects of Zinc Coatings and Splash on Electrode Cap Wear, *Measurement*, 42-6 (2009), 944-953
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.001>
- I. O. Santos, W. Zhang, V. M. Goncalves, N. Bay, and P. A. F. Martins, Weld Bonding of Stainless Steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (2004), 1431-1439
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.06.010>
- C. Son and Y. W. 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://doi.org/10.5781/KWJS.2012.30.6.554>
- S. Y. Lee, T. H. Ko, W. H. Kee, and Y. H. Jang, Weldability Evaluation of Resistance Spot Welding using CAE Methodology, *Journal of the 30th anniversary of the Korean Society of Automotive Engineers*, 3 (2008), 1351-1356
- W. Zhang, Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations, *SAE Technical Paper*, 112-5 (2003), 556-564
<https://doi.org/10.4271/2003-01-0978>
- T. H. Kim, D. O. Lee, and S. Rhee, Development of Resistance Spot Weldability Estimation Using Lobe Diagram for Steel Plate of Automobiles, *Journal of KWJS*, 23(4)

- (2005), 59-65
10. Q, Song, W. Zhang, and N. Bay, Contact Modelling in Resistance Welding. Part 1 : Algorithms and Numerical Verification, *Journal of Engineering Manufacture*, 220(5) (2006), 599-606
<https://doi.org/10.1243/09544054B05404>
 11. Q, Song, W. Zhang, and N. Bay, Contact Modelling in Resistance Welding. Part 2 : Experimental verification, *Journal of Engineering Manufacture*, 220(5) (2006), 607-613
<https://doi.org/10.1243/09544054B05504>