

자동차용 강재의 접합기술 동향

최 두 열 · 김 영 곤

Trend of Joining Technology for Automotive Sheet Steels

Du-Youl Choi and Young-Gon Kim

1. 서 론

자동차의 경량화 및 충돌 안정성 강화 등의 자동차 산업에서의 강력한 요구에 의해 DP, CP, TRIP, Martensite강 등의 초고강도강(Advanced High Strength Steel, AHSS)의 적용이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 북미지역의 조사 결과에 따르면, 차체에서의 AHSS 적용 비율이 2007년 약 10%에서 2015년이 되면 약 35%로 크게 증가할 것으로 예측하고 있다¹⁾. AHSS 적용 비율만 늘어나는 것이 아니라, 모재 강도 또한 점차 고강도화 되어 최근에는 충돌 또는 강성부재에 기가(Giga)급 강재가 채택되고 있다. 차체 경량화와 함께 자동차 소재 측면에서 이슈가 되는 것이 내구성 확보이다. 다시 말해서 수요가에 대한 차량의 방청 보증기간 연장을 위해서는 내식성 보증이 필수적이다. 이와 함께 소재의 고강도화에 따라 두께가 얇아지면서 내식성에 대한 요구가 한층 높아져서 표면처리강판의 적용이 급격히 증가하고 있다. 자동차 소재로 사용되는 대표적인 표면처리강판은 GI(Galvanized), GA(Galvannealed), EG(Electro-galvanized)의 아연도금강판이지만, 보다 우수한 내식성 또는 용도에 따른 기능성을 부여하기 위하여 아연도금강판에 윤활처리, 수지피복 등의 후처리를 한 표면처리 강판의 사용이 점차 증가하고 있다.

자동차 조립에는 다양한 용접 및 접합 방법이 적용되고 있다. 자동차를 크게 차체와 샤시로 구분하였을 때, 차체는 스폿 용접, 샤시는 아크(MAG) 용접이 가장 널리 이용되는 용접법이다. 그러나 최근에는 앞서 언급된 기존의 연강이나 냉연강판에 비해 상대적으로 용접성이 떨어지는 AHSS, 표면처리강판의 적용이 증가하고, 또한 Al, Mg 합금, 플라스틱, 복합재료 등의 다양한 소재의 사용이 증가하여 레이저 용접, 구조용 접착제, 클린칭, 마찰교반점용접(FSSW; Friction Stir Spot Welding)²⁾ 등 다양한 접합 방법이 채용되고 있다.

본 논문에서는 최근 적용이 크게 확대되고 있는 AHSS와 표면처리강판의 용접 특성과 문제점에 대해 살펴보고, 이러한 문제점을 해결 또는 차체의 강성을 증가시키기 위해 적용되고 있거나 개발되고 있는 접합 기술에 대해 간단히 소개하고자 한다.

2. 자동차용 강재의 용접 특성

2.1 초고강도강(AHSS)의 용접 특성

일반적으로 AHSS의 스폿 용접은 용접공정변수와 용접성 측면에서 일반 연강과 다른 특성을 보인다. AHSS는 합금성분이 높기 때문에 모재의 고유저항이 증가하므로 합금성분이 적은 연강 보다 낮은 용접전류가 요구된다. 그림 1은 합금성분(Ceq)에 따른 실온에서의 전기비저항(Resistivity)을 보여주는 것으로, Ceq가 증가함에 따라서 저항이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그림 2는 일정 가압력에서 연강, 390MPa급 일반 고강도강, 590MPa급의 DP강에 대한 용접시간 변화에 따라서 너깃경이 $4\sqrt{t}$ (t : 모재 두께)인 용접전류를 나타내는 하한전류와 스패터 발생전류를 보여주는 Weld lobe이다. 모재의 강도, 즉 합금원소 함량이 높

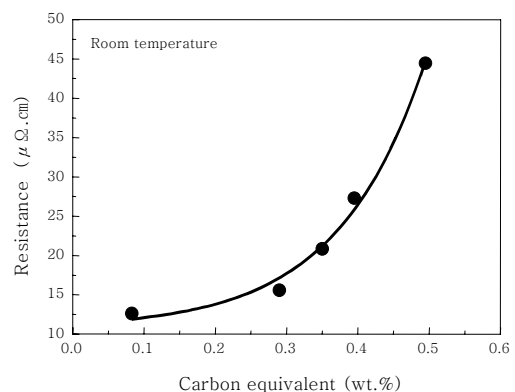


Fig. 1 Effect of carbon equivalent on bulk resistivity at room temperature

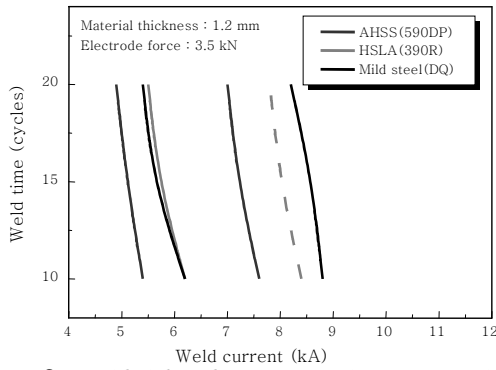


Fig. 2 Weld lobe diagram of AHSS, HSLA and Mild steel

아짐에 따라 하한전류 및 스패터 발생전류 모두 감소하며, 특히 하한전류의 감소 폭 대비 스패터 발생전류의 감소폭이 커지므로 Lobe 폭 또한 모재 강도가 증가함에 따라 감소하고 있다. 한편, 용접시간에 따라서는 모재 강도와 관계없이 용접전류가 용접시간이 증가함에 따라 저전류 측으로 이동하였다. AHSS의 높은 모재 고유저항으로 인하여 스패터 발생 민감도가 높기 때문에, 스패터 발생 현상을 줄이기 위해서는 높은 가압력과 낮은 용접전류가 요구된다.

한편, AHSS는 일반적으로 높은 탄소당량으로 인하여 일반 연강에 비하여 높은 경화능을 보인다. 강의 용접부는 화학조성과 냉각속도에 따라 생성되는 미세조직이 다르며, 이는 용접부의 기계적 성질에 큰 영향을 미친다. 그림 3은 용접방법 및 피용접재의 두께에 따른 용접부의 냉각속도를 수치해석을 통하여 계산한 결과로

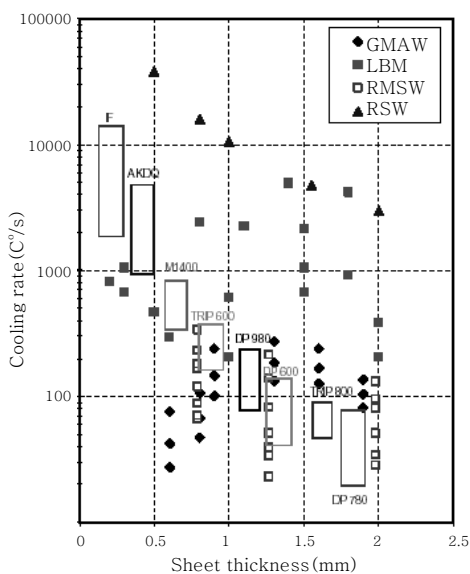


Fig. 3 Cooling rate with sheet thickness and welding process

Spot 용접이 약 5,000°C/sec 이상으로 타 용접법에 비해 냉각속도가 매우 큼을 알 수 있다. 이는 용접 과정에서 전극에 계속적으로 공급되는 냉각수와 판재가 접촉하고 있기 때문이다. 탄소함량이 높은 AHSS는 이와 같은 스폿 용접의 빠른 냉각속도로 인하여 그림 4와 같이 용접금속(너깃부)과 열영향부에는 거의 100%의 마르텐사이트가 생성되며, 따라서 그림 5에서 보듯이 연강이나 일반 고강도강 보다 높은 400 Hv 이상의 매우 높은 경도를 나타낸다. 높은 경도의 미세조직은 일반적으로 균열전파가 쉽게 일어나는 낮은 인성(Toughness)을 보인다.

그림 6은 탄소당량(Carbon Equivalent)이 증가함에 따라서 전단인장강도(TSS, Tensile Shear Strength)는 직선적으로 증가하지만, 십자인장강도(CTS, Cross Tension Strength)는 크게 증가하지 않는다. 따라서 스폿 용접부의 연성을 나타내는 지수인 연성비(CTS/TSS)가 탄소당량이 증가함에 따라서 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 일반 연강에서는 80% 이상의 연성비(Ductility ratio)를 보이지만, TRIP강과 같이 탄소당량이 높은 소재의 경우는 40% 이하로 연강의 절반 수준을 보이고 있다. 모재에 첨가된 C, Si, Mn 등의 합금원소에 의하여 용접부에는 경화조직이 형성되고, P 및 S 등에 의하여 입계가 취화된다. 따라서

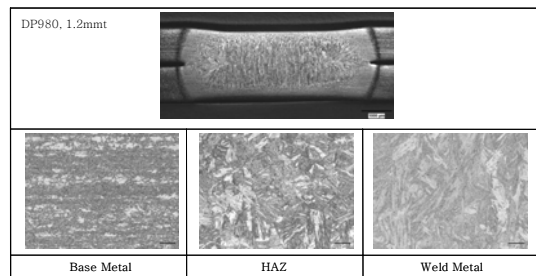


Fig. 4 Microstructure of DP980 spot weld

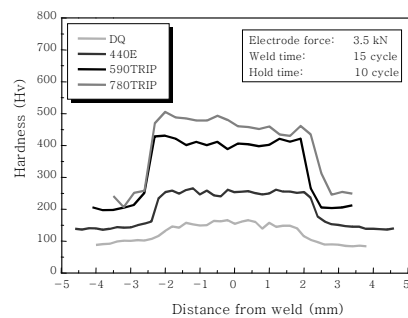


Fig. 5 Hardness distribution of spot welds

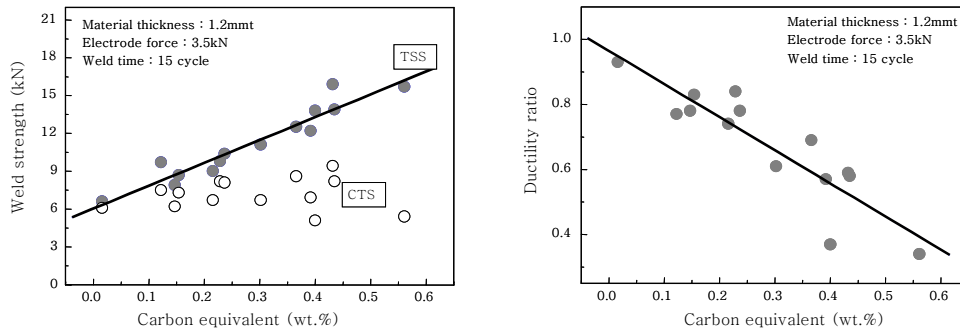


Fig. 6 Effect of carbon equivalent on weld strength and ductility ratio

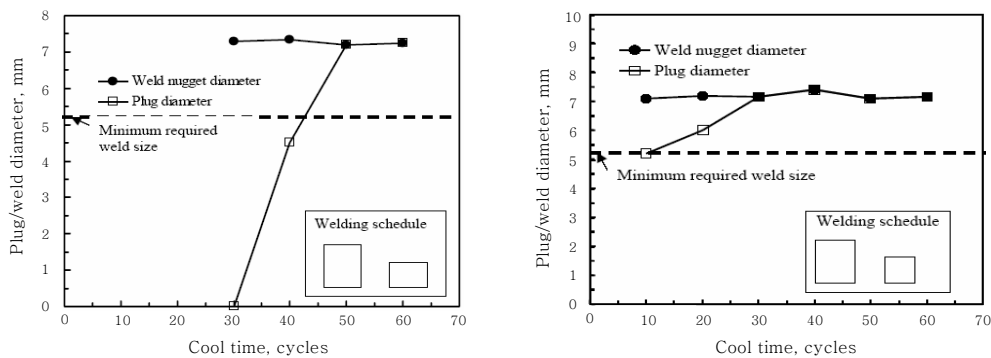


Fig. 7 Effect of post-weld tempering parameters on spot weldability

AHSS의 점용접부는 연강이나 일반 고강도강에 비하여 너깃내 파단, 즉 계면파단이나 부분계면파단이 쉽게 발생한다. 용접성을 확보하기 위하여 C, P, S 등의 화학성분을 규제하기도 한다³⁾. 그러나 합금성분의 규제를 통하여 용접부 취성을 방지하는 데는 한계가 있다.

AHSS의 용접부 취화를 용접공정 측면에서 감소시키기 위한 다양한 방법이 제안되고 있다. 그 대표적인 예가 그림 7의 Post-weld tempering^{4,6)}으로 본 용접이 끝나고 나서 일정 시간의 냉각시간이 경과한 후, 본 전류 보다 낮은 전류로 재통전하여 용접부를 템퍼링하여 용접부 취화를 개선시키는 방법으로, 템퍼링 시간이 증가함에 따라서 용접부 파단형태가 취성파단에서 모재파단으로 바뀌면서 연성비가 크게 향상되었다. 그러나 본 용접과 템퍼링 사이에 냉각시간이 최소 50 cycle과 30 사이클 이상의 템퍼링 시간이 추가됨에 따라서 총 용접시간이 크게 증가하여 실생산 라인에 적용하기에는 어려운 문제가 있다. 그래서 템퍼링 전류를 본 용접전류 보다 높게 하고, 템퍼링 시간을 5 사이클 내로 줄여서 하는 Spike tempering이라는 방법도 제안되었다⁷⁾.

한편, 실제 자동차 생산라인에서는 스폿 용접 후에도 도장 공정에서 소부(Baking) 과정을 거친다. 170℃, 20분가량의 도장 소부로 인하여 AHSS의 파단특성과

접합강도가 향상된다는 보고도 있다. 그림 8은 그 결과를 보여주는 것으로 모재 강도 600MPa 이상의 AHSS에서 소부에 의한 용접강도 특성이 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

AHSS의 아크 용접의 경우, 일반 연강에서와 유사한 방식으로 적용할 수 있다. AHSS의 용접부 강도는 모재강도가 증가할수록, 입열량이 적을수록 증가한다. 마르텐사이트상 분율이 상대적으로 높은 DP나 Martensite강은 열영향부의 경도가 모재 보다 낮은 HAZ 연화 현상

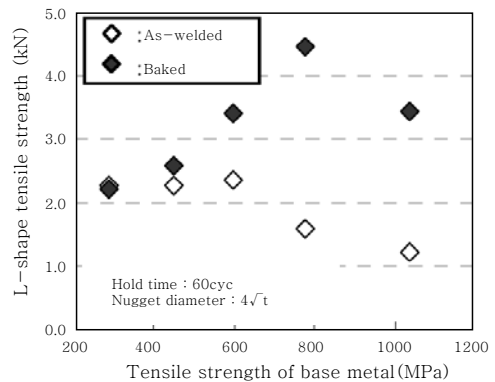


Fig. 8 Effect of the paint baking on peel strength

Table 1 Effect of filler wire strength in MAG welding of DP steels

Steel plate \ Filler wire	MIX-50 (490MPa)	MGS-63B (590MPa)	MGS-80 (780MPa)
590MPa	O [627]	O [633]	-
780MPa	X [713]	O [768]	O [775]
980MPa	X [801]	X [851]	O [960]

Fracture point : O : Base metal, X : Weld metal, [] : Tensile strength

이 생길 수 있다. 따라서 이들 강을 이용하여 구조설계 할 경우에는 HAZ 연화를 고려하여야 할 것이다. 한편, TRIP이나 CP강에서는 상대적으로 높은 합금원소량 때문에 HAZ 연화 현상이 나타나지 않는다. 780MPa급 이상의 AHSS강에 대해서는 고강도의 용접재료를 사용하는 것이 필요하다. 표 1은 590~ 980MPa급 DP강의 MAG 용접에서 490~780MPa급 용접재료를 사용하였을 때의 Lap 용접부 인장강도 특성을 보여주는 것으로, 780MPa 이상의 AHSS는 기존의 연강용 용접재료(490MPa)을 사용하였을 경우 모재 보다 낮은 인장강도를 보이며 용접금속에서 파단이 일어났다. 980MPa급 모재와 590MPa급 용접재료의 조합에서도 동일한 현상을 보였다⁹⁾.

2.2 표면처리강판의 용접 특성

고강도화와 함께 자동차용 철강재료 사용 패턴의 변화를 주도하고 있는 표면처리강판에 대한 용접기술에 대해서는 고강도강과는 다른 관점에서 보아야 할 것이다. 자동차용으로 가장 널리 사용되고 있는 아연도금강판의 스폿 용접성은 도금 부착량, 합금화도 등의 도금물성에 따라 조금씩 다르다. 그림 9는 DDQ 급의 아연도금강판의 Weld lobe를 비도금재, 즉 CR 강판과 비교한 예이다. 일반적으로 냉연강판(CR)에 비해 아연도금강판은 높은 용접전류가 요구된다. 도금 부착량이 많

고 순수한 아연도금 강판 일수록 Weld lobe는 높은 전류영역에서 형성된다.

표면처리강판의 용접에서 가장 중요하게 요구되는 특성이 전극수명이다. 동일한 용접조건에서 반복하여 연속적으로 용접을 하여도 용접부 특성이 저하되지 않고 일정한 품질 기준 이상을 만족하도록 하는 것은 용접생산성 측면에서 중요한 일이다. 연속 용접에 의한 전극의 마모 및 변형과 함께 도금층의 아연이 용접 중에 전극 표면에 부착되어 전극 손모를 가속시켜서 도금처리가 되지 않은 냉연강판에 비해 전극수명이 크게 감소된다. 전극수명 역시 도금물성에 의해 큰 차이를 보이고 있다. 일반적으로 도금 부착량이 많을수록, 합금화도가 낮을수록 전극수명이 감소하는 경향이 있다.

아연도금강판 중에서 GA 강판은 가격이 저렴하고 내식성과 용접성 등이 우수하기 때문에 국내 및 일본 자동차사에서 원가절감 측면에서 GA 강판을 선호하고 있으나 일반 냉연강판에 비하여 프레스 성형성이 떨어지고 전기도금강판에 비하여 도금층 밀착성이 나빠다는 결점이 있다. 성형성 개선을 위해 도금층 표면에 윤활물질을 도포 또는 코팅한 윤활 강판이 자동차사에 공급되고 있는데, 윤활 물질에 따라서 용접성의 차이가 있다. GA 윤활강판은 피막의 두께가 대부분 수십 나노의 극박이기 때문에 피막의 구성 물질이 절연체인 경우를 제외하고는 스폿 용접성을 크게 해치지 않으나 GA 강판 위에 Fe-Zn, Fe-P, Fe-Mn과 같은 합금을 전기도금법으로 3~5g/m² 코팅한 Flash강판이나 LM피막과 같이 순수 금속을 코팅한 경우가 용접성에서는 매우 유리하고 유기수지와 같이 전도도가 매우 낮은 물질이 코팅되어 있으면 용접성은 현저하게 나빠진다.

최근 AHSS를 포함한 고강도강의 아연도금강판의 적용이 증가함에 따라서 액상금속취화(Liquid Metal Embrittlement, LME) 현상이 문제가 되는 경우가 있다¹⁰⁾. 그림 10은 GA TRIP590강에서 LME가 발생한 예를 보여주는 것으로, 균열이 두께 중심부까지 진전되어서 접합 강도에 영향을 미칠 것으로 예상된다. LME는 과도한 전류, 전극 손상, 전극 정렬 불량 등에 의해 발생할 가능성이 높다.

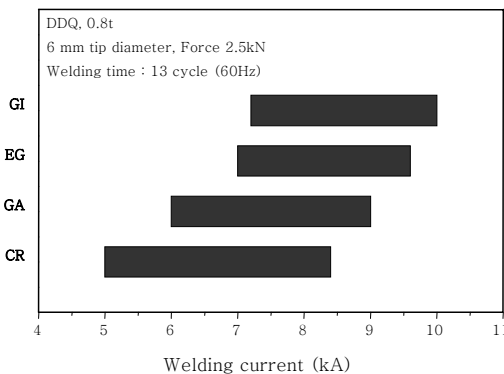


Fig. 9 Effect of Zinc coating type on weld lobe

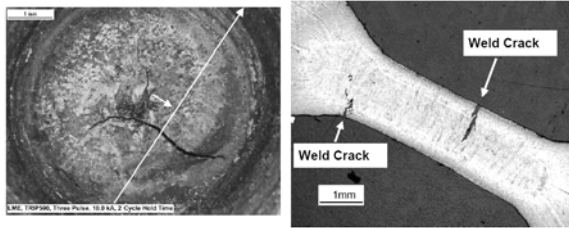


Fig. 10 Weld indentation and metallographic cross section of GA TRIP590 steel

한편, 아연도금강판의 아크 용접이나 레이저 용접에서 가장 주의해야 할 사항은 기공결함이다. 특히 겹침 이음부(Lap joint)의 용접시에는 판재 사이에서 발생하는 아연 증기가 외부로 빠져 나가지 못하고 용융금속 내에 포집되면서 많은 기공 결함을 발생시킨다. 그림 11는 HGI DP590강의 통상의 용접조건에서 실시한 MAG 용접부의 X선 비파괴 검사 사진과 단면사진을 보여주는 것으로 기공 결함이 상당한 것을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 용접시 발생한 아연 증기가 용이하게 빠져 나갈 수 있도록 이음부 설계를 해야 하지만, 그렇게 할 수 없는 경우에는 용접공정적으로 접근해야 한다. 예를 들어, 파형제어를 통하여 펄스 파형을 인가하여 용융지를 진동시키거나, 보호가스에 O₂를 혼합함으로써 승화점이 높은 산화아연(ZnO₂)을 생성시켜서 기공 발생을 억제할 수 있다. 그림 13은 아연도금강판의 MAG 용접시 기공 저감 방법별 효과를 정량화한 것으로서 용융지 진동(Molten pool vibration)

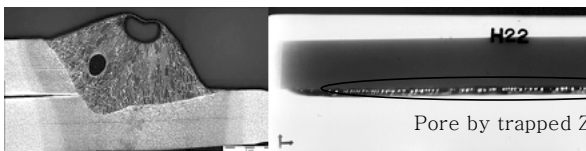


Fig. 11 Weld cross section and X-ray image for MAG weld of HGI DP590

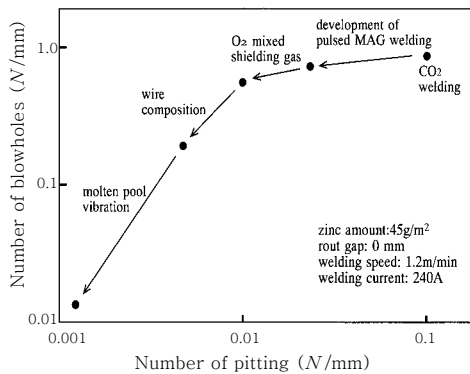


Fig. 12 Effect of countermeasures to porosity

방법이 가장 효과적인 것으로 보인다¹¹⁾.

3. 자동차 접합기술 동향

안전 및 환경에 대한 법규를 만족시키기 위해, 적용 소재의 변화뿐만 아니라 접합기술에도 큰 변화가 진행되고 있다. 차체의 강성 및 내구성 향상, 강재와 알루미늄과의 이중금속 접합, 스폿 용접이 불가능한 수지피복강판의 접합 등의 복합적인 이유로 하여 다양한 접합 방법이 다각적으로 검토 및 적용되고 있다. 표 2는 BIW 조립에 적용된 접합기술의 예로, 유럽 자동차 신규모델의 경우를 보여주고 있다. 기존의 스폿, MAG, 레이저 용접 외에 다양한 종류의 접착제를 이용한 본딩법, 볼트 체결 등의 기계적 접합법, 스티드 용접 등이 있다¹²⁾. 전반적으로 스폿 용접과 MAG 용접과 같은 전통적인 접합공정의 적용은 감소하는 추세이며, 레이저 용접과 접착제, 특히 구조용 접착제의 적용은 증가하는 경향을 보여주고 있다.

여러 가지 접합 공정 중에서 특히 접착제의 적용 증가가 두드러지게 나타나고 있다. 조사결과에 따르면 다른 유럽 자동차사의 최신 모델의 경우 차량당 194 m에 가까운 접착제 사용 실적을 보여주고 있다¹³⁾. 실제 구조용 접착제를 122 m 사용한 차체에 대해서 강성 평가를 한 결과, 굽힘 강성과 휨 강성이 각각 34%, 20% 향상 되어 약 7%의 경량화 효과를 얻을 수 있다는 보고가 있다¹⁴⁾. 강성 향상 및 경량화 이외에 접착제를 적용할 경우, 차체의 진동과 소음을 감소시킬 수 있는 장점도 있다. 접착제 단독으로도 많이 적용되고 있

Table 2 BIW Joining Technologies in European Car Model

Joining Methods	Unit	Latest model	Old model	Delta
Spot welds	(#)	4,337	4,799	-462
MAG weld doors	(m)	1.85	2.14	-0.29
MAG weld other	(m)	2.91	3.81	-0.90
Laser weld	(m)	9.95	3.56	6.39
Adhesive-epoxy	(m)	25.35	3.27	22.08
Adhesive-rubber	(m)	18.18	5.00	13.18
Hotmelt	(m)	15.20	38.82	23.62
Antiflutter	(m)	2.00	1.40	0.60
Weldstuds	(#)	195	241	-46
Weld nuts/bolts	(#)	33	72	-39
Bolts(mechanical)	(#)	78	76	2

지만, 보다 높은 접합부 정적, 동적 강도를 확보하기 위하여 Weld-bonding, Clinch-bonding 등의 하이브리드 본딩 (Hybrid bonding) 적용도 증가하고 있다.

지금까지 살펴본 접합법 외에 자동차 분야에는 활발히 적용되고 있지는 않지만, 타 산업분야에서 최근 주목하고 있는 접합법 중의 하나가 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)일 것이다. 자동차 분야에서는 FSW의 일종인 점접합의 FSSW((Friction Stir Spot Welding)가 스폿 용접을 대체 할 수 있을 것이라는 기대를 가지고 있다. 특히, Al 합금에 대한 접합 방법으로서 경제성과 생산성이 증명되어서 상용 적용되고 있는 예도 있다²⁾. 최근에는 스폿 용접에 의해 용접성 취성이 큰 AHSS 및 HPF(Hot press forming)강에 대해 FSSW적용에 대한 관심이 높아지고 있다¹⁵⁾. FSSW는 상대적으로 저입열의 고상접합 공정으로 용접부 취성을 크게 개선하는 것으로 발표되고 있으나, 툴 (Tool) 수명과 접합 후에 홀(hole)이 잔존하는 등의 철강소재에 대해 FSSW 양산 적용을 위해서는 아직 해결해야 할 과제가 많은 것으로 판단된다.

4. 맺 음 말

지금까지 최근 자동차용 소재로 사용이 급격히 늘어나고 있는 초고강도강 (AHSS)와 표면처리강판에 대한 자동차 조립에서의 주요 용접공정인 스폿 용접과 아크 용접 특성을 살펴보았다. 그리고 최근 다양한 소재 적용과 함께 자동차 접합기술도 크게 변화되고 있는 것을 확인하였다. 향후 강화된 환경 및 안전 규제 등의 요구 조건을 만족시키기 위해서는 소재의 고강도화 및 경량화가 지속적으로 진행될 것이며, 자연적으로 용접성이 나쁜 소재의 적용이 증가하게 되어서 용접 및 접합기술 발전이 더욱 필요로 하게 될 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. J. Hall : 50 Year Perspective of Automotive Engineering Body Materials and an Analysis of the Future, Great Design in Steel 2008, Detroit, Michigan, 2008

2. T. Gendo et al : Development of Spot Friction Welding, J. Japan Inst. Metals, **70-11** (2006), 870 (in Japanese)
3. H. Oikawa et al : Resistance Spot Weldability of High Strength Steel (HSS) Sheets for Automobile, NSC Technical Bulletin, **No. 385** 2006, 36 (in Japanese)
4. S. Shi and S. Westgate : Techniques for Improving the Weldability of TRIP Using Resistance Spot Welding, TWI report **No. 798**, 2004
5. L. Cretteur et al : Heat Treatments to Improve Weldability of New Multiphase High Strength Steels, Material Science Forum, **Vol 426-432** (2003), 1225
6. W. Chuko and J. Gould : Development of Appropriate Resistance Spot Welding Practice for Transformation-Hardened Steels, Welding Research Supplement 2002, 1-S
7. J. Gould : Progress on the development of welding AHSS, Great Design in Steel 2005, Detroit, Michigan, 2005
8. T. Okada et al : The Effect of Paint Baking Cycles on the Spot Weld Strength of AHSS and Consequences for Testing Procedures, Proceedings of the 8th International Welding Symposium, 2008
9. R. Suzuki and T. Nakano : Trends in MAG and MIG Welding Wire Related to Automobile Production, Kobe Steel Engineering Reports, **52-3** (2002),74 (in Japanese)
10. C. Jiang et al : Observations of Liquid Metal-Assisted Cracking in Resistance Spot Welds of Zinc-Coated Advanced High-Strength Steels, Sheet Metal Welding Conference XIII, 2008
11. H. Matsui : Technical Trends and Future Prospects of the Arc Welding in Chassis Parts, 제42회 철강심포지움, 2007
12. S. Nedic et al : The New Volvo XC60 Car Body, EuroCarBody 2008
13. 손중식 : 접착제 자동차 시장 관련 현황, 제3회 PNU-I FAM JRC 국제심포지움 (in Korean)
14. M. Mirdamadi and G. Korchnak : Great Automotive Designs Enabled By Advances in Adhesive Bonding, Great Design in Steel 2006, Detroit, Michigan, 2006
15. Y. Hovanski et al : Friction Stir Spot Welding of Hot-stamped Boron Steel, Scripta Materialia, **Vol 57** (2007), 873



- 최두열(崔斗烈)
- 1969년생
- POSCO기술연구원 자동차가공연구그룹
- 용접야금
- e-mail : ctoto88@posco.com



- 김영곤(金永坤)
- 1972년생
- POSCO기술연구원 자동차가공연구그룹
- 용접야금
- e-mail : ygkim1@posco.com