



승용차 차체 경량화를 위한 고강도강재 및 용접기술

The High Strength Steels for Light Car Body and its Welding Technology

이 목 영 · 김 기 철 · 권 영 각

Mok-Young Lee, Ki-Chul Kim and Young-Gak Kweon

1. 서 론

1990년대에 접어들면서 미국, 유럽 등 선진국을 중심으로 환경유해물질 배출 및 안전에 대한 규제가 강화되었다. 미국 캘리포니아주에서는 2005년부터 저공해차 (SULEV; Super Ultra Low Emission Vehicle)의 판매비중을 10%로 의무화하고 있다. 이 저공해차의 배출가스기준에서 NMOG(Non-Methane Organic Gases)는 2000년 이전 대비 25배, NOx는 20배 및 CO는 3.4배 강화되었다. 유럽에서는 이산화탄소 배출량 감소가 우선시됨에 따라 연비저감을 추진하고 있다¹⁾. 이를 위해서 폭스바겐은 엔진, 서스펜션, 차체 등을 경량화하고 1191cc의 디젤엔진을 장착하여 3리터의 연료로 100km 주행이 가능한 승용차를 개발하였다²⁾.

자동차산업에서 차체 경량화는 기업의 생존을 위한 필수조건이 되었다. 차체 경량화를 위해서 고강도강, 알루미늄 혹은 마그네슘 등의 비강도가 높은 소재의 적용이 증가되고 있다³⁻⁵⁾. 또한 TWB (Tailor Welded Blank), 하이드로포밍 및 차체의 레이저용접 등 신공정기술을 적용하여 불필요한 부위를 최소화하여 차체의 무게를 감소시키고 있다⁶⁾.

차체경량화를 위한 대표적인 소재인 고강도강은 급열/급냉시 경도가 증가되는 합금원소가 다량 첨가되어 용접성을 저하시킨다. 한편 경량차체를 위한 소재로 최근 부각되고 있는 알루미늄합금은 산화되기 쉽고, 열 및 전기전도도가 높기 때문에 용접이 어려운 소재이다. 따라서 차체경량화를 위해서 용접기술 확보는 반드시 선행되어야 하는 과제이다³⁾.

본 고에서는 차체경량화를 위하여 사용되는 고강도 철강소재의 개요 및 이 소재의 일반적인 저항용접특성에 관하여 소개하였다.

2. 경량차체를 위한 고강도 철강 소재

2.1 고강도강의 종류

고강도강의 기준은 한국 및 일본의 경우 인장강도가 35kg/mm² 이상인 것을 말하며, 미국에서는 항복강도 기준 35ksi 이상인 것을 고강도강이라고 한다. 강의 강화기구는 고용강화, 석출강화, 결정입자미세화 및 강화상의 분율증대에 의한 강화등이 있다. 고강도강의 종류는 고용강화강, 소부경화강, 석출경화강, TRIP강, DP강 등이 있으며, 이 외에도 CP강, Mart강 및 boron강 등이 있다^{7,8)}.

- 고용강화강

철강소재의 강화기구중 가장 일반적인 것으로 고용원자를 첨가하여 Fe 원자의 격자변형을 통한 페라이트 영역의 내부응력강화 효과를 얻는다. 고용원자로는 P, Si, Mn 등의 치환형 원소 및 C, N 등의 침입형 원소가 있다. 고용강화강은 다른 강화기구에 비하여 강도증가가 적기 때문에 차체의 내/외판 판넬에 적용되며, 35~45kg 급 강재가 이에 해당된다.

- 소부경화강

프레스 가공 및 도장 후 열처리에 의하여 강도를 증가시키는 것으로, 열처리(~170°C)에 의하여 확산된 C 및 N 등 고용원소가 소성가공과정에서 형성된 전위에 고착되어 강도를 향상시킨다. 이 소재는 내dent성이 향상되어 door, hood, fender 등 외판재에 주로 적용된다.

- 석출경화강

합금원소를 고용한계 이상으로 첨가하여 석출물에 의하여 전위이동을 방해하여 강도를 향상시키는 것으로 석출물의 크기가 미세할수록 강화량이 증가된다. 강화에 이용되는 주요 석출물은 NbC, TiC, VC, AlN 등

이 있으며, 고용강화에 비하여 강도증가효과는 크지만 성형성은 감소된다.

- TRIP강

기지에 잔류된 오스테나이트가 소성가공에 의하여 마르텐사이트로 변태되어 강도가 상승하는 것으로 잔류 오스테나이트의 분율을 증가시키기 위하여 C, Si, Mn 등 오스테나이트 안정화 원소를 첨가한다. TRIP강은 성형성 및 고강도의 특성을 동시에 확보하는 것이 가능할 뿐만 아니라 변태에 의하여 충격에너지를 흡수하므로 door impact bar, bumper reinforcement 등에 사용된다.

- DP강

페라이트 기지에 마르텐사이트 입자를 10~20% 형성시켜 강도를 향상시킨 것으로 마르텐사이트 변태를 위해서는 이상역에서 급냉시켜야 하므로 TRIP강에 비하여 용융아연도금에 유리하다. DP강은 동일한 인장강도에서 항복강도가 낮아 가공성이 양호하며, bumper, suspension, body structure 등에 사용된다.

- CP강

석출경화 및 변태강화를 이용하는 것으로 페라이트, 베이나이트, 마르텐사이트 및 오스테나이트 등이 혼합된 복합조직강이다. CP강은 인장강도와 항복강도가 동시에 높아 bumper reinforcement와 같이 단순 굽힘 정도의 가공을 받는 보강재에 주로 사용된다.

2.2 고강도강의 적용 현황

전술한 바와같이 고강도강은 차체의 강성 및 연비의 동시 증가를 위한 효과적인 소재이다. 그러나 이러한 고강도강은 강도가 증가함에 따라 연신율은 감소하여 성형성이 저하된다. 그림 1에 고장력강판의 종류를 강도 및 연신율에 따라 나타내었다.

고용강화 및 소부경화에 의하여 인장강도 50kg 급

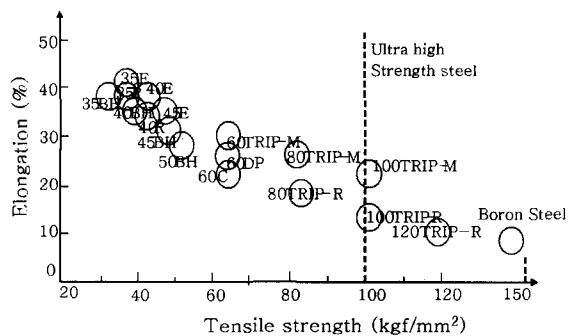


Fig. 1 High strength steel according to tensile strength and elongation

강재의 제조가 가능하며, 성형성은 고용강화강이 다소 높다. 60kg 급 강은 석출경화에 의하여 제조가 가능하지만 그 이상의 고강도강은 TRIP 혹은 DP에 의하여 제조된다. 인장강도 120kg 급 이상의 초고강도를 나타내는 마르텐사이트강 및 보론강은 10% 미만의 낮은 연신율을 갖는다.

차체에서 고강도강은 강성을 향상시키기 위하여 member 류 및 frame 류에 적용되며, bumper reinforcement 및 door impact bar에는 초고강도 강이 사용된다. 그림 2에 자동차의 부품별 적용강재의 현황을 나타내었다.

철강재는 타 소재에 비하여 가격이 저렴하고 재활용이 용이하다는 점에서 자동차용 소재에서 우위를 점하여 왔으나, 최근에는 비강도가 높은 알루미늄과 치열한 경쟁을 하고 있다. 이에 철강업체에서는 차체 경량화에 있어서 강력한 경쟁소재인 알루미늄에 대응하기 위하여 '95.9-'98.3에 ULSAB 프로젝트를 수행하였다. 이 프로젝트에서는 TWB 및 고장력강을 사용하고 레이저용접을 적용하여 25% 가량의 차체경량화를 이루었다. '98.4-'99.5의 2단계인 ULSAS에서는 hydro forming (HF) 및 초고강도강을 적용하여 20% 가량의 suspension 부문 경량화를 이루었다. 또한 '98.4-'00.5의 ULSAC에서는 TWB, tube HF 및 고강도강을 적용하여 closure 부문에서 25% 가량의 경량화를 이루었다. '01.6-'03.12의 ULSAB-AVC에서는 TWB, HF, 고강도강 적용 및 경량화 설계등을 통하여 실차 중량의 38% 가량 경량화시켰다. 이 단계에서는 차량전체에 대하여 경량화를 시도하였으며, 적용된 강재의 구성비를 그림 3에 나타내었다.

차체 경량화에 있어서 알루미늄 혹은 마그네슘과 같은 비철금속이 유리하지만 비용 및 제조공정상의 특징 등으로 인하여 고강도강의 적용이 증가할 것으로 예상된다. 크라이슬러의 경우 2005년 이후 전체 강재 사용량의 75% 이상을 고강도강으로 대체할 계획이며, 특히 인장강도 100kg급 이상의 초고강도 강재도 30% 가량 사용할 것으로 알려졌다. 그러나 고강도강의 경우 다량의 경화성 합금원소 첨가에 의하여 기공, 균열 등 용접

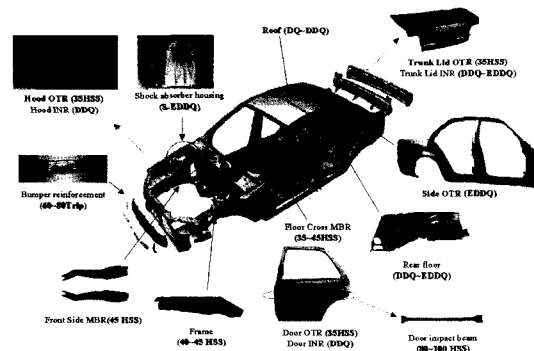


Fig. 2 Part for body in white

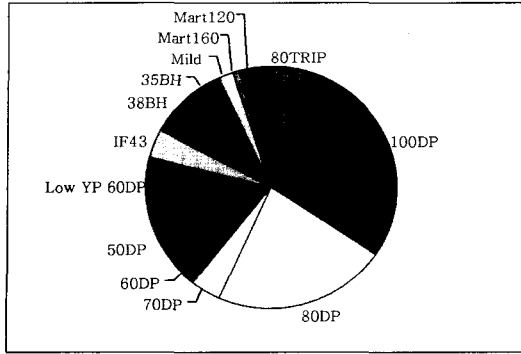


Fig. 3 High strength steel for ULSAB-AVC

결합이 발생하므로 용접성 및 용접장비에 대한 충분한 연구가 필요하다⁹⁾.

3. 고강도강의 저항 점용접특성

고강도강은 합금원소의 첨가량이 많기 때문에 일반강과 비교하여 용접성의 차이가 발생한다. 고강도강의 점용접에 있어서 특징은 다음과 같다¹⁰⁾.

- 1) 모재의 강성이 크다.
- 2) 체적저항이 크다.
- 3) 용접부에 기공이 발생하기 쉽다.
- 4) 용접부에 균열이 발생하기 쉽다.

고강도강에서 모재의 강성이 크다는 것은 동일한 두께에서 일반강에 비하여 높은 가압력을 인가하여야 한다는 것을 의미한다. 그림 4는 저항 점용접에서 전극가압력에 미치는 소재 강도의 영향을 나타낸 것이다. 전극 가압력은 소재두께에 비례하여 증가시켜야 하며, 동일한 두께에 대해서도 소재의 강도가 높을수록 전극가압력을 증가시켜야 한다.

모재의 성분중 합금원소량이 증가하면 체적저항이 증가하므로 상대적으로 낮은 용접전류에서도 모재가 용융된다. 그림 5는 모재의 인장강도에 따른 적정용접전류의 하한 및 스패터 발생전류를 나타낸 것이다. 모재의

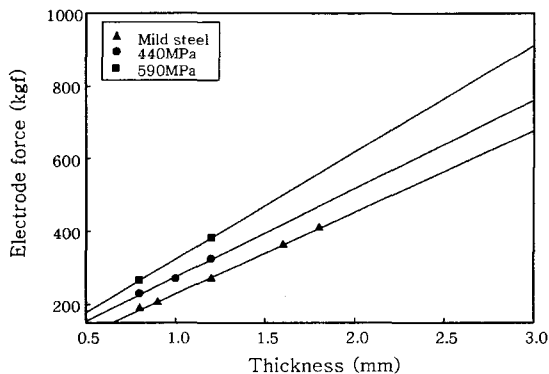


Fig. 4 Effect of steel grade and thickness on recommended electrode pressure

인장강도가 증가함에 따라 적정용접전류의 하한 및 스패터 발생전류는 감소하며, 특히 스패터 발생전류의 감소폭이 크기 때문에 고강도강에서 적정용접전류범위는 일반강에 비하여 전류범위의 폭이 좁다¹¹⁾.

모재에 첨가된 C, Si, Mn 등의 합금원소에 의하여 용접부는 경화조직이 형성되고, P 및 S 등에 의하여 입계가 취화된다. 따라서 고강도강의 점용접부는 일반강에 비하여 너깃내 파단이 쉽게 발생하는 것으로 알려졌다¹²⁾. 그림 6은 두께 2.0mm의 냉연 60TRIP강을 전극가압력 660kgf, 통전시간 23사이클의 조건에서 점용접한 결과를 나타낸 것이다. 너깃경이 $4.25\sqrt{t}$ 이상인 조건에서도 용접부 계면파단이 발생하였다.

고강도강에서 용접성을 확보하기 위하여 C, P, S 등의 화학성분을 규제하기도 한다. 그림 7에 탄소함량에 따른 P+3S의 상한치를 제한하였다. 즉 탄소의 함량이 증가할수록 엄격한 P 및 S의 관리가 요구된다¹³⁾.

고강도강에 합금원소의 첨가량을 제한하더라도 용접부 경화는 어쩔 수 없이 초래되므로 용접과정중에 열처리과정을 추가하기도 한다. 그림 8에 고강도강의 용접부 경화를 감소시키기 위한 용접공정의 예를 나타내었다. 그림에서 (a)는 용접전류가 통전된 직후 연속해서

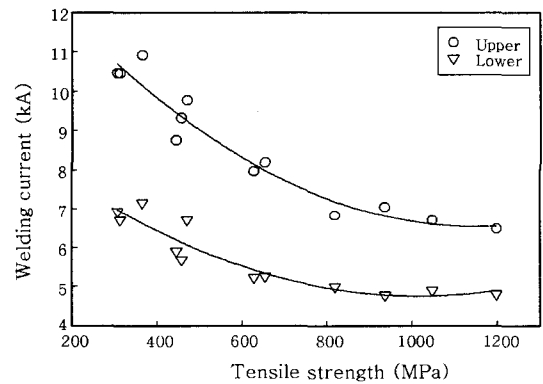


Fig. 5 Relationship between welding current range and steel grade

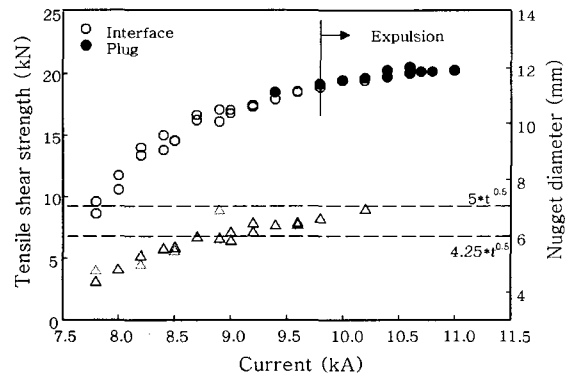


Fig. 6 Tensile strength and nugget diameter change according to welding current of 60TRIP

본 전류보다 낮은 전류를 통전하여 냉각속도를 감소시키는 것이다. (b)는 용접이 끝나고 나서 소정의 냉각 시간이 경과한 후, 본 전류보다 낮은 전류로 재통전하여 용접부를 템퍼링하여 용접부 취화를 개선시키는 방법이다.

대부분의 금속과 마찬가지로 저항용접에서 전극재료로 사용되는 동합금도 온도에 비례하여 강성이 감소한다. 이 경우 급격한 전극의 손모가 발생하므로 손모를 감소시키기 위하여 전극에 냉각수를 흘려 냉각시킨다. 일반적으로 냉각수의 온도는 실온 및 유량은 8l/min을 추천하지만, 고강도강에서는 용접부의 냉각속도를 감소시켜 취화조직의 생성을 감소시키기 위하여 냉각수의 유량을 다소 감소시킨다. 이와 유사한 개념에서 고강도강의 점용접에서는 용접전류 통전후의 유지시간을 감소시킨다. 유지시간이 길어지면 전극에 의한 냉각으로 인하여 용접부 취화조직이 증가하여 계면파단이 일어나게 된다. 그러나 유지시간이 짧게 되면 용융금속의 응고/수축에 의한 기공이 생기게 된다. 그림 9는 TRIP

강의 점용접부 단면조직을 나타낸 것으로 (a)에서는 유지시간이 짧아 너깃내에 기공이 형성되었으나, 유지시간이 긴 (b)에서는 기공이 형성되지 않았다. 그러나 유지시간이 긴 경우에는 전극에 의한 냉각으로 인하여 에너지가 손실되므로 전류 혹은 통전시간을 다소 높여주어야 한다.

전술한 바와같이 고강도강에서는 용접부 취화에 의하여 너깃내 파단이 발생할 확률이 크며, 특히 인장하중이 작용하는 경우 그렇다. 따라서 고강도강에서는 전단인장강도 대비 인장강도의 비율 즉, 연성비(CTS/TSS)가 중요한 의미를 갖는다. 일반강에서 연성비는 80% 즉, 인장강도가 전단인장강도의 80% 이상을 나타내지만 고강도강에서는 연성비가 저하된다¹⁴⁾. 그림 10은 입열량 $4\sqrt{t}$ 의 용접조건에서 고강도강의 강종에 따른 연성비를 나타낸 것이다. 강도에 비례하여 연성비는 감소하여 1000MPa 급 이상의 강종에서 연성비는 30% 가량이었다. 한편, TRIP강의 연성비는 페라이트와 마르텐사이트의 2상 조직을 갖는 DP 강에 비하여 현저히 낮았다.

용접열에 의하여 급열/급냉을 겪는 용접부는 빠른 냉각속도로 인하여 경도가 높은 상이 형성되어 경화된다. 그러나 상변태에 의한 강화상을 이용하여 강도를 높인

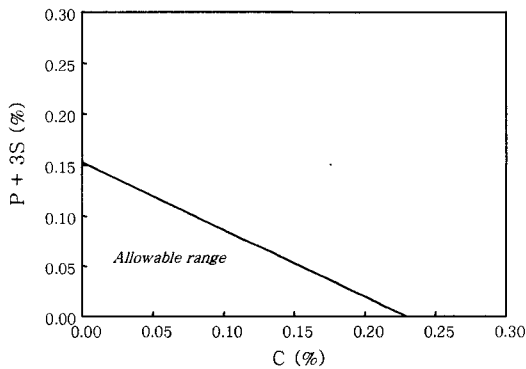


Fig. 7 Effect of chemical compositions on electrical resistance welding

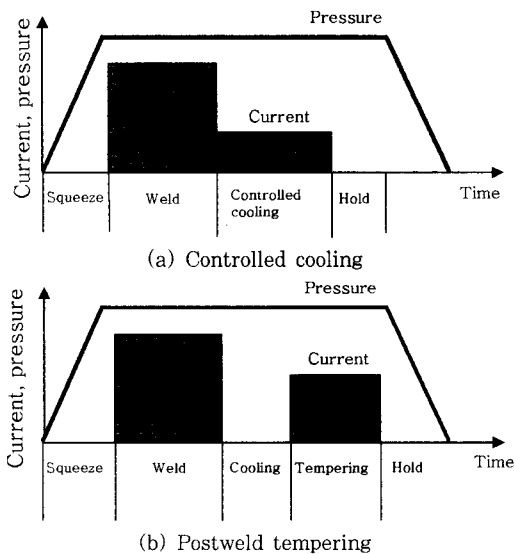


Fig. 8 Welding sequence for high strength steel

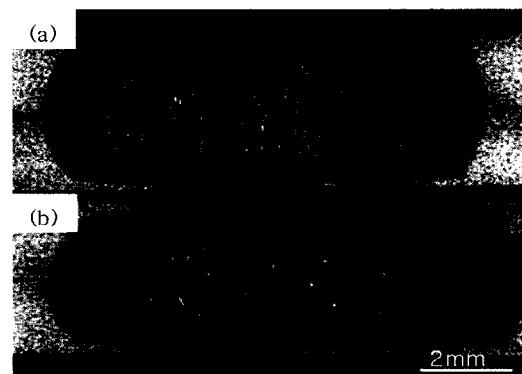


Fig. 9 Cut view of spot weldment at hold time (a) 1cycle and (b) 20cycle

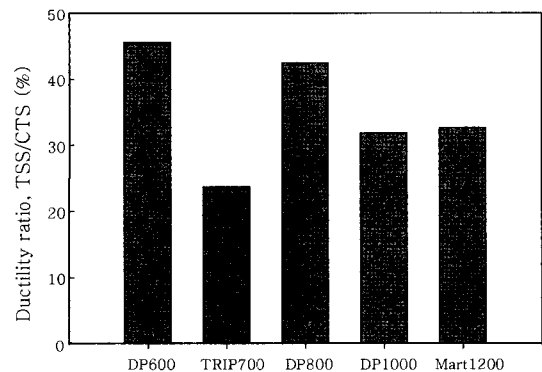


Fig. 10 Ductility ratio change according to steel grade

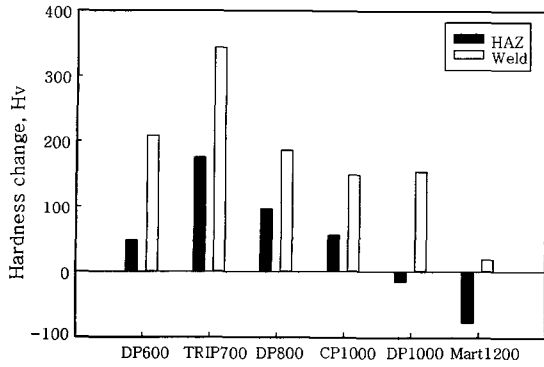


Fig. 11 Relationship between hardness change and steel grade

고강도강에서는 열영향부 연화현상이 발생한다. 그림 11은 강도에 따른 열영향부 경도변화를 나타낸 것이다. 소재의 강도가 증가함에 따라 모재와 용접부 혹은 열영향부의 경도차이는 감소한다. 특히 1000MPa 급 이상의 초고강도강에서는 모재에 비하여 열영향부의 경도가 감소하는 열영향부 연화현상이 발생한다¹⁵⁾.

4. 결 론

차체 경량화와 연비향상을 동시에 만족시키기 위하여 고강도강의 적용비율이 증가하고 있다. 그러나 이러한 고강도강은 강성이 높고 용접부의 취성이 증가하여 용접에 어려움이 따른다. 고강도강의 저항 점용접 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고강도강은 소재 자체의 강성이 높기 때문에 일반 강에 비하여 강성이 높은 가압기구 및 가압력이 요구된다.
- 2) 화학성분의 첨가량이 많아 소재 자체의 비저항이 높기 때문에 전류는 다소 낮추는 것이 바람직하며, 스파터가 발생하는 경우 급냉에 의하여 용접부 취성이 증가하므로 너깃내 파단이 발생한다.
- 3) 경우에 따라서는 용접부 취성을 감소시키기 위하여 후열처리가 필요하다.
- 4) 전류 통전 후 유지시간이 짧으면 너깃내 기공이 발생하며, 반대로 지나치게 길면 전극에 의한 급냉으로 인하여 용접부 취성이 증가하므로 적절한 통전시간의 선정이 요구된다.
- 5) 고강도강의 저항 점용접에서는 연성비(CTS/ TSS)가 낮고 특히 초고강도강에서는 열영향부 연화현상이 발생하므로, 이를 고려한 구조설계가 필요하다.



· 이목영 (李穆泳)
 · 1965년생
 · 포항산업과학연구원 용접센터
 · 하이브리드용접, 레이저용접, 아크용접
 · e-mail: accelee@rist.re.kr



· 김기철 (金伎徹)
 · 1948년생
 · 포항산업과학연구원 용접센터
 · 고에너지 밀도 용접, 용접현상 해석 및 system 개발
 · e-mail: kicholk@rist.re.kr



· 권영각 (權寧珏)
 · 1952년생
 · 포항산업과학연구원 용접센터
 · 용접강도, 용접부파손해석, 부식 및 방식
 · e-mail: ygkweon@rist.re.kr

참 고 문 헌

1. 이항구, 조 철 : 세계자동차업체들의 발전전략 분석과 한국 자동차산업의 진로, 산업연구원, 2001. 12
2. 자동차부품연구원, 선진차량평가보고서, 2002 3L Car Lupo
3. 皆川 始: 自動車産業における溶接技術, 溶接技術, 2 (2004) 76-79
4. 장웅성, 노중석, 김홍주, 방국수 : 마그네슘 합금의 용접기술 현황, 17-1, 2(2004) 55-64
5. 輕金屬學會, 自動車輕量化のための生産技術, 日刊工業新聞社, (2003) 109-119
6. Rachel Trem : The future of automaking - Tailor Welded Blanks, Welding Design and Fabrication, 2(2004) 37-40
7. 고팡문, 노재홍, 정경훈, 유기준 : 차체 경량화 기술 개발 동향, 제12회 철강기술심포지엄 "자동차 경량화를 위한 소재 및 가공기술", 4 (2003) 81-90
8. Laurent Cretteur : Ultra high strength steels for automotive applications, Minutes of the road transport panel meeting "Ultra high strength steel - design and joining issues for road transport"2 (2002)
9. 이원범 : 자동차용 강재 신 가공기술 개발 현황, 울산 민·산·관 기술협력위원회 워크샵 "미래형 자동차의 생산가공기술", 3(2004) 15-50
10. 岡田 慎一: 自動車産業における最近の抵抗溶接技術, 溶接技術, 3 (2003) 72-76
11. 小野 守章: 自動車用高强度薄鋼板のスポット溶接性, 溶接技術, 3 (2003) 77-82
12. 大澤 一典, 鈴木 善繼, 田中 俊吾: スポット溶接性に優れた低炭素當量型590-980 MPa級合金化熔融亜鉛めっき鋼板, 川崎製鐵技報, 34-2(2002) 13-19
13. 田中 甚吉, 樺澤 眞事, 小野 守章, 張江 守康: 高强度冷延鋼板のスポット溶接性, 日本鋼管技報, No.105 (1984) 1437-1443
14. 김기철, 이기호, 장래웅: 80kg 급 고장력 냉연강판의 용접성, 대한용접학회지, 10-1 (1992) pp.52-59
15. G.Shi and S.A.Westgate: Resistance spot welding of high strength steels, 11th International conference on the Joining of Materials, 25-28 May 2003, Helsingør, Denmark