

## 시뮬레이션을 이용한 780MPa급 강재의 판재 조합에 따른 저항 점 용접의 로브곡선 특성 분석

손창석\* · 박영환\*\*,†

\*국립부경대학교 생산자동화공학과

\*\*국립부경대학교 기계공학과

### Lobe Curve Characteristic Analysis of Resistance Spot Welding for Sheet Combination of 780MPa Steel Sheet Using Simulation

Chang-Seok Son\* and Young Whan Park\*\*,†

\*Dept. of Manufacturing and Automation, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : parkyw@pknu.ac.kr

(Received November 2, 2012 ; Revised December 29, 2012 ; Accepted December 31, 2012)

#### Abstract

Nowadays, car manufacturers tried to improve automotive fuel efficiency, and applied many high strength steels such as AHSS or UHSS to car bodies. Therefore, the number of steel combinations for the resistance spot welding are dramatically increased and the need for weldability evaluation of these combinations are also required. In this study, we suggest the lobe curve using FEM simulations for DP780 steel with 1.0t, 1.4t. The lobe curves which could expressed weldability and optimal welding condition were obtained according to 6 steel combinations. There were two combinations for same steel sheet which were DP780 1.0t, DP780 1.4t. Dissimilar steel sheet combination with different thickness was 1.0t and 1.4t of DP780. Different steel combinations were DP780 1.0t and SPRC440 1.0t, and DP780 1.0t and DP590 1.0t. Finally dissimilar combinations was and DP780 1.0t and DP590 1.4t. The trend of low boundary and high boundary variation of lobe curve were analyzed with a viewpoint of the contact resistance and the heat input.

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

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경오염에 대한 관심이 커지면서 자동차 사에서는 자동차 연비향상을 위해 노력을 기울이고 있다. 이에 따라 자동차 차체의 경량화를 위해 AHSS(Advanced High Strength Steel), UHSS(Ultra High Strength Steel)와 같은 고강도강이 개발되고 있으며 자동차 차체에 적용되고 있다. 그러므로 신강종의 저항 점 용접에 대한 용접성 평가 및 최적 조건 설정이 필요하며 현재는 이와 같은 일을 실험으로

수행<sup>1)</sup>하고 있다. 그러나 두께, 도금 그리고 이종 강종에 따른 조합이 기하급수적으로 증가하여 이 모든 일을 실험을 통해 평가 및 최적 조건을 구한다는 것은 많은 시간과 비용이 투자된다.

이를 해결하기 위해 시뮬레이션을 이용한 저항 점 용접 해석을 통한 평가가 수행되고 있다. 전기 및 열적 모델을 커플링하여 해석한 시뮬레이션<sup>2)</sup> 및 전극 가압력을 고려한 시뮬레이션<sup>3)</sup> 등의 연구가 이루어졌고, 또한 시뮬레이션을 이용한 스테인레스 강의 저항 점용접 특성에 대한 연구<sup>4)</sup> 및 이연 도금 강판의 용접 특성 및 전극의 마모 특성에 대한 연구<sup>5)</sup>가 수행되었다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 자동차용 판재로 사용되는 780MPa급 DP강에 대하여 동종 및 이종의 여러 조합에 대한 점 용접성 평가를 수행하였다. 이를 위한 780MPa급 DP강의 동종, 두께, 강종, 두께와 강종을 다르게 하여 용접성을 평가하였으며 또한 이에 따른 최적 용접 조건인 로브 곡선을 도출하였고, 로브 곡선을 이용하여 780MPa급 강재의 다양한 조합에 따른 용접성 데이터베이스를 제안하였다.

## 2. 저항 점 용접 시뮬레이션

### 2.1 시뮬레이션 방법

저항 점 용접 시뮬레이션을 위해서 CAE (Computer Aided Engineering)을 수행하였고 열 해석 및 금속학적 해석이 요구된다. 열해석에 있어서는 발열에 가장 중요한 요소인 접촉 저항의 계산은 매우 중요하다.

발열의 가장 큰 요소인 저항은 접촉저항에서 가장 높게 나타나며 시뮬레이션 상에 쓰이는 저항 모델<sup>6,7)</sup>은 식 (1)과 같다.

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

여기서  $\rho_{contact}$ 는 접촉저항을 나타내며  $\rho_1, \rho_2$ 는 맞닿아 있는 금속 재료의 고유저항을 나타내고  $\rho_{contaminant}$ 는 접촉부 표면의 오염에 의한 저항을 나타낸다. 또한  $\sigma_n$ 는 계면의 접촉 수직응력을 나타내며  $\sigma_{s\_soft}$ 는 접촉된 두 금속 중에 경도가 약한 금속의 응력을 나타낸다.

시뮬레이션은 현장에서 쓰이는 재료와 전극을 원통형 대칭 (cylindrical symmetric) 모델의 형태로 구성하였으며, 또한 메쉬 모델은 4각 메쉬 형태를 이용하였다. 구성된 전극 및 재료의 메쉬형태는 Fig. 1과 같다.

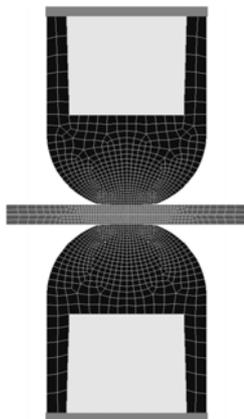


Fig. 1 Mesh of steel sheet and electrode for numerical simulation

### 2.2 시뮬레이션 조건

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

시뮬레이션에 사용된 재료는 780MPa급 강도를 가지는 DP780강재 1.0mm와 1.4mm 두께를 이용하였다. 이종 강재의 조합에 따른 시뮬레이션을 위해서 추가적으로 SPRC440 1.0mm와 DP590 1.0mm와 1.4mm의 강재를 이용하였다. 각각 두께 조합에 따른 동종 및 이종강종에 대한 조합으로 총 6가지 조합에 대하여 Table 1과 같은 용접조건으로 시뮬레이션 하였고 각 재료의 화학적 성분은 Table 2와 같다.

### 2.3 로브곡선

시뮬레이션 결과의 평가 방법으로는 용접성 평가 방법으로 가장 많이 사용되는 로브곡선을 작성하여 적정 용접조건을 도출하였다. Fig. 2와 같이 로브곡선이 작

Table 1 Simulation condition

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

Table 2 Chemical composition (wt%)

Steel	C	Mn	Si	Cr	Mo	other
DP780	0.07	2.4	1.05	0.1	0.03	0.21
SPRC440	0.09	1.4	0.14	0.1	0.05	0.21
DP590	0.095	1.9	0.16	-	0.09	-

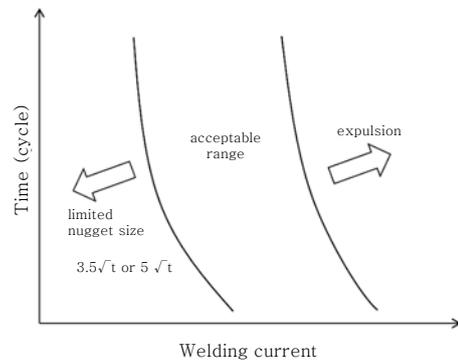


Fig. 2 Lobe curve

**Table 3** Acceptable tensile shear strength (kN)

Steel	1.0t	1.4t
DP780	6.76	11.4
SPRC440	3.92	
DP590	5.54	6.76

성되며 입열량이 적어 충분한 너깃을 생성되지 않은 왼쪽 경계선과 입열량이 많아 스패터가 발생하는 오른쪽 경계선으로 구분할 수 있으며 양쪽 경계선 사이를 적정 용접조건으로 한다. 보통 왼쪽 경계선은 로브곡선 작성 기준인 ISO-14327에 따라 재료두께가 t일 때  $3.5\sqrt{t}$ 의 너깃지름을 기준으로 한다. 그러나 기존의 연구 결과<sup>8)</sup>에 의하면 로브 곡선의 하한선을 너깃지름이 아닌 인장전단강도를 이용하여 사용하므로 본 연구에서는 인장전단강도를 이용하여 보다 정량적인 값으로 경계를 결정하였다. 허용인장강도는 Table 3과 같이 설정하였다.

로브 곡선의 오른쪽 경계선인 스패터의 발생은 전극 가압력과 너깃부의 용융너깃의 압력 및 금속학적 공정과 관련이 있으며 이에 대한 선행 연구<sup>9,10)</sup>를 바탕으로 시뮬레이션 상에서 스패터의 발생여부를 판단하였다.

### 3. 실험과 시뮬레이션 비교

저항 점 용접 시뮬레이션의 정확성을 판단하기 위하여 동종 강재인 DP780 1.0t의 14개 용접 조건, DP780 1.4t의 15개 조건 그리고 DP590 1.0t의 15개 조건, 즉 총 3개의 강종 44개의 실험 조건에 대하여 실험 결과 및 시뮬레이션을 비교하였다. 실험과 시뮬레이션의 비교는 너깃의 크기로 비교하였으며, 그 시뮬레이션의 정확도는 두 결과의 너깃 크기의 오차율을 이용하여 판단하였다.

그 결과 평균 오차율은 9.22%, 최대 오차율은 23.22% 최소 오차율은 0.39% 였다. 오차율이 큰 영역은 적은 입열에 의해 용접부가 잘 형성이 되지 않는 3과 4kA의 저전류 영역이었다. 시뮬레이션 상에서는 아주 미세하게 용접부가 형성되었지만, 실제 용접에서는 너깃은 형성이 되나 용접 후 바로 계면 파단이 발생하여 너깃의 크기를 측정할 수 없는 경우도 발생하였다.

3과 4kA의 저전류 영역을 제외한 적정 용접 조건에 대한 평균 오차율은 8.25% 이었으며, 저전류 영역에 대한 오차율은 13.08% 였다. 이를 통하여 적정영역에 대한 시뮬레이션의 예측 성능은 우수함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 DP780 1.0t에 대하여 다양한 용접 조건에 따른 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 실험 및 시뮬레이션의 너깃

200kgf					
Current	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA
21 Cycle	미접합				
Nugget(mm)	0	3.9	4.9	5.5	5.9
300kgf					
Current	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA
21 Cycle					
Nugget(mm)	3.7	4.4	5.1	6.1	6.6
400kgf					
Current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
21 Cycle					
Nugget(mm)	4.1	5.3	5.6	6.3	6.0

(a) Experimental Result

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

(b) Simulation results

**Fig. 3** Comparison between experimental result and simulation result for DP780 1.0t sheet

의 단면 형상을 비교하였으며, 그 아래에는 측정된 너깃의 크기를 표시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 시뮬레이션의 예측 성능이 우수함을 알 수 있었다. 실험의 경우 전류 3kA, 가압력 200kgf의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 실험은 되었으나 바로 계면 파단이 발생하여 너깃의 크기를 측정할 수 없어 이 경우를 제외하여 오차율을 계산하였다.

## 4. 시뮬레이션을 이용한 로브곡선

### 4.1 동종 재료의 로브곡선 결과

DP780 1.0t 두 장을 점용접 시뮬레이션 한 결과와 이에 따른 로브곡선을 가압력 별로 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 각각의 용접조건에 따른 인장전단강도의 값을 나타내었고, 왼쪽은 너깃의 형성이 되지 않는 경우

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	0.00	7.90	11.14	12.83	14.60	15.99	16.89	18.06	
	21	0.00	7.90	10.91	12.71	14.42	15.37	16.66	17.77	
	18	0.00	7.90	10.71	12.60	14.07	15.11	16.36	17.32	
	15	0.00	7.89	10.57	12.35	13.63	14.85	15.78	16.73	
	12	0.00	7.77	10.22	11.80	13.27	14.23	15.12	16.12	
400	24	0.00	0.00	9.84	12.53	14.10	15.61	16.68	17.83	19.25
	21	0.00	0.00	9.81	12.31	13.97	15.42	16.38	17.61	18.64
	18	0.00	0.00	9.76	12.02	13.86	14.90	16.15	17.29	18.05
	15	0.00	0.00	9.44	11.77	13.51	14.52	15.82	16.56	17.61
	12	0.00	0.00	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

Fig. 4 Welding lobe curve for DP780 1.0t sheets

혹은 인장전단강도가 기준강도보다 낮은 구간이며, 상한  
의 경우는 스패터가 발생한 구간이다. 기본적으로 스패터  
의 발생이 2회 이상인 경우는 시뮬레이션을 중단하였다.

Fig. 4의 로브곡선을 살펴보면 200kgf의 가압력 로  
브영역보다 400kgf의 가압력의 로브영역이 오른쪽으로  
이동하면서 로브영역이 넓어지는 것을 확인할 수 있었  
다. 또한 같은 전류대에서 가압력이 높을수록 전단인장  
강도 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

로브곡선에서 적정 용접의 영역이 오른쪽으로 이동하  
는 이유는 가압력이 높아짐으로써 통전부의 초기 접촉  
저항의 감소와 전류의 밀도 감소로 인한 원인으로 초기  
발열량이 감소하게 되기 때문이다. 4kA의 전류이지만  
높은 가압력 400kgf에서 너깃을 생성하지 않는 것을  
확인할 수 있었고 가압력이 높을수록 초기 접촉저항이  
감소하고 날림에 대한 민감도가 감소하여 적정 용접 영  
역이 커지게 됨을 알 수 확인할 수 있었다. 또한 가압  
력이 높을수록 접촉저항이 감소되면서 입열량이 적어져  
같은 전류대 높은 가압력일수록 인장전단강도가 감소함  
을 알 수 있었다.

Fig. 5는 DP780 1.4t의 두 장을 겹치기하여 저항  
점 용접의 시뮬레이션 결과를 그림으로 나타내었다.  
1.0t 일 때와 마찬가지로 가압력이 증가할수록 로브곡  
선이 오른쪽으로 이동하면서 로브 영역이 확대되는 것  
을 확인할 수 있었고 또한 같은 전류대에서 가압력이  
높을수록 전단인장강도가 낮은 것을 확인할 수 있었다.

DP780 1.0t와 DP780 1.4t 조합과 비교하였을 때  
로브영역 왼쪽 경계선은 오른쪽으로 오른쪽 경계선은  
약간 왼쪽으로 이동하여 적정영역이 부분적으로 감소하  
는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두께가 두꺼워지면 소  
재의 비저항이 커지므로 입열량이 많아서 더 낮은 전류  
영역에서 스패터가 발생하기 때문이다. 또한 모재의 두  
께가 두꺼워지게 되면서 입열이 적은 왼쪽 경계선의 경

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	0.00	8.36	18.55	22.87	26.13	28.32	30.34		
	21	0.00	7.49	17.13	22.50	25.36	27.49	29.16	31.18	
	18	0.00	6.63	16.32	21.74	24.52	26.61	28.53	30.43	
	15	0.00	5.62	15.42	20.57	23.36	25.68	27.38	28.30	
	12	0.00	4.63	13.49	19.07	22.13	24.09	26.15	27.66	
400	24	0.00	0.36	14.94	22.23	25.34	27.92	30.06	31.72	
	21	0.00	0.15	13.64	21.66	24.89	27.27	29.10	31.02	
	18	0.00	0.00	12.56	20.76	24.18	26.44	28.39	30.30	31.60
	15	0.00	0.00	11.66	20.27	22.87	25.32	27.30	28.81	30.64
	12	0.00	0.00	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

Fig. 5 Welding lobe curve for DP780 1.4t sheets

우 모재와 모재 사이에 집중되는 열이 적어지게 되면서  
더 큰 전류나 긴 용접시간을 요구하게 되고, 충분한 입  
열이 있는 오른쪽 경계선의 경우 두께방향으로 용융될  
수 있는 면적이 커지게 되면서 용융부가 늘어나게 되고  
그로인해 너깃부의 압력이 커지게 되면서 스패터가  
1.0t일 때보다 더 빨리 발생한다고 판단된다.

#### 4.2 동종 강종 이중 두께 용접의 로브곡선

DP780강에서 이중 두께에 대한 용접성을 평가하기  
위하여 DP780 1.0t와 DP780 1.4t에 대한 로브곡선  
을 Fig. 6에 나타내었다. 왼쪽 경계선의 기준은 모재의  
두께가 얇은 1.0t에 대한 인장전단강도 값을 이용하였  
다. 이중 두께 조합에서도 가압력이 높아질수록 경계선  
이 오른쪽으로 이동하면서 넓어지는 것을 확인할 수  
있으며 같은 전류대에서 가압력이 높을수록 인장전단강  
도는 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이 또한 가압력  
이 높아질수록 접촉저항이 감소하게 되고 스패터에 대  
한 민감도가 감소하여 적정 용접 영역이 오른쪽으로 이

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	0.00	8.26	11.49	13.53	15.12	16.35	17.69		
	21	0.00	8.06	11.24	13.37	14.89	16.12	17.18	18.31	
	18	0.00	7.53	11.10	13.05	14.63	15.54	16.60	17.75	
	15	0.00	7.53	10.80	12.60	13.98	15.07	16.19	17.13	
	12	0.00	6.53	10.59	12.01	13.51	14.66	15.30	16.36	
400	24	0.00	0.55	10.47	13.11	14.80	16.15	17.45	18.62	19.97
	21	0.00	0.46	10.36	12.66	14.55	15.97	17.17	18.03	19.53
	18	0.00	0.38	10.09	12.48	14.15	15.64	16.46	17.66	18.78
	15	0.00	0.16	9.82	12.15	13.85	14.97	16.11	17.14	18.14
	12	0.00	0.00	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

Fig. 6 Welding lobe curve for DP780 1.0t and 1.4t sheets

동되면서 영역이 커지게 됨을 알 수 있다. 또한 높은 가압력 일수록 접촉저항이 낮아져 입열량이 적어지고 그에 따라 인장전단강도 값이 낮아지는 것을 알 수 있다.

왼쪽 경계선의 경우 두께가 얇은 조합인 DP780 1.0t에 대해 300kgf, 4kA, 12cycle의 조건을 제외하고 전부 일치하는 것을 볼 수 있었으며, 오른쪽 경계선의 경우 두께가 두꺼운 조합인 DP780 1.4t × DP780 1.4t에 대해 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 일정이상 너깃지름이 생성되는 경우 플러그 파단이 형성되어 너깃지름 방향이 아닌 너깃의 HAZ부에서 파단이 발생하게 되는 데 이로 인해 두께가 얇은 1.0t의 모재에서 파단이 일어나 왼쪽 경계선이 일치한다고 판단할 수 있다.

4.3 이종 재료 동종 두께 용접의 로브곡선

이종 강종에 대한 용접성을 평가하기 위하여 SPRC440 1.0t와 DP780 1.0t 조합과 DP590 1.0t 와 DP780

200	24	1.81	5.37	6.49	7.51	8.50	9.24			
	21	1.81	5.25	6.46	7.46	8.43	8.96			
	18	1.81	5.15	6.41	7.38	8.18	8.81			
	15	1.81	5.07	6.25	7.23	7.97	8.63			
	12	1.54	4.93	6.07	6.91	7.74	8.30	8.80		
300	24	0.00	1.86	6.22	7.28	8.20	9.05	9.80	10.32	
	21	0.00	1.48	6.19	7.19	8.13	8.94	9.70	10.18	
	18	0.00	1.30	6.14	7.09	8.06	8.78	9.39	10.06	
	15	0.00	1.24	5.86	6.97	7.85	8.53	9.22	9.70	
	12	0.00	1.10	5.71	6.82	7.48	8.24	8.81	9.37	
400	24	0.00	0.00	5.13	6.95	8.03	8.85	9.66	10.35	11.17
	21	0.00	0.00	4.97	6.90	7.91	8.79	9.47	10.16	10.76
	18	0.00	0.00	4.30	6.75	7.81	8.54	9.30	10.00	10.59
	15	0.00	0.00	2.65	6.48	7.68	8.30	9.07	9.65	10.23
	12	0.00	0.00	1.96	6.37	7.28	8.06	8.70	9.31	9.80
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Fig. 7 Welding lobe curve for DP780 1.0t and SPRC440 1.0t sheets

200	24	4.32	7.25	8.83	10.28	11.48	12.48			
	21	4.36	7.21	8.78	10.23	11.41	12.20			
	18	4.34	7.17	8.73	10.03	11.05	11.87			
	15	4.48	7.05	8.56	9.69	10.78	11.65			
	12	2.57	6.83	8.24	9.35	10.46	11.14	11.83		
300	24	0.00	5.14	8.69	9.83	11.18	12.30	13.27	14.02	
	21	0.00	5.00	8.45	9.74	11.05	12.10	12.92	13.80	
	18	0.00	5.00	8.28	9.72	10.92	11.77	12.69	13.56	
	15	0.00	4.54	8.09	9.53	10.55	11.51	12.40	13.09	
	12	0.00	3.43	7.67	9.13	10.21	11.14	11.77	12.58	
400	24	0.00	0.00	7.55	9.63	10.84	11.98	13.07	13.83	15.16
	21	0.00	0.00	7.32	9.51	10.77	11.88	12.72	13.65	14.77
	18	0.00	0.00	6.93	9.26	10.61	11.57	12.53	13.46	14.19
	15	0.00	0.00	6.69	8.97	10.41	11.16	12.29	12.85	13.71
	12	0.00	0.00	6.66	8.67	9.87	10.86	11.66	12.49	13.07
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Fig. 8 Welding lobe curve for DP780 1.0t and DP590 1.0t sheets

200	24	4.30	9.78	12.04	13.88	15.10				
	21	4.21	9.65	11.86	13.70	14.99	16.19			
	18	3.98	9.49	11.67	13.47	14.69	15.68			
	15	3.87	9.20	11.21	12.81	14.21	15.19			
	12	2.22	8.64	10.74	12.26	13.72	14.67			
300	24	0.00	6.61	11.45	13.44	15.06	16.25	17.57	18.69	
	21	0.00	4.99	11.12	13.27	14.83	16.06	17.20	18.26	
	18	0.00	4.49	10.95	12.86	14.60	15.76	16.53	17.74	
	15	0.00	3.39	10.67	12.53	14.01	15.22	16.20	17.09	
	12	0.00	2.21	10.09	11.97	13.52	14.63	15.31	16.37	
400	24	0.00	0.00	10.19	12.98	14.48	16.10	17.38	18.56	19.89
	21	0.00	0.00	9.97	12.67	14.29	15.88	17.18	17.98	19.44
	18	0.00	0.00	9.80	12.49	14.07	15.66	16.61	17.60	18.66
	15	0.00	0.00	9.49	12.12	13.87	14.87	16.15	17.16	17.95
	12	0.00	0.00	8.03	11.82	13.17	14.49	15.54	16.30	17.25
Force (kgf)	Time (cycle)	3kA	4kA	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA	10kA	11kA

Fig. 9 Welding lobe curve for DP780 1.0t and DP590 1.4t sheets

1.0t 조합을 시뮬레이션 하여 로브곡선을 작성하여 Fig. 7과 Fig. 8에 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.

SPRC440 1.0t와 DP780 1.0t 조합과 DP780 1.0t와 DP780 1.0t 조합을 비교하였을 때 로브의 오른쪽 경계선은 일치하는 것을 확인할 수 있지만 로브의 왼쪽 경계선은 SPRC440 1.0t와 DP780 1.0t 일 때 가 더 높은 영역대에 있는 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. 그것은 DP590 1.0t와 DP780 1.0t 조합에서도 확인할 수 있었다. 로브의 오른쪽 경계선은 일치하지만 왼쪽 경계선은 더 낮은 전류대에서 경계선이 형성되는 것을 알 수 있다.

4.4 이종 강종 및 두께 용접의 로브곡선

이종 강종 및 이종 두께에 대한 용접성을 평가하기 위하여 DP590 1.4t와 DP780 1.0t에 대한 조합으로 시뮬레이션을 하였으며 그 결과를 그림에 나타내었다. 200kgf의 경우 왼쪽 경계선이 DP590 1.0t와 DP780 1.0t 조합과 일치하는 것을 확인할 수 있었고 오른쪽 경계선은 왼쪽으로 조금 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 조합의 두께가 두꺼워지면서 비저항이 커지게 되고 그로 인해 입열량이 많아져 스패터가 더 낮은 영역에서 발생하는 것으로 보인다. 300kgf에서는 로브영역이 완전히 겹치는 것을 확인할 수 있었으며 400kgf

에서는 두께가 두꺼운 조합인 DP590 1.4t와 DP780 1.0t가 더 높은 전류대에서 왼쪽 경계선이 그려지는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 780MPa급 DP강에 대해 동종 두께, 이종두께, 이종재료, 이종두께 및 이종재료에 대하여 FEM 시뮬레이션을 이용하여 저항 점 용접의 다양한 강종 조합에 따른 로브 곡선 및 저항 점 용접 데이터베이스를 얻을 수 있었고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 동종강종의 용접인 경우, 재료의 가압력의 증가에 따라 스파터 발생이 억제되어 로브곡선의 적정 범위가 증가하며, 두께 증가에 따라 비저항 증가 및 모재내의 열 집중으로 인하여 낮은 전류에서 스파터가 발생한다.

2) 이종두께의 용접인 경우, 하한의 경우 과단이 얇은 판재에서 발생하기 때문에 얇은 판재의 로브곡선과 일치하며, 상한의 경우 두꺼운 판재의 로브 곡선과 일치한다.

3) 이종 재료의 용접인 경우, 비저항 및 재료의 강성 차이로 인해 동종재료의 조합인 780 1.0t와 DP780 1.0t 조합일 때 보다 이종재료의 조합인 SPRC440 1.0t와 DP780 1.0t 조합 및 DP590 1.0t와 DP780 1.0t 조합에서 로브 영역의 왼쪽 경계선이 높은 전류대로 이동하는 것을 알 수 있었다.

4) 현장에서 적용할 수 있는 적정 용접조건을 점 용접 시뮬레이션을 통해 로브곡선으로 도출할 수 있었고 780MPa급 강재의 다양한 조합에 따른 로브곡선 데이터 베이스를 제안하였다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 제조기반산업원천기술개발사업의 자동차 핵심부품 생산기반공정 플랫폼기술과제 지원으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. 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
2. E. Feulvarch, V. Robin, and J. M. Bergheau : Resistance Spot Welding Simulation : A General Finite Element Formulation of Electrothermal Contact Conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, **153-154** (2004) 436-441
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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
7. W. Zhang : Design and Implementation of Software for Resistance Welding Process Simulations, *SAE Technical Paper*, **112-5** (2003) 556-564
8. 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 KWS*, **23-4** (2005) 59-65
9. 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
10. 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