

스패터 및 기계적 강도특성에 미치는 점용접 조건의 영향

서도원* · 윤호철* · 전양배* · 임재규**

*전북대학교 공과대학 기계설계학과 재료 및 파괴역학 연구실
**전북대학교 기계항공시스템공학부, 공학연구원 공업기술연구센터

Effect of Spot Welding Conditions on Spatter and Mechanical Strength Properties

Do-Won Seo*, Ho-Cheol Yoon*, Yang-Bae Jeon* and Jae-Kyoo Lim**

*Materials & Fracture Lab., Dept. of Mechanical Design, Chonbuk Nat'l Univ., Chonju 561-756, Korea
**Corresponding Author, Faculty of Mech. & Aero. Sys. Eng., The Research Center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk Nat'l Univ., Chonju 561-756, Korea

Abstract

Spot welding is a process that sheet metals are joined in one or more spot by heating at the faying interface. In this process, the spatter is dispersed from melted area. It has been reported that spatter generation has adverse effects on weld quality. However, no systematic study has been carried out to find out its effect on weld quality in resistance spot welding processes. In this study, specially designed specimen are used to perform experimental investigation of spatter generation and its effect. Major finding of this study show trends in tensile-shear strength for various amounts of spatter generated during spot welding process. Thus, optimum welding conditions are proposed in view of spatter generation and tensile-shear strength.

(Received December 11, 2002)

Key Words : Spot welding, Spatter, Electric current, Tensile-shear strength, Electrode force, Penetration thickness

1. 서 론

전기저항용접법인 점용접(spot welding)은 오늘날 자동차, 가전분야를 비롯하여 대형 강구조물에 이르기까지 폭넓은 적용범위를 가지고 있으며, 용접(fusion welding), 납접(brazing and soldering) 및 리벳팅(riveting) 등의 접합방법에 비하여 작업성, 신뢰성, 안정성 및 생산성이 우수한 용접방법으로 강재의 용접, 특히 자동차 산업에 널리 쓰이고 있는 용접법이다. 그러나, 현재 자동차 산업에서는 점용접성의 개선이 절실히 요구되는데, 이는 자동차 차체의 경량화에 따른 재질의 변화와 방청규제로 인해 여러 종류의 표면처리 도금강판의 사용이 크게 증가하고 있기 때문이다. 이러한 표면처리 도금 강판의 용접성은 기존의 냉연강판에 비해 점용접성이 매우 열악한데, 이는 아연도금강판의 아연도금층의 용접과 전기전도도에 따른 용접특성 때문이

다¹⁾. 용접시 강판의 두께가 두꺼워지면 일반적으로 전류밀도를 높게 하고 통전시간을 길게 해 주어야 하며, 도금두께가 증가할수록 전류의 양도 증가해야 한다. 또한 전극 통전경이 커질수록 너깃(nugget) 형성을 위해 필요한 전류의 양은 증가해야 하지만, 적정 용접조건보다 용접전류(welding electric current)가 높거나 용접시간이 길면 스패터(spatter)가 발생된다. 스패터란 용접중 용착금속 주위로 비산하는 일부 용융물질의 미립자를 말하는 것으로 중간날림(expulsion)과 표면날림(surface flash)을 포괄하는 용접, 용단중에 비산하는 슬래그(slag) 및 금속입자를 말한다. 이러한 스패터는 차체 외관에 달라붙어 강판 표면 및 도장 공정후 외관에 심각한 품질문제를 야기시키며, 추가적인 제거 공정으로 인해 생산성 저하와 분진 발생으로 인한 작업환경 악화를 초래한다. 또한 스패터의 다량발생에 의한 점용접부의 용입두께(penetration thickness) 감소로 인해 점용접부에 응력집중이 발생하여 용접강도를 저하

시키는 원인이 되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 자동차 차체에 많이 사용되고 있는 GA45(galvannealed steel plate) 강판에 대하여 점용접 작업시 발생하는 스페터를 최대한 억제하기 위하여, 스페터 발생의 주요 요인중의 하나인 용접전류의 세기에 따른 스페터 발생량 및 용접강도와와의 관계를 평가하고자 한다. 이로써 스페터 발생량과 용접강도, 너깃직경, 용입두께 등의 관계를 규명하여 용접설계의 기본자료로 활용될 수 있도록 하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 시험편 재료 및 제작

본 연구에서 사용된 시험편 재료는 현재 자동차 점용접용 재료로 널리 사용되는 GA45 강판을 대상으로 하였다. 시험편은 두께가 1.0mm인 강판을 길이 120mm, 폭 25mm로 절단한 다음, 표면을 아세톤과 에틸알코올로 세척하였다. 그 후, 두 강판을 25mm 겹친 후, 지그에 고정시켜 용접을 실시하였다. 강도측정을 위한 시험편의 형상은 Fig. 1과 같으며, Table 1과 Table 2는 각각 GA45의 화학적 조성, 기계적 성질을 나타내는 표이다²⁾.

시험편 제작에 사용된 용접기는 단상교류식 단타점(single point) 공압식으로서, 정치식(150KVA) 용접기이다. 용접전류, 용접시간, 가압시간 및 유지시간은 용접기에 부착된 계기를 통하여 설정하였다. 전극 가압력(electrode force)은 10kN 용량의 하중 측정기(CAS C1-5010, Korea)를 사용하여 측정하였고, 용접조건의 정확성을 높이기 위하여 가압력을 수시로 측정 한 후에 보정하였다. 용접에 사용된 전극은 알루미늄 산화동인 D형(dome) Cr-Cu재질의 전극으로, 선단경은 $\varnothing 6\text{mm}$ 로 피용접물의 두께 t 에 대하여 RWMA (Resistance Welders Manufacturers Association)에서 권장하고 있는 $5\sqrt{t}$ 의 범위로 선정하였다³⁾. 시험편의

폭방향 중앙에 정확히 타점을 유지하도록 지그를 이용하였으며, 점용접기의 아래쪽 전극팁은 고정되어 있고 위쪽 전극팁이 움직여 용접을 실시하였다. 전극 가압력(1.5, 2.0, 2.5kN)과 용접전류(6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13kA)를 변화시키면서 용접을 실시하였으며, 냉각수 유속 6 l/min, 가압시간 30cycles, 용접시간 12cycles, 그리고 유지시간 10cycles를 일정하게 유지하고 용접을 실시하였다.

2.2 강도 및 기계적 특성 평가

본 연구에서는 점용접재의 일반적인 기계적 평가방법인 인장시험을 실시하여 용접강도를 평가하였다. 시험장치는 하중범위가 10kN인 유압식 만능시험기(Instron 8516, USA)를 사용하였고, 하중속도(CHS)는 2mm/min으로 설정하여 실험하였다. 강도값의 오차를 줄이기 위해 각 조건마다 5개의 시험편을 시험하여 평균값을 취하였다.

점용접을 실시하면 그 결과로 접합부에 용융 응고한 부분이 생기는데, 이 부분을 너깃이라고 하며 접합면을 중심으로 바둑돌 모양으로 형성되는 것이 특징이다. 이러한 용접성을 평가하는 중요한 인자인 너깃직경을 측정하여 용접전류와 전극 가압력의 변화에 따른 용접성

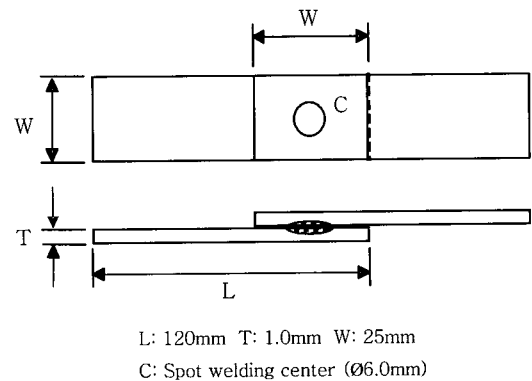


Fig. 1 Schematic of tensile-shear test specimen

Table 1 Chemical composition of GA45 steel plate(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
0.043	0.019	0.424	0.079	0.007	0.026	0.047	bal.

Table 2 Mechanical properties and surface conditions of GA45 steel plate

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Thickness (mm)	Coating wt. (g/m ²)	Composition of coating layer (%)
372	196	40	1.0	45	87Zn-13Fe

의 변화를 살펴보았다. 이때 너깃의 측정은 세로로 절단한 시편의 중앙에서 너깃의 크기를 측정하였다. 즉, 점용접부의 중앙에서 표면에 수직방향으로 절단한 후 고정단계를 거쳐 SiC 연마지로 연마한 다음, 5% Nital 부식액(95% ethyl alcohol+5% Nitric acid)으로 수초간 부식시킨 후 용착부의 너깃 형상과 조직을 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

2.3 스패터 발생량의 측정

스패터 발생량은 점용접시 비산되는 스패터를 모아서 무게를 측정해야 하지만, 이는 비산 방향이 일정하지 않고, 비산시 공기와 접촉하여 산화되기 때문에 정확한 스패터 발생량을 측정하기가 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 용접하기 전과 용접한 후에 시험편의 무게를 각각 측정하여 두 측정치의 차인 무게감소량(weight reduction)을 스패터 발생량으로 환산하였다. 용접 공정시 발생하는 스패터의 원활한 비산을 위해, Fig. 2(a)와 같이 용접부위를 곡면(Ø18mm) 처리하였으며, 용이한 접촉을 위해 전극 접촉부위는 전극과 동일한 형상(Ø6mm)으로 평면 처리하였다. 이로 인해 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 발생된 스패터는 대부분 비산되었다. 일부 높은 용접전류 조건에서는 소량의 스패터가 잔존하였으나, 이를 제거한 후 무게변화를 측정하였다. 스패터 발생과 무게 측정의 오차를 감안하여 각 용접조건마다 10개의 시험편을 준비하여 산술적 평균치를 취하였다. 무게측정은 측정범위가 320g이고, 오차범위가 0.001g인 전자저울(Precisa XT320M, Swiss)을 사용하였다.

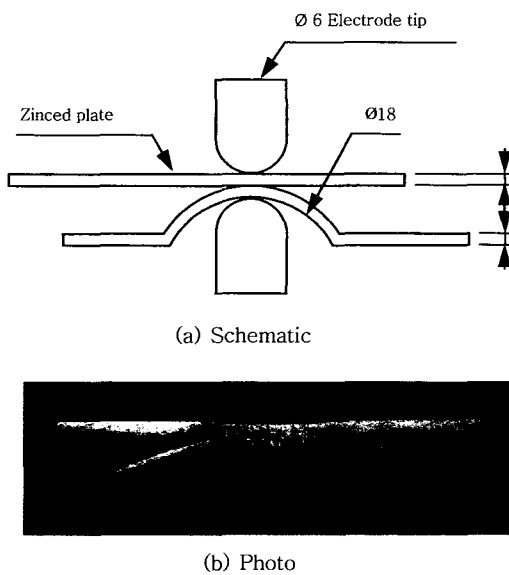


Fig. 2 Geometry of specially designed weld specimen for spatter analysis

3. 실험결과 및 고찰

3.1 스패터 발생량과 용접전류의 관계

용접시 용접전류가 부족하면 발열량이 부족하게 되어 너깃의 충분한 형성이 곤란해져 강도가 떨어진다. 반대로, 용접전류가 과대해지면 판 표면에 오목자국이 크게 형성되고 스패터가 심하게 발생되며 전극 팁의 오염도 현저하게 많아진다. 또한 중간날림이 생겨서 너깃에 기공이 남기도 한다. 이 상태에서 추가적인 과대 전류가 흐르거나 전극과 피용접재 표면에서 과대한 발열이 발생하면 표면날림까지 생기게 된다⁴⁾.

Fig. 3은 전극 가압력을 1.5, 2.0, 2.5kN으로 변화시키고, 용접전류를 6~13kA로 변화시켰을 때, 각각의 스패터 발생량을 나타내고 있다. Table 3은 용접공정 전후의 무게변화와 표준편차 및 오차를 용접조건에 따라 분류한 것이다. 용접전류가 6~8kA인 구간에서는 스패터가 거의 발생하지 않았으며, 일부 시험편에서는 용접전보다 무게가 증가하는 현상이 관찰되었다. 이는 용접작업이 활성분위기인 대기중에서 이뤄지기 때문에, 용접부가 용융되면서 상변화 및 추가적인 산화반응으로 인한 산화물을 생성 등으로 인해 무게가 증가된 것으로 보여진다⁵⁾. 이 구간은 용접전류가 낮기 때문에 입열량이 부족하여 너깃이 충분히 형성되지 못하여 용접부의 강도가 낮은 구간이다. 전류가 8~13kA인 구간에서는 모든 가압력 조건에서 용접전류가 증가함에 따라 스패터 발생량이 점차 증가하였다. 이 구간에서는 증가하는 전류량에 따라 열영향부가 점차 확대되고 이로 인해 스패터가 발생하는 영역이 증가하는 구간이다. 용접전류가 14kA 이상이 되면 과도한 용접발열량에 의해 금속 부위가 녹아서 구멍이 나며 전극 팁이 심하게 오염되며

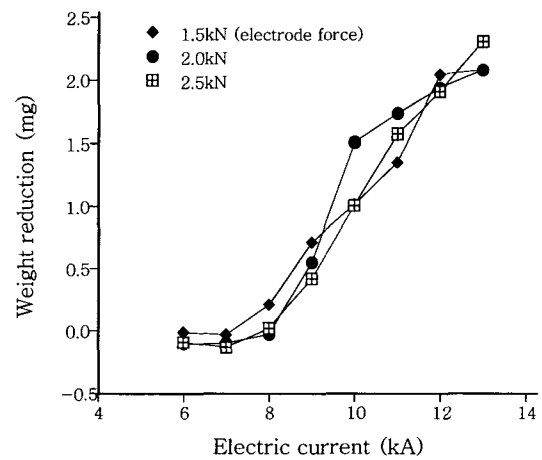


Fig. 3 Spatter generation for various weld currents and electrode forces

Table 3 Weight reductions and statistics of spot welded plates

Welding conditions		Weight reductions			Arithmetic statistics		
Electrode force(kN)	Electric current(kA)	Max. (mg)	Min. (mg)	Mean (mg)	Std. deviation	Std. error	No. of samples
1.5	6	0.040	-0.060	-0.013	0.032	0.010	10
	7	0.010	-0.060†	-0.032	0.020	0.006	10
	8	0.370	-0.080	0.204	0.140	0.044	10
	9	0.990	0.550	0.709	0.131	0.041	10
	10	1.650	0.620	1.014	0.273	0.086	10
	11	1.810	1.060	1.350	0.258	0.081	10
	12	2.610	1.330	2.042	0.384	0.121	10
2.0	13	2.430	1.310	2.079	0.331	0.105	10
	6	-0.030	-0.150	-0.105	0.044	0.014	10
	7	-0.010	-0.170	-0.102	0.056	0.018	10
	8	0.160	-0.170	-0.029	0.111	0.035	10
	9	1.530	0.110	0.549	0.377	0.119	10
	10	2.040	0.660	1.506	0.561	0.177	10
	11	2.630	0.830	1.734	0.701	0.222	10
2.5	12	2.720	1.350	1.934	0.507	0.160	10
	13	2.740	1.530	2.078	0.399	0.126	10
	6	-0.040	-0.180	-0.095	0.043	0.014	10
	7	-0.020	-0.200	-0.137	0.059	0.019	10
	8	0.810	-0.170	0.019	0.285	0.090	10
	9	1.300	0.120	0.417	0.420	0.133	10
	10	1.940	0.540	1.007	0.453	0.143	10
11	2.540	0.870	1.570	0.557	0.176	10	
12	3.090	1.230	1.907	0.509	0.161	10	
13	2.930	1.660	2.305	0.415	0.131	10	

†Minus sign(-) means that weight is increased after welding process.

나, 응고된 금속에 의해 붙어버리는 문제가 발생하였다. 이는 심각한 강도저하를 초래하고 용접공정 의도에서 벗어나기에, 본 연구에서는 14kA 이상은 고려되지 않았다.

3.2 스패터 발생량과 전극 가압력의 관계

Fig. 3을 통해 스패터 발생량과 전극 가압력과의 관계를 볼 수 있다. 전류조건별로 가압력이 증가함에 따라 스패터 발생량은 증가와 감소가 혼재되어 있다. 이처럼 전류가 6~13kA인 모든 구간내에서 스패터 발생량과 전극 가압력과는 어떤 일관적인 연관성은 찾아보기 힘들다. 즉, 스패터 발생량에 미치는 전극 가압력의 영향은 없는 것으로 보인다. 그러나, 가압력이 일정한 조건에서는 전류가 증가함에 따라 스패터 발생량은 증가하였다.

3.3 스패터 발생량과 용입두께의 관계

Fig. 4는 전극 가압력이 2.5kN인 경우에, 스패터 발생량과 용입두께와의 관계를 보여주고 있다. 용접전

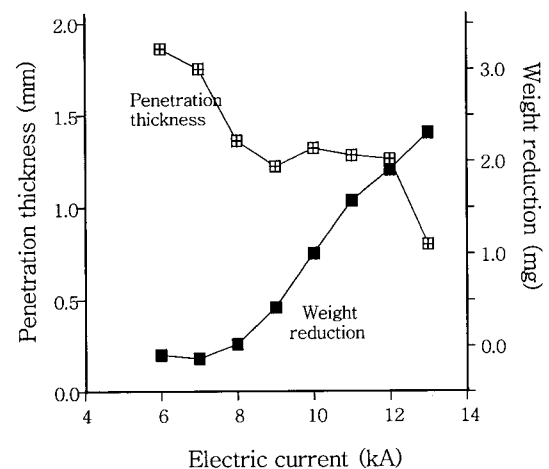


Fig. 4 Penetration thickness and weight reduction for various currents (Electrode force=2.5kN)

류가 증가함에 따라 스패터 발생량이 증가하면 용입두께는 상대적으로 얇아지기 때문에, 스패터 발생량과 용입두께는 서로 반비례하는 관계가 성립됨을 알 수 있다.

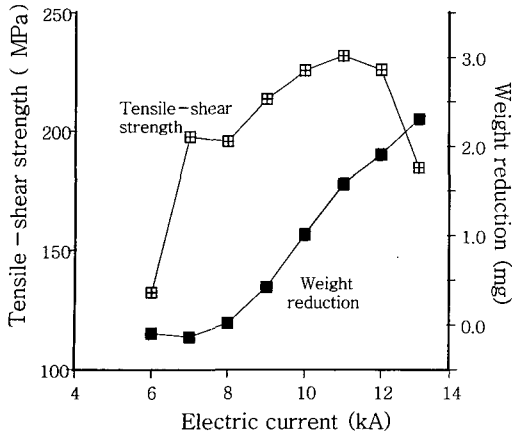


Fig. 5 Tensile-shear strength and weight reduction for various currents (Electrode force=2.5kN)

3.4 스패터 발생량과 인장강도의 관계

Fig. 5는 전극 가압력이 2.5kN일 때, 스패터 발생량과 인장강도와의 관계를 보여주고 있다. 용접전류가 6~8kA 구간에서는 스패터가 발생이 거의 없지만, 전류가 증가하면서 인장강도가 급격히 증가되는 것을 알 수 있다. 8~12kA에서는 스패터 발생량이 증가하는 구간으로서 인장강도도 완만한 상승곡선을 그리면서 11kA에서 최고값을 보인다. 12~13kA에서는 계속 심하게 스패터가 발생하는 구간으로서 전류의 증가와 더불어 강도가 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 스패터 발생량이 많아지면서 강판 사이의 용융금속이 비산되어 그만큼 접촉량이 줄어들면서 인장강도가 약해지는 것을 알 수 있다.

3.5 스패터 발생량과 너깃직경의 관계

Fig. 6은 전극 가압력이 2.5kN일 때, 스패터 발생량과 너깃직경과의 관계를 보여주고 있다. 용접전류가

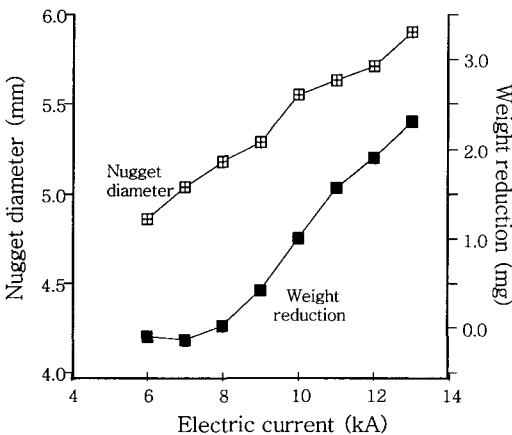


Fig. 6 Nugget diameter and weight reduction for various currents (Electrode force=2.5kN)

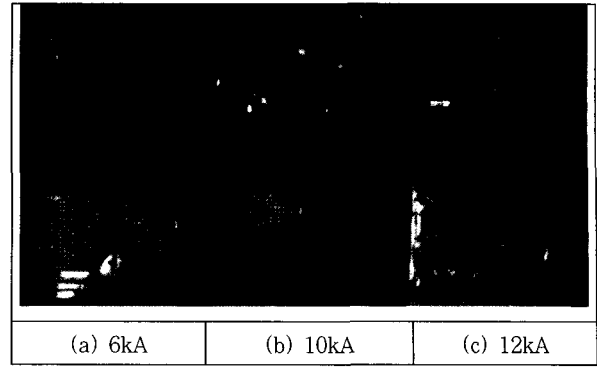


Fig. 7 Fractured specimens at electrode force 2.5kN

증가함에 따라 너깃직경은 비례적으로 증가함을 볼 수 있다. 전류가 6kA일 때는 전류의 부족으로 인해 너깃이 충분하게 형성되지 않아 용접부의 전단강도가 약해 용접부가 떨어져 나갔으며(Fig. 7(a)), 스패터도 거의 발생되지 않았다. 전류가 8~13kA인 구간에서는 전류가 증가할수록 스패터 발생량이 증가하면서 너깃직경도 넓어졌다. 이는 용접전류로 인한 입열량이 증가함으로써 너깃직경이 증가하는 것으로 보여진다. 그러나 이 구간은 용접부가 아닌, 열영향부와 용접부 사이에서 균열이 진행되었음을 파괴된 시험편을 통해 확인할 수 있었다(Fig. 7(b), (c)). 여기서는 용접전류가 증가하면서 너깃직경과 스패터 발생량이 증가하는 상호 비례 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 차체에 주로 사용되는 GA45 강판에 대하여, 점용접 공정에서 발생하는 스패터량과 용접전류, 전극 가압력, 용입두께, 인장강도, 너깃직경 등과의 관계에 대해 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전극 가압력이 1.5~2.5kN인 경우, 스패터 발생량은 용접전류가 6~8kA 구간에서는 스패터가 거의 발생되지 않았으며, 8kA~13kA 구간에서는 전류가 증가함에 따라 스패터 발생량이 비례적으로 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 가압력이 1.5~2.5kN, 전류가 6~13kA인 구간에서 전극 가압력은 스패터 발생량에 큰 영향을 주지 않았다.
- 3) 가압력 2.5kN, 전류 6~13kA 구간에서는 전류가 증가함에 따라, 스패터 발생량과 용입두께는 서로 반비례 관계에 있으며, 스패터 발생량과 너깃직경과는 비례적 관계가 있다.
- 4) 가압력이 2.5kN일 때, 스패터 발생량이 거의 없는 전류 6~8kA 구간에서는 전류가 증가함에 따라 인장강도가 급격히 증가되며, 8~12kA에서는 스패터 발

생량이 증가하는 구간으로서 인장강도도 완만한 상승곡선을 그리면서 11kA에서 최고값을 보였다. 12~13kA에서는 계속 스패터가 심하게 발생하며, 용접전류의 증가와 더불어 인장전단강도가 현저히 감소하였다.

참 고 문 헌

1. 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 840113, Warrendale, PA, 1984
2. Jun Soo Lee and Eog-Yong Chin : Effect of Weldability Conditions on Spot Welding of Galvanized Steel Sheet, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., **34-2** (1996), 261-269 (in Korean)
3. J.K. Min, Y.K. Oh and G.S. Kim: A Study on the Spot Weldability of Automotive Steel Sheet, Journal of KWS, **14-3** (1996), 41-47 (in Korean)
4. S.M. Cho : Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results, Journal of KWS, **15-2** (1997), 1-10 (in Korean)
5. R.W. Messler, Jr. : Joining of Advanced Materials, Butterworth-Heinemann, 1993, 245-274