연구논문

로브곡선을 이용한 자동차용 신강재의 저항 점 용접성 평가 기술 개발

김 태 형* · 이 동 옥* · 이 세 헌**

*한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
**한양대학교 공과대학 기계공학부

Development of Resistance Spot Weldability Estimation Using Lobe Diagram for Steel Plate of Automobiles

Taehyung Kim*, Dongock Lee* and Sehun Rhee**

*Department of Precision Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract

The resistance spot welding is one of the most commonly used welding process for joining the sheet metal in automotive manufacturing process due to higher deposition rates and higher economy achieved. Control variables in the resistance spot welding for achieving high quality are welding current, welding force and welding time. Generally at the manufacturing scene, welding current Vs welding time lobe diagram is used to estimate weldability because controlling welding force is not practical due to economical reasons. However new automotive steel plates have been developed to make lightweight automobiles and to improve resistance against rusting. Also the weldability of these steel plates are worst than the existing steel plates because of changing bare metal and surface plating effect. In consequence of above mentioned reasons, it is necessary to use welding force to present the lobe diagram. In this study, we obtained the welding force Vs welding current lobe diagram for commonly used GA steel plate and found that the second order regression model of tensile shear strength was useful in reducing the number of experiments, and the indentation, and thickness change during welding were used as a response to estimate quantitatively expulsion.

* Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received May 25, 2005)

Key Words : Resistance spot welding, Lobe diagram, Spatter, LVDT, Statistical method, Weldability, GA(galvannealed) steel

1. 서 론

전 세계의 자동차 업계와 철강 업계는 날로 심각해지는 자동차에 대한 환경오염 규제와 차체 경량화를 위해 새로운 자동차 차체용 강재의 개발에 많은 연구와 노력을 기울이고 있다. 이러한 신강종의 대표적인 예로는 고장력강에 해당하는 TRIP(transformation of induced plasticity)강, DP(dual phase)강과 보다 엄격한 차체 방청 규제를 만족시키고자 GA(galvannealed) 표면처리강판이나, 윤활(lubricant resin) 처리강판과 같이 고기능 후처리 강판들을 들 수 있다. 그러나 이러한 신강재들을 실제 차체생산 현장에 적용하기 위해서는 신강재의 성형성, 도장성, 용접성 등이 차체 생산 조건에 만족되어야만 한다. 특히 용접성의 경우는 차체용 강재에서 빼놓을 수 없는 조건이며, 적정 용접조건에 대한 정확한 데이터는 신강재를 생산라인에 적용하기 위해서 무엇보다도 우선시되는 요소라고 할 수 있다. 따라서 저항 점 용접성 평가와 관련된 연구도 신강재의 개발에 따라 활발히 진행되었다. 도금 강에서 용접시간과 용접전류에 대한 너깃의 크기나, 도금된 아연의 영향에 대해 연구되었고[1,2], 일반적으로 많이 사용되는

자동차용 도금 강판인 다양한 전기도금강판이나 유기복합피복강판의 저항 점 용접성에 관한 연구가 수행되었다[3,4]. 알루미늄이나 알루미늄 합금과 다른 금속과의 이종재료 저항 점 용접성에 관한 연구도 수행되었다[5-7]. 또한 자동차 충돌규제의 강화로 사용되는 고장력 강판에 대한 연구도 진행되어 왔다[8]. 기존의 연구들은 새로운 강종의 저항 점 용접성 평가 및 해결 방안을 다양한 방법으로 제시하였다. 본 연구에서는 새로운 강종을 자동차 차체 조립 공정에서 사용되고 있는 기존의 시스템에 적용하기 위해 저항 점 용접성의 평가를 주로 로브곡선을 통한 적정 용접 조건 범위의 제시에 초점을 두었다[9,10].

본 연구에서는 자동차용 신강종의 적정 용접 조건을 제시하기 위해, 가압력-전류 로브곡선을 이용하였으며, 너깃 크기와 날림현상으로 결정되었던 로브곡선의 영역을 인장전단강도값과 용접 중 두께변화값을 통해 결정함으로써 보다 객관적이고 정확하게 정량화하고자 하였다. 이를 바탕으로 개발 강종에 대한 보다 빠른 용접성 분석을 위해, 보다 적은 횟수의 실험으로도 신뢰성 있는 적정 용접 조건을 구하기 위한 가상로브곡선을 구할 수 있는 실험계획모델을 통계적인 방법을 통해 제시하고자 한다.

2. 로브곡선 및 실험조건

2.1 로브곡선

로브곡선이란 저항 점 용접의 3요소라 할 수 있는 가압력, 통전시간, 전류 중에서 일반적으로 한가지 인자를 고정하고 다른 두가지 인자를 변화시켜 적정 용접 범위를 나타내 저항 점 용접성에 대한 평가를 수행하는 그래프이다. 일반적으로 시간을 고정한 전류-시간 로브곡선을 주로 로브곡선이라 지칭한다. 그러나, 본 연구에서는 용접 시간을 고정하고 가로축을 전류 세로축을 가압력으로 설정한 전류-가압력 로브곡선을 사용하였다. Fig. 1은 전류-가압력 로브곡선의 일반적인 예이다. 회색 음영으로 표시된 부분은 적정 용접 범위를 나타내고, 음영 왼쪽 영역은 적은 전류와 높은 가압력으로 인한 적은 입열로 인해 충분한 너깃이 생성되지 못한 부분이며, 오른쪽 영역은 높은 전류와 적은 가압력으로 인한 과도한 입열로 다량의 스패터가 발생하는 부분이다. 일반적으로 왼쪽 영역의 경계는 용접부 강판의 두께 t라 할 때 너깃 사이즈가 $4\sqrt{t}$ 또는 $5\sqrt{t}$를 기준으로 정한다. 오른쪽 경계는 날림 발생 여부에 따라 기준을 결정한다.

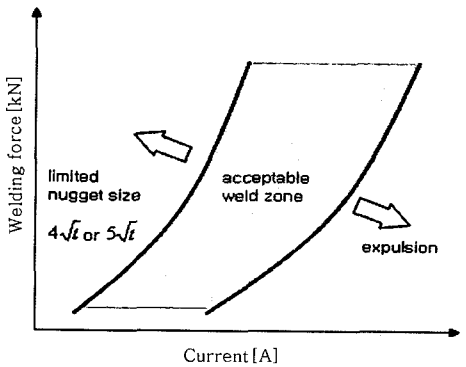


Fig. 1 Current-Force lobe diagram

2.2 실험조건

현재 차체 생산에 적용되고 있는 두께 0.8mm인 GA강의 전류-가압력 로브곡선 특성을 파악하여 보다 적은 횟수의 실험을 통해 신뢰성 있는 가상로브곡선을 구할 수 있는 실험계획모델을 구하기 위해 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 강종의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 2, 3과 같다. 실험에 사용한 용접기는 정치식 60Hz 단상 교류 용접기이며, 전극은 트렁케이드 콘(truncated cone) 타입(외경 16mm, 선단경 6mm)을 사용하였다. 용접시험편의 치수 및 형상은 KS규격[11]에 따른 표준 인장전단강도 시험편을 사용하였다(Fig. 2와 Table 1 참조). 용접조건은 Table 4와 같으며 5회 반복실험을 수행하였다. 전류-가압력 로브곡선의 하한 경계 영역 설정을 위한 실험의 결과값은 너깃 크기가 아닌 인장전단강도값을 이용하였다. 이는 정확한 너깃 크기의 측정이 측정오차 및 박리의 어려움 등으로 인해 힘들기 때문에 인장전단강도 실험을 통해 그 결과를 이용하였다[8]. 전류-가압력 로브곡선의 하한선은 실제 차량 제조시에 요구되는 국내 자동차사 0.8 t 강판의 보완타점 요구 인장전단강도값인 3470N으로

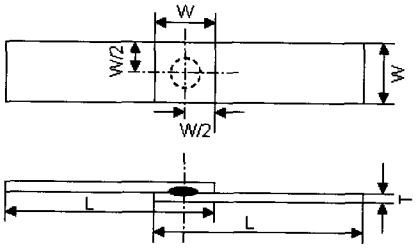


Fig. 2 Shape of specimen

Table 1 Size of specimen

T [mm]	W [mm]	L [mm]
less than 0.8	20	75
0.8 ~ 1.3	30	100
0.3 ~ 2.5	40	125

Table 2 Chemical compositions of GA [wt%]

Element	Content	Element	Content
C	0.00170	Nb	0.00330
Si	0.00536	Co	0.00444
Mn	0.08748	Sn	0.00144
P	0.01380	B	0.00016
S	0.00813	N	0.00178
Cu	0.01354	O	0.00150
Ni	0.00582	Ti	0.03040
Cr	0.01235	V	0.00685
Mo	0.00478	Al	0.03559

Table 3 Mechanical properties of GA

Yield strength [N/m^2]	Tensile strength [N/m^2]	Elongation [%]
165	298	45

Table 4 Welding condition

Factors	Range	Level
welding current[kA]	5.0~9.0	9
welding time[cycle]	12	1
welding force[kN]	1.60~2.92	5

선정하였으며, 전류-가압력 로브곡선의 상한선은 날림이 발생하는 경계로 선정하였다.

전류-가압력 로브곡선의 상한 경계는 날림 발생여부와 LVDT를 이용하여 용접전후의 용접부 두께변화를 관찰하였다. LVDT는 Fig. 3에서 용접 전극 양단에 지그를 부착하여 고정시켜 용접 전극이 용접부와 맞닿아 있는 값과 용접전류가 통전된 뒤 유지시간 동안 계측된 값 차이를 이용하였다. 본 연구에 사용된 데이터 계측 시스템은 Fig. 3과 같고, 사용된 LVDT는 전압 출력 센서로 1[V]의 출력이 0.4243[mm]의 길이 변화값을 가진다.

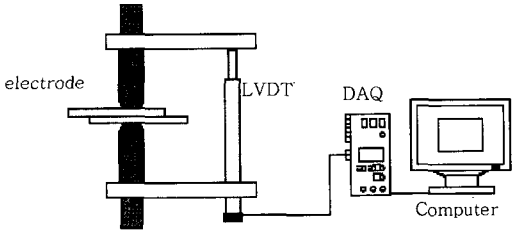


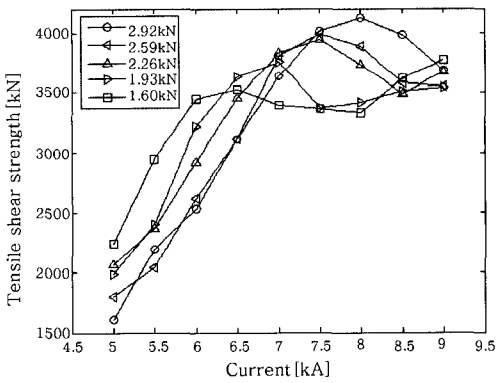
Fig. 3 Measurement system of LVDT

3. 가상로브곡선

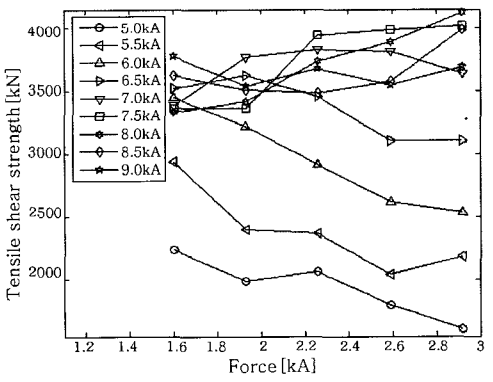
3.1 가상로브곡선의 하한

Fig. 4는 인장전단강도값에 미치는 가압력과 전류의 교호작용을 나타낸 것이다. 각 그래프가 평행하다면 가압력과 용접 전류 두 인자가 서로 교호작용을 하고 있지 않음을 표시한다.

Fig. 4(a)에서는 날림현상이 발생하지 않는 전류조건까지는 전류가 증가함에 따라 인장전단강도값이 비례적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 전류가 과대하여 날림이 발생하면 인장전단강도값은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 저전류 영역에서는 가압력이 낮을수록 인장전단강도값이 높은 것을 확인할 수 있는데 이것은 가압력이 낮으면 용접부의 접촉 면적이 적어지고 따라서 높은 접촉저항을 뜻하므로 접촉저항에 의해 발생하는 열량이 많아 충분한 너깃 성장을 돕기 때문이다. Fig. 4(b)는 각 전류 조건에서 가압력에 따른 인장전단강도의 변화를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 6.5kA까지는 가압력과 전류가 인장전단강도값에 서로 상호작용하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 날림현상이 발생하기 시작하는 7.0kA부터는 이러한 교호작용이 복잡하게 일어남을 확인할 수 있었다. 그러므로



(a) Interaction plot (x axis: current)



(b) Interaction plot (x axis: welding force)

Fig. 4 Interaction plot for tensile shear strength

적정 용접 조건을 선정하기 위한 가상로브곡선의 하한선을 결정하기 위해 사용되는 인장전단강도값의 추정을 위해서는 날림현상이 발생하지 않는 영역이 중요한 영역임을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 총 5회의 실험결과 중 최고값과 최저값을 제외한 평균값에 의해 구한 전류-가압력 로브곡선이다. 총 5회의 반복 실험에서 날림의 횟수를 Fig. 5에 표시하였다. 날림의 발생은 전반적인 인장전단강도값의 경향성을 파괴하는 요소로서 작용한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 가압력이 1.60kN인 조건에서는 허용 인장전단강도값보다 높은 인장전단강도값을 보이면서 날림이 발생하지 않는 적정 용접 조건이 없는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 보다 적은 횟수의 실험을 통해 실제 전류-가압력 로브곡선을 대표할 수 있는 가상로브곡선의 하한선을 회귀모형을 통해 구할 수 있으리라 판단되어졌으며, 이를 확인하기 위하여 중심합성계획법[13]에 따라 총 13회의 모의실험 데이터를 통해 통계적 분석을 이용하여 인장전단강도값에 대한 2차회귀모형식을 유도하였다. 유도된 추정 인장전단강도 회귀모형의 타당성을 검토하기 위해 전체 실험결과들 중에서 날림현상으로 인해 인장전단강도값의 감소가 발생하지 않은 실험 데이터 값들과 회귀모형식에 의한 추정값과의 오차에 대한 표준편차 값으로 비교 분석하였다.

Fig. 6은 각 실험영역을 나타낸 것이며, Table 5는 각 실험영역에서 구한 오차의 표준편차 값(S)을 나타낸 것이다. Table 5에서 실험번호 5번이 오차율이 가장 적었으며, 이는 실제 전류-가압력 로브곡선의 하한선을 결정하기 위한 인장전단강도값의 분포를 잘 표현하고 있음을 나타내는 것이다. 즉, 가장 낮은 가압력과 전류 조건에서 날림현상이 발생하는 지점을 끝점으로 하여 가장 넓은 실험영역을 선정하는 것이 2차회귀식의 정확도를 높일 수 있음을 확인할 수 있었다. Table 5의 실험번호 5번에서와 같은 실험계획모델에 의해 구하여진 2차회귀모형식은 식(1)과 같다. F는 인장전단강도이며, P는 가압력, I는 용접 전류이다.

$$F = -236 - 2261P + 1222I - 139P^2 - 110I^2 + 415II \quad (1)$$

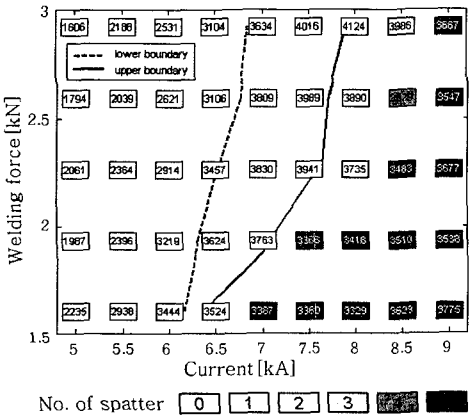


Fig. 5 Lobe diagram for GA using tensile shear strength and spatter

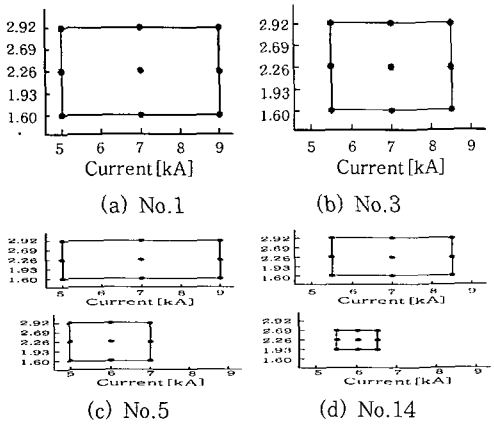


Fig. 6 Experimental design for GA

Table 5 Experiment design and standard deviation of error

No.	Factor		standard deviation (S)
	welding force [kN]	welding current [kA]	
1	1.60~2.92	5.0~9.0	153.78
2	1.60~2.92	5.0~8.0	140.51
3	1.60~2.92	5.5~8.5	156.21
4	1.60~2.92	6.0~9.0	124.64
5	1.60~2.92	5.0~7.0	115.37
6	1.60~2.92	5.5~7.5	148.28
7	1.60~2.92	6.0~8.0	228.77
8	1.60~2.92	6.5~8.5	152.09
9	1.60~2.92	7.0~9.0	696.65
10	1.60~2.26	5.0~6.0	675.17
11	1.60~2.26	5.5~6.5	2078.61
12	1.60~2.26	6.0~7.0	957.20
13	1.93~2.59	5.0~6.0	364.64
14	1.93~2.59	5.5~6.5	556.87
15	1.93~2.59	6.0~7.0	390.06
16	1.93~2.59	6.5~7.5	926.65
17	1.93~2.59	7.0~8.0	814.32
18	2.26~2.92	5.0~6.0	395.67
19	2.26~2.92	5.5~6.5	479.46
20	2.26~2.92	6.0~7.0	183.36
21	2.26~2.92	6.5~7.5	784.19
22	2.26~2.92	7.0~8.0	245.85
23	2.26~2.92	7.5~8.5	793.02

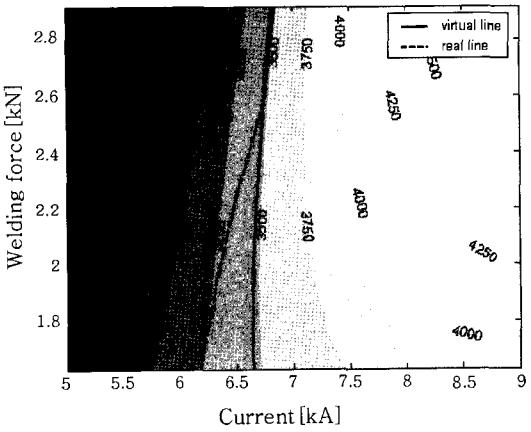
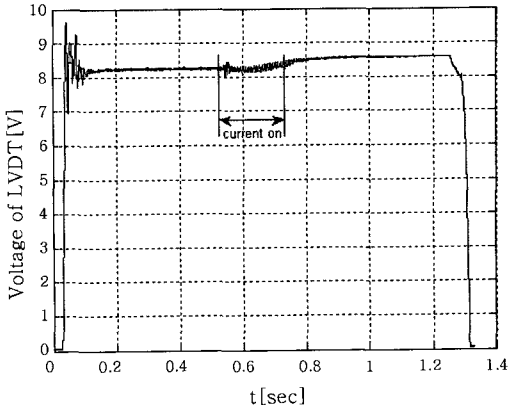


Fig. 7 Plot of regression model and real tensile shear strength of GA

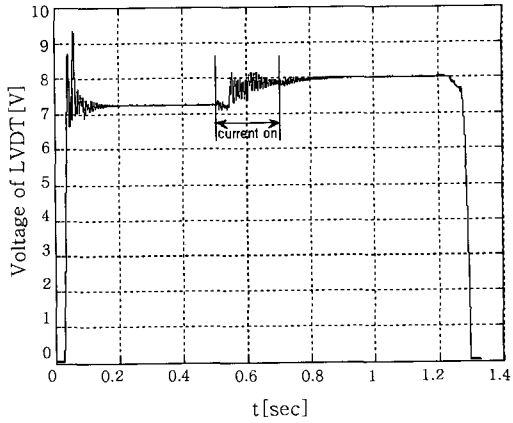
Fig. 7은 실제 인장전단강도값을 평균한 분포와 2차 회귀모형식에 의한 그래프를 겹쳐서 나타낸 것으로 2차 회귀모형식에 의해 추정된 인장전단강도값이 잘 근사함을 나타낸다. 따라서 보다 적은 횟수의 실험으로도 신뢰성 있는 가상로브곡선의 하한을 결정할 수 있음을 확인하였다.

3.2 가상로브곡선의 상한

로브곡선의 상한선을 결정하기 위해 일반적으로 사용되어지는 값은 날림현상의 발생 경계이다. 이것은 앞서 이야기한 바와 같이 날림현상이 인장전단강도값의 감소를 유발하는 요소이기 때문이다. 또한 과도한 날림현상은 표면자국, 즉 오목자국깊이를 깊게 하여 차체의 표면형상에 나쁜 영향을 미치며 이것은 차체 도장성에 악영향을 끼치게 된다. 따라서 AWS(American welding society)의 규격[12]에서는 모재 두께의 25%를 넘지 않도록 권고하고 있다. 또한 발생한 스패터(spatter)로 인하여 작업환경의 오염 및 차체 표면 오염을 야기하는 요소로도 작용한다. 이러한 날림현상은 매우 정성적인 평가요소로서 표준적인 기준을 선정하기가 어렵다. 따라서 보다 정량적인 평가요소로서 용접 중 두께 변화를 이용하기로 하였다. 이를 위해 용접기에 LVDT(linear variable displacement transducer)를 설치하여 용접 중 발생하는 용접부의 두께 변화를 측정하고자 하였다. Fig. 8은 실제 측정된 LVDT의 신호를 나타낸 그래프이다. Fig. 8(a)는 적정 용접 조건인 2.59kN, 7.5kA, 12cycle일 때의 파형이며, Fig. 8(b)는 날림 현상이 두 번 발생한 1.60kN, 8.5kA, 12cycle일 때의 파형이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 용접 중 생기는 전류에 의한 리플(ripple) 현상이 잘 계측되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9는 용접 전후 LVDT에 의해 계측된 전



(a) Plot of LVDT (2.59kN, 7.5kA, 12cycle)



(b) Plot of LVDT (1.60kN, 8.5kA, 12cycle)

Fig. 8 Plot of LVDT

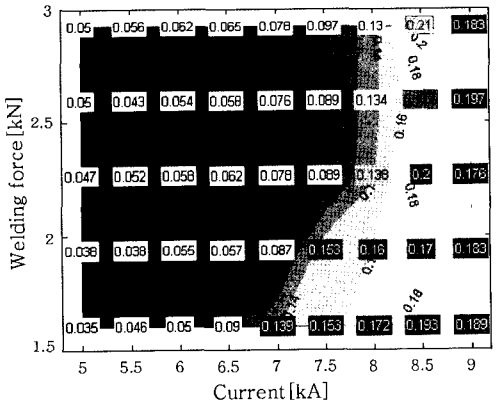


Fig. 9 Result of thickness change during welding

압 신호차이를 길이로 환산하여 평균한 값을 나타낸 것이다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 LVDT에 의해 측정된 용접 중 용접부의 두께 변화 그래프에서 두께변화가 0.120mm인 분포가 전류-가압력 로브곡선의 상한과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 날림현상의 유무로 평가되던 로브곡선의 상한선을 LVDT 센서를 이용하여 보다 정확하고 실시간적으로 결정할 수 있

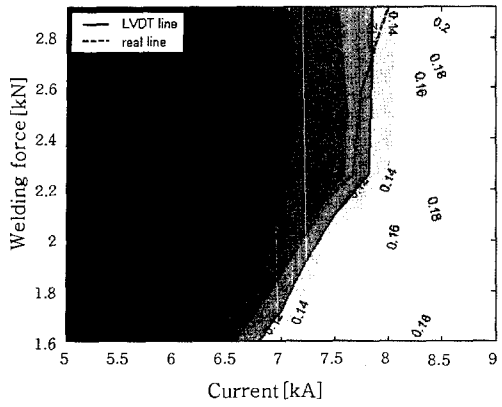


Fig. 10 Plot of thickness change and lobe diagram

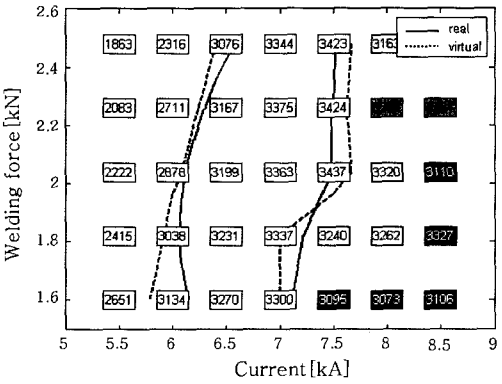


Fig. 11 Real lobe curve vs. virtual lobe curve

음을 확인하였다.

Fig. 5에서 나타낸 실제 현장에서 사용하고 있는 전류-가압력 로브곡선과 Fig. 7과 Fig. 10에서 보여 준 가상로브곡선을 Fig. 11과 같이 한 그래프에 표시하였다. 적은 실험 횟수를 가진 실험 계획법과 정량적인 LVDT 센서의 신호로 얻어진 결과를 이용해 실제 전류-가압력 로브곡선(실선)과 거의 일치하는 가상로브곡선(점선)을 작성할 수 있었다.

4. 결 론

차체 경량화와 보다 엄격해진 방청규제를 만족시키기 위해 개발되고 있는 자동차용 신강종들을 생산현장에 사용하기 위해서는 적정 용접 조건의 설정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 저항 점 용접 공정의 적정용접 범위를 나타내는 로브 곡선 작성에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 로브 곡선 작성에 필요한 적정 용접 조건 영역을 구하기 위해 중심합성계획법을 이용하여 가장 적절한 실험영역을 통계적 방법을 통해 구하였다.

2) 가상 로브 곡선의 하한은 인장전단강도를 이용하여 통계적인 방법을 이용해 구하였다.

3) 날림현상을 통해 정성적으로 평가되던 가상 로브 곡선의 상한을 LVDT 센서를 이용하여 보다 정량적인 수치를 사용하여 결정하였다.

후 기

본 연구는 하이스코에서 지원한 산학협동과제 "차세대 자동차용 신강재에 대한 저항 점 용접성 평가"와 한국과학재단에서 지원한 2005년 국제협력공동연구 "저항 점 용접에서 GA강판의 도금층에 대한 용접성 분석 및 공정 최적화에 관한 연구"에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. B. K. Rhyu and C. S. Kang : A Study on the Weldability of Galvannealed Steel in Spot Welding Process, Journal of KWS, **5-1** (1987), 64-72 (in Korean)
2. S. A. Gedeon, D. Schrock, J. LaPointe, and T. W. Eagar : Metallurgical and Process Variables Affecting the Resistance Spot Weldability of Galvanized Sheet Steels, SAE Technical Paper 840113 (1984)
3. S. A. Gedeon and T. W. Eagar : Resistance Spot Welding of GAlvanized Steel : Part I. Material Variations and Process Modifications, Metallurgical Transactions B, 17B (1986), 879-885
4. J. K. Min, Y. K. Oh and G. S. Kim : A Study on the Spot Weldability of Automotive Steel Sheets, Journal of KWS, **14-3** (1996), 41-47 (in Korean)
5. S. P. Kim, T. M. Hong and H. S. Chang : A Study on the Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy(I), Journal of KWS, **12-4** (1994), 127-140 (in Korean)
6. B. C. Son, S. Y. Woo, J. B. Lee, Y. B. Choi and H. S. Chang : A Study on Resistance Spot Welding of Dissimilar Sheet Metals(Aluminum Alloy-Steel Sheets), Journal of KWS, **15-4** (1997), 42-62 (in Korean)
7. J. C. Park, W. W. Jung and S. S. Kang : A Study on the Weldability and the Fatigue Characteristics in Resistance Spot Welding of 5182-O/6061-T6 Dissimilar Aluminum Alloy Sheets, Journal of KWS, **17-2** (1999), 44-52 (in Korean)
8. H. Park, T. Kim and S. Rhee : Optimization of Welding Parameters for Resistance Spot Welding of TRIP Steel using Response Surface Methodology, Journal of KWS, **21-2** (2003), 76-81 (in Korean)
9. E. W. Kim and T. W. Eagar : Parametric Analysis of Resistance Spot Welding Love Curve, SAE Technical Paper 880278 (1988)
10. M. Calva and W. Eagar : Enhancement of the Weldability in Resistance Spot Welding, Sheet Metal Welding Conference IV, Southfield, Mich., (1990)
11. KS B 0851, 점 용접 이음의 인장 전단 시험 방법, 한국표준협회, (1980)

12. AWS, "Recommended practices for automotive weld quality - resistance spot welding", AWS D8.7-88 document, (1987)
13. D. C. Montgomery : Design and Analysis of Experiments (5th Edition), JOHN WILEY & SONS, INC. 2001, 427-510
14. D. J. Spinella : Using fuzzy logic to determine operating parameters for resistance spot welding of aluminum, Sheet Metal Welding Conference VI, Detroit, Mich., (1994)
15. M. Kimchi, : Spot weld properties when welding with expulsion, Welding Journal, **63-2** (1984), 58-63