



고강도 자동차 차체 제조를 위한 용접과 접합기술

김영석¹ · 김유석¹ · 박기철² · 남재복² · 김태준³ · 이봉현⁴

1. 경북대학교 기계공학부, 2. 포스코
3. (주)화신, 4. 자동차부품연구원

Welding and Bonding Technology for Manufacturing High Strength Automotive Body

Y. S. Kim, Y. S. Kim, K. C. Park, J. B. Nam, T. J. Kim, B. H. Lee

1. Kyungpook National University(KNU), 2. Pohang Iron and Steel Company (POSCO),
3. Hwashin Company, 4. Korea Automotive Technology Institute (KATECH)

1. 서론

자동차 주행 중의 CO₂ 배출가스를 줄이기 위한 자동차의 경량화를 추구하면서 동시에 충돌 안전성을 확보하기 위해 저밀도 경량 소재 및 기가급의 고강도강판(giga strength steel)의 적재 사용, 그리고 통합적 일체형 경량 구조 설계기술이 도입되고 있다. 차체는 차량에서 가장 중량이 많이 나가는 요소로 전체 차량중량의 약 40%를 차지한다. 따라서 차량의 경량화는 매우 큰 효과를 제공한다. 다양한 경량 소재 중에서도 고강도강판은 기존의 철계 차체의 생산기술을 그대로 적용할 수 있기 때문에 매우 매력적인 수단으로 알려져 있다.

일반적으로 차량 공차중량이 100kg 이 줄어들면 km 당 5.0~12.5g 정도의 CO₂ 배출가스가 감소하는 것으로 알려져 있으며, 국내외 콤팩트 자동차 차체의 경우에 고강도강판의 사용 비중이 약 50~65%에 달하는 것으로 알려져 있다[1~5].

그러나 고강도강판의 프레스 가공 시에 파단과 스프링 백 등이 형상불량이 자주 발생하고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위한 수단으로 서보 프레스의 도입, 핫 스템핑 등과 같은 생산기술의 혁신과 더불어

어 사전에 불량발생 원인을 분석하고 대처하기 위한 유한요소해석기술이 널리 채용되는 추세에 있다. 저자들은 지난 3 회에 걸친 해설을 통해 지금까지 개발된 고강도강판들의 기계적특성, 프레스 성형특성 및 금형 소재의 특성을 분석하여 고강도강판의 프레스 최적 성형을 위한 요소기술들을 제시한 바 있다[6~8].

한편 프레스 성형된 부품들을 조립하여 차체를 구성하기 위한 용접공정에서도 많은 문제점이 대두되고 있다. 고강도강판은 합금원소성분이 많이 함유되어 있기 때문에 용접 저항이 커서 차체 내외 판넬의 스폿용접(점용접 또는 저항용접이라고도 불림) 시에 용접이 가능한 적정범위인 로브곡선(lobe curve, 가용 용접전류 구간을 의미)의 폭이 좁아 공정관리에 어려움이 있으며, 이에 따라 pulse GMAW 과 같은 새로운 용접기술의 도입과 용접공정의 최적화에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다[9, 10].

이번 호에서는 고강도강판의 다양한 용접특성에 대한 고찰과 용접불량 해결방안 그리고 차체의 성능향상을 위해 채용이 증가하고 있는 다중재료(multi-material)의 접합기술에 대한 최근의 기술동향에 대하여 기술한다.

Table 1 Alloy elements and optimal welding condition [14]

	Electrode Force (kN)	Current (kA)	Weld Time (cycles)	C	Mn	Mo	Cr	Si	C _{eq}
TRIP780	4.5	8	20	0.060	0.640	0.010	0.050	0.240	0.139
HSLA	3.5	9	20	0.130	1.599	0.013	0.029	0.120	0.363
DP780	5.5	9	15	0.100	1.523	0.196	0.197	0.157	0.326
DP600	3.5	8	20	0.113	2.082	0.181	0.239	0.036	0.427
590R	5.5	9	20	0.188	1.632	0.012	0.023	1.691	0.527

2. 고강도강판의 용접접합특성

2.1 고강도강판의 스폿용접 특성

자동차의 조립공정에서는 다양한 용접이 이용되고 있는데, 차체 부품의 경우에는 저항 스폿 용접(resistance spot welding, RSW), 레이저 용접(laser welding), 접착제 접합(adhesive bonding) 과 리벳팅(riveting)이, 샤시 부품의 경우에는 피복 아크 용접(shielded meta arc welding, SMAW) 등이 주로 사용되고 있다. 최근에는 이들 용접의 장점들을 조합한 하이브리드 접합기술(hybrid joining)과 전자기펄스 용접(magnetic pulse welding), 마찰교반 용접(friction stir welding, FSW) 등이 개발되어 이종재료의 접합에 응용되고 있다[11].

차체의 접합에 가장 널리 사용되고 있는 저항 스폿 용접은 Fig. 1(a)에 나타난 것 같이 상하전극(electrode) 사이에 접합시키려는 복수의 판재를 삽입하고 전극으로 일정한 압력을 가하면서 전류를 가하면 판재 사이에서의 저항발열에 의한 판재의 용융을 통해 판재들을 접합시키는 기술이다.

이 저항 스폿 용접의 경우에 두 전극, 접합할 판재 그리고 전극과 판재의 계면, 판재와 판재의 접촉면에서의 저항에 의해 발열이 일어나지만 판재와 판재의 접촉면에서의 접촉저항(contact resistance)이 가장 크기 때문에 판재 사이에서의 용융이 먼저 일어난다. 판재 사이에서의 용융이 발생하기 시작하면 판재 사이의 접촉저항은 급격하게 감소하는 반면 접합된 두 판재, 벌크 재료(bulk material)의 저항은 서서히 증가한다. 용접을 효율적으로 수행하기 위해서는 판재 사이에서의 발열을 최대로 하고 그 외 부분에서의 최소로 하는 것이 효과적이다.

고강도강판은 연질강판과 비교하면 첨가 합금성

분이 높기 때문에 열전도율이 낮고 모재의 전기저항이 커서 과도한 저항발열로 인해 비산(expulsion)이 발생하기 쉬운 특징이 있다. 따라서 용접전류를 낮추고 통전시간을 길게 하는 것이 바람직하다[12~14].

또한 고강도강판은 모재 강도가 높기 때문에 높은 가압력을 필요로 한다. 가압력이 충분하지 못하면 강판 사이의 밀착이 부족하여 접촉저항이 크게 증가하게 되고 이에 따라 너깃(nugget)이 충분히 성장하지 못하고 따라서 원하는 용접강도를 얻을 수 없게 된다(Fig. 1(a)).

예로 두께 1mm 인 300MPa 연질강판의 가압력이 $2.54kN \times t = 2.54kN$ 인 경우에 970MPa 급 고강도 강판의 가압력은 $2.54kN \times t \times \sqrt{(970/300)} = 4.4kN$ 이다.

차체 조립공정에 주로 사용되는 스폿 용접의 접합부 강도는 겹침용접 시편에 대한 전단실험(lap-shear test)에서의 인장전단강도(tension shear strength, TSS), 십자인장실험(cross-tensile test)에서의 십자인장강도(cross tension strength, CTS), L-자 인장실험에서의 L-자 인장강도(L-shape tension strength, LST), 겹침용접 시편에 대한 굽힘실험인 코오치 필 테스트(coach feel test)에서의 전단강도 등에 의해 평가된다. 이 실험과정에서 용접부의 파단형태는 버튼파단(button pullout failure 또는 matrix failure)과 계면파단(interfacial failure 또는 nugget failure)으로 양분된다. 이 중 계면파단은 용접판재 표면의 이상에 의한 용접불량이나 통전전류와 가압력 부족 등으로 인한 불완전한 너깃 생성에 의해 발생한다.

요구되는 용접강도를 만족하기 위해서는 용접부에서 버튼파단이 발생되도록 하는 것이 바람직하다. 주어진 판재두께에 대한 이상적인 너깃지름이 JIS Z-3140[Method of Inspection for Spot Weld, 1989]에 도표

로 정량화되어 있다. 이상적인 너깃지름이 결정되면 버튼과단시의 파단하중은 $P_f = t d \tau_f [kN]$ 로 결정된다. 여기서 τ_f 는 전단에서의 파괴응력이다.

Table 1에 대표적인 고강도강판에 대한 최적 용접 조건의 예를 나타내었다. 일반적으로 강판의 두께가 $t(mm)$ 인 경우에 용접시간(weld time)은 $10t+2(sec)$, 용접팁 전극직경(electrode diameter)은 $5t(mm)$, 가압력(electrode force)은 $2.45t(TS/300)^{1/2}(kN)$ 으로 설정한다. 여기서 TS는 용접할 재료의 인장강도이다.

Fig. 1(b)에 다양한 강판에 대해서 가압력을 고정 한 상태에서 용접시간 변화에 따라 임계 너깃지름(critical nugget diameter) $d = 5\sqrt{t}$ (KS B ISO14327) (t : 모재 두께)를 형성하는 용접전류를 나타내는 하한전류와 비산이 발생하는 상한전류를 보여주는 로브곡선을 나타내었다. 소재가 고강도화 할수록 하한전류 및 상한전류가 모두 감소하며 로브곡선의 폭도 감소함을 알 수 있다. 특히 하한전류의 감소 폭 대비 상한전류의 감소 폭이 더 커져 연결장 대비 로브곡선의 폭이 좁아지는 경향이 있다.

따라서 인버터 DC 스폿 용접 시 비산 발생을 줄이고 로브곡선의 폭을 증가시키기 위해 위해서는 통전 중의 전류제어와 가압제어기술(2 단 가압과 2 단 통전의 용접공정 혹은 펄스(pulse) 파형의 가압과 통전의 용접공정) 그리고 전극의 내마모성이 좋은 TiC 코팅 전극의 사용이 바람직한 것으로 보고되고 있다[10].

한편 스폿 용접의 경우는 냉각속도가 빨라서 탄소당량(C_{eq} : carbon equivalence, 용접부의 수소취성과 피 정도를 나타내는 인자로 사용됨)이 높은 AHSS 고강도강판은 너깃의 용융부(fusion zone, FZ)와 열영향부(heat affected zone, HAZ)에는 거의 100% 마르텐사이트 조직이 생성되어 Hv 400 이상의 높은 경도를 보인다. 참고로 강의 경우에 인장강도와 비커스 경도의 관계는 $TS \approx (Hv/3) * 9.8$ 로 주어진다(Fig. 2).

이런 높은 경도의 조직은 균열전파가 쉽게 일어나며 낮은 인성을 나타낸다. 용접부 취화를 감소시키기 위한 방법으로 용접 후에 본 전류보다 낮은 전류를 재 통전하여 용접부를 뜨임처리하는 방법이 제안되어 있고, 또한 스폿 용접 후에 차체 도장공정에서 소부과정(170°C, 20분)을 거치면서 용접부의 파단특성과 접합강도가 향상된다는 보고도 있다.

Fig. 3에 비산이 발생한 DP 강의 스폿 용접부에서

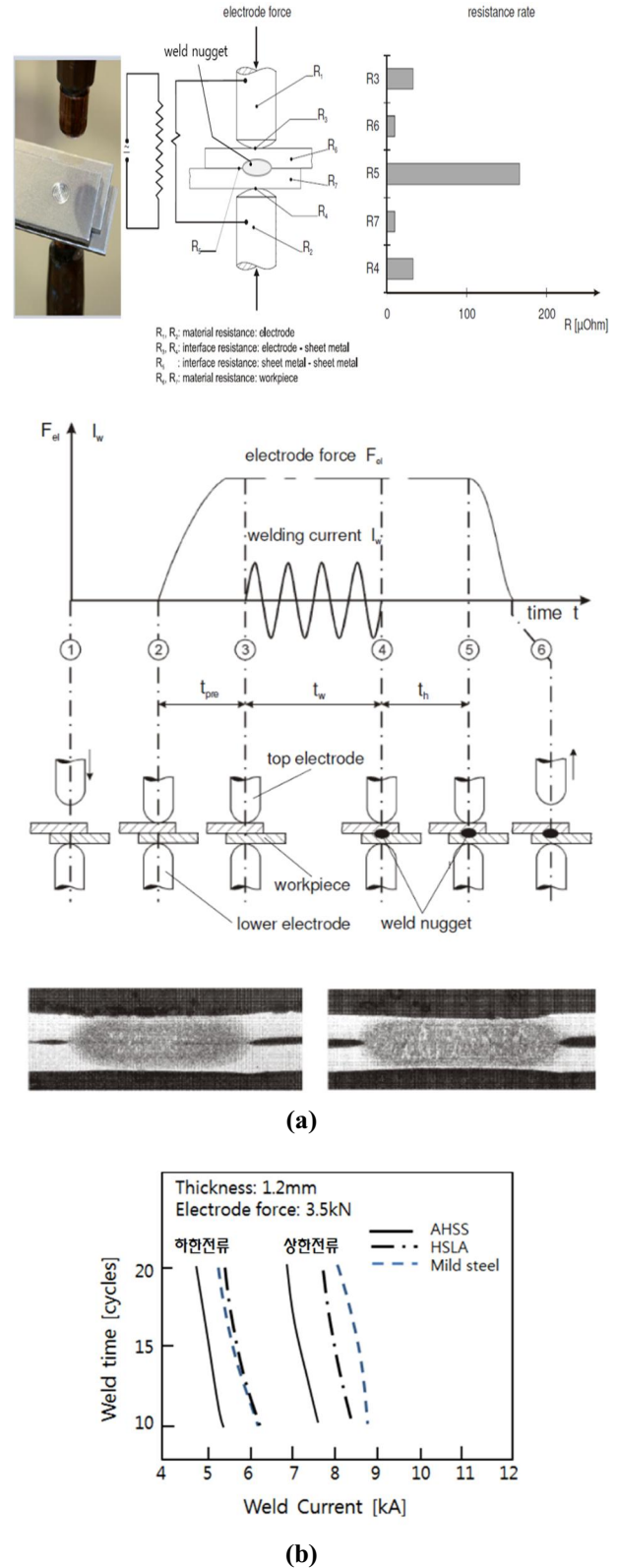


Fig. 1 (a) Schematic view of cross-section of a resistance spot welding [13], (b) Welding lobe curves for HSLA, AHSS and mild steel[11]

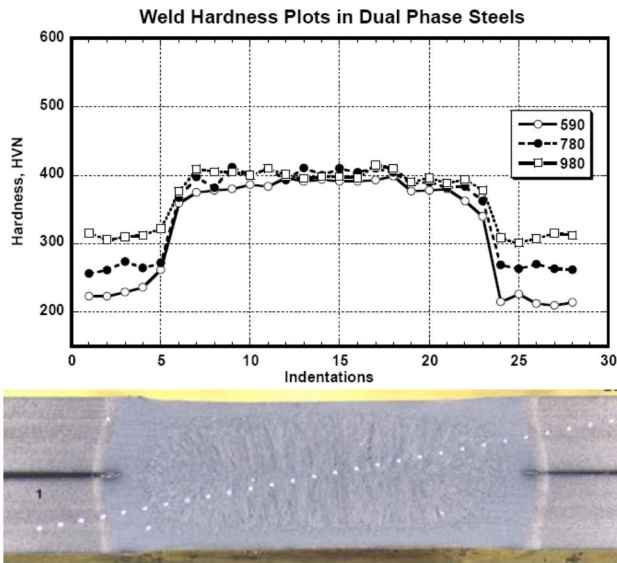


Fig. 2 Hardeness distribution of resistance spot weld of AHSS steel and microstructures of DP590 steel [14]

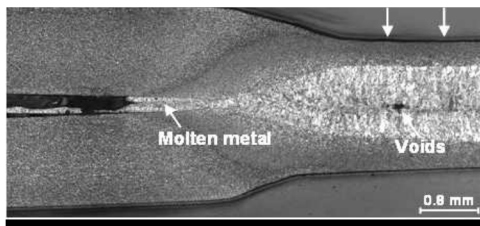


Fig. 3 Cross-section of resistance spot welds with expulsion [15]

의 광학현미경 단면 조직사진을 나타내었다. 사진에서 알 수 있듯이 용융금속이 너깃 밖으로 빠져나감에 따라 너깃의 중심부에 기공이 발생하고 압흔의 깊이가 상당히 깊게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 너깃의 중심부에 발생한 기공은 용접부의 결합력을 약하게 하여 계면파단의 원인이 되며, 이로 인해 접합부 강도 및 충돌안정성을 저하시킨다. 뿐만 아니라 용융금속의 소립자가 비산하면 제품의 표면에 용착된 스패터(spatter)를 남기고 이것이 표면 품질 불량 및 도장공정을 거친 제품의 부식원이 되므로 가능한 모두 제거하여야 한다.

통상 자동차 업체에서는 AWS D8.7의 규정에 따라 최소 압흔 깊이를 모재 두께의 30% 이하로 제한하고 있다.

Fig. 4(a)는 로브 구간 내에서의 버튼파단 시의 인

장전단강도를 나타낸다. TRIP780 강판을 제외하고는 재료의 강도가 증가할수록 인장전단하중이 증가하며 또한 인장전단하중은 버튼직경(button diameter)와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 고강도강일수록 인장전단강도(tensile shear strength, TSS)에 비해 십자인장강도(cross tensile strength, CTS)가 약하며 또한 TSS는 강판의 인장강도에 따라 증가하지만 CTS는 강판의 강도가 증가한다고 반드시 증가하는 것은 아닌 것을 알 수 있다.

특히 십자 인장 시에 너깃 내부에서 파단(계면파단)이 발생하면 CTS가 급격히 떨어진다. 특히 C와 P의 합금함량이 0.15%를 초과하는 고강도강판에서는 너깃 직경이 충분히 확보되지 않아 너깃 내부파단의 위험성이 더 높아진다고 알려져 있다.

Fig. 4(c)에는 두께 1.2mm의 TRIP1180 합금화 용융아연도금강판에 대한 용접 후 접합부의 강도를 평가한 결과이다. 전류조건 4.6~5.0KA 영역에서는 계면파단이, 5.2KA 이상에서는 버튼파단이 발생하고 있으나 모두 규격하중 8.68kN(KS B 0850) 이상의 용접강도를 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 용접전류의 증가에 따라 너깃 직경이 증가하고 더불어 용접강도도 증가한다는 것을 보였다. TRIP1180 강판의 경우에는 계면파단이 발생하였음에도 규격하중을 만족하고 있다. 따라서 고강도강판의 경우에는 용접강도만으로 용접의 양부를 판단하지 않고 경우에 따라서는 용접과피 실험에서의 흡수에너지(load carrying capacity)를 이용하여 판단하는 것이 바람직할 수도 있다.

Fig. 4(d)에 고강도 강판의 인장강도에 따른 연성비(ductility ratio, DR), $DR = CTS/TSS$, 과 탄소당량의 관계를 나타내었다. 인장강도가 증가할수록 전단변형 모드가 주인 TSS는 선형적으로 증가하나 박리변형 모드가 주인 CTS는 증가하다가 약 800MPa 근방에서부터 떨어지고 있음을 알 수 있다. 또한 DR은 탄소당량이 증가할 수록 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 한편 L-자 인장강도인 LTS는 TSS나 CTS와 비교하면 강판의 강도에 상관없이 체결강도가 낮다는 것이 보고되고 있다.

Fig. 5(a)에 다양한 조건의 용접실험으로 만들어진 부재의 충격실험에서 충격하중-변위곡선의 하부 면적으로 계산한 충격흡수에너지를 변형거리로 나눈 평균붕괴하중을 나타내었다. 일반적인 스폿용접 피치인 45mm의 경우와 비교하면 연속용접의 경우가

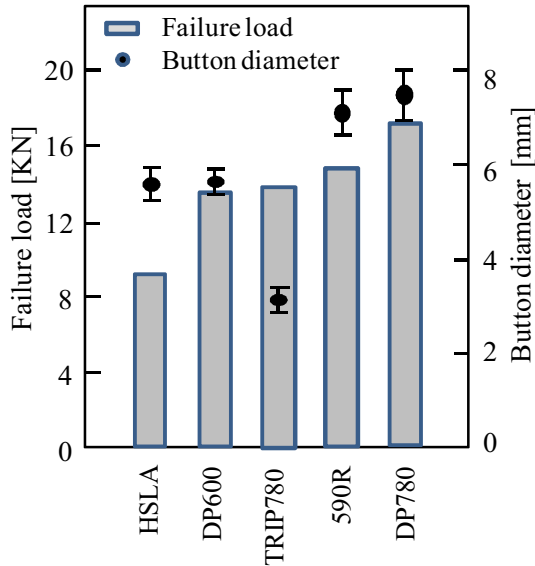
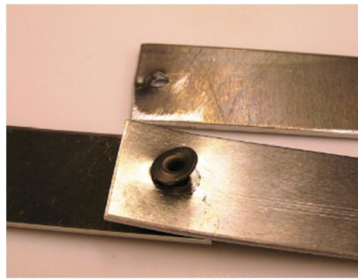


Fig. 4(a) Nugget pullout failure load in tension and button diameter for resistance spot welded high strength steels [16]

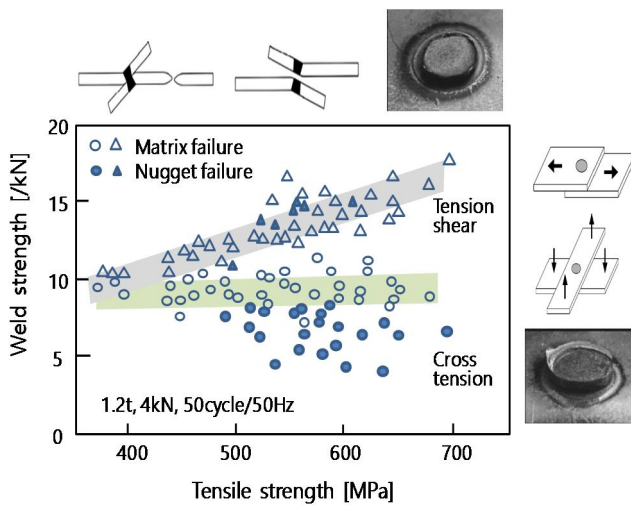


Fig. 4(b) Tension shear strength (TSS) and cross tension strength (CTS) for resistance spot welded high strength steels [17]

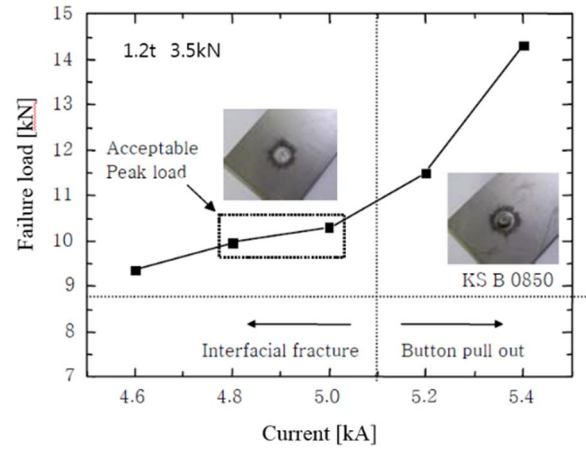


Fig. 4(c) Failure load as a function of the weld current of TRIP1180 steels in the tensile-shear test [18]

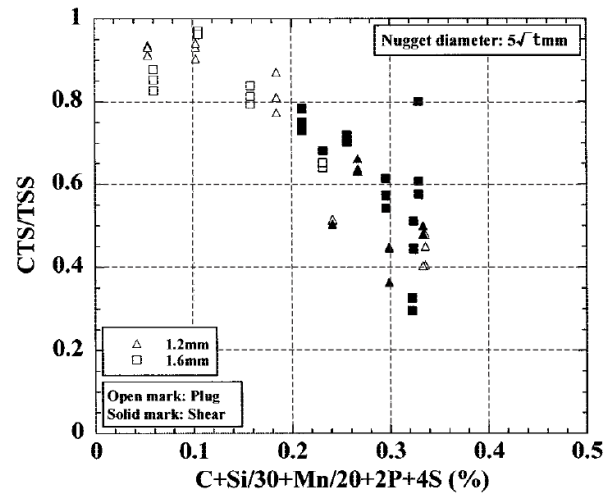
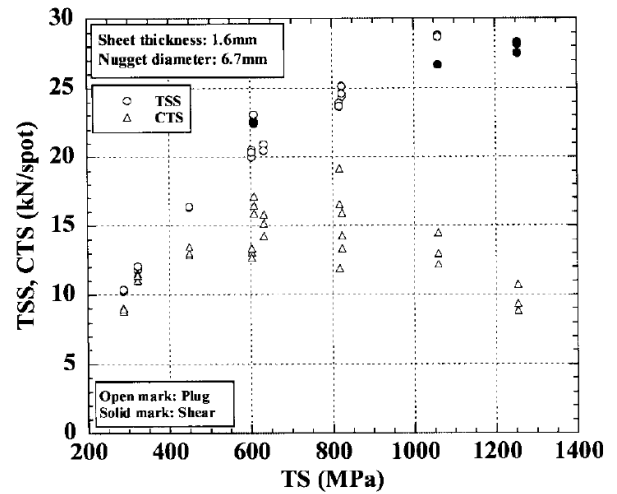


Fig. 4(d) Failure load-tensile strength curve and ductility ratio-carbon equivalent curve for high strength steel sheets [19]

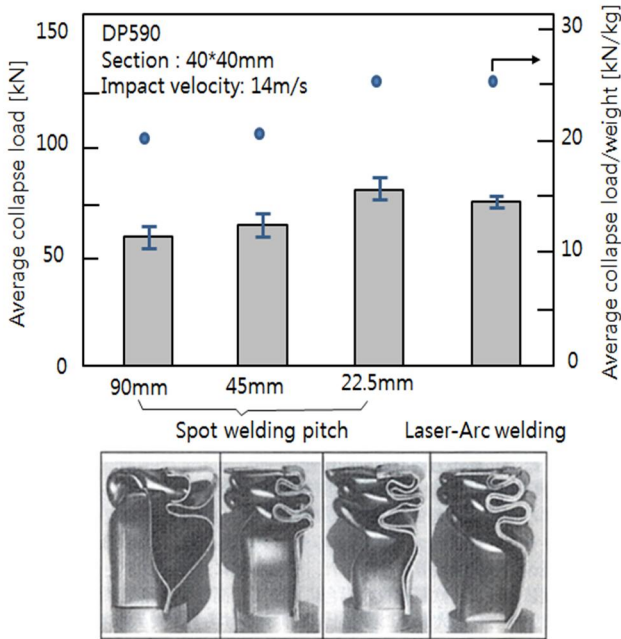


Fig. 5(a) Effect of resistance spot weld pitch and laser-arc welding on collapse load [10]

평균충격하중 및 효율(평균붕괴하중/중량)이 20% 정도 향상되는 것을 알 수 있다.

실제 조립된 차체의 고속충돌 실험에서 용접부위의 변형과 손상을 검토하는 것이 고안전 차체의 개발에서 중요한 이슈가 되고 있다. 고속변형에서의 용접부의 거동해석을 위한 재료물성의 DB 구축을 위해 10^3 /sec의 변형률 속도 하에서의 인장실험을 수행한 결과에 대한 가공경화식 모델이 다수 제안되어 있다.

최근에는 취성이 큰 고강도강판에 대해서 마찰교반용접(friction stir welding, FSW)의 일종인 마찰교반스폿용접(friction stir spot welding, FSSW)을 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

일반적인 스폿용접에서는 전류를 통전시간 동안 일정한 크기로 연속적으로 가하는 단일 펄스(single pulse)가 사용되지만 최근에는 단일 펄스의 경우보다 높은 전류를 단속적으로 가하는 복수 펄스(multiple pulse) 기술이 아연도금강판의 용접과 고강도강판의 용접에 널리 채용되고 있다(Fig. 5(b)).

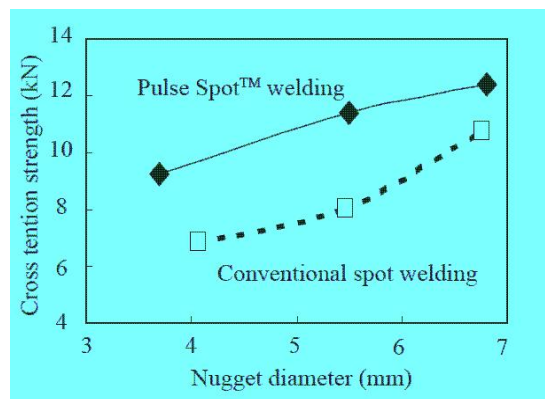
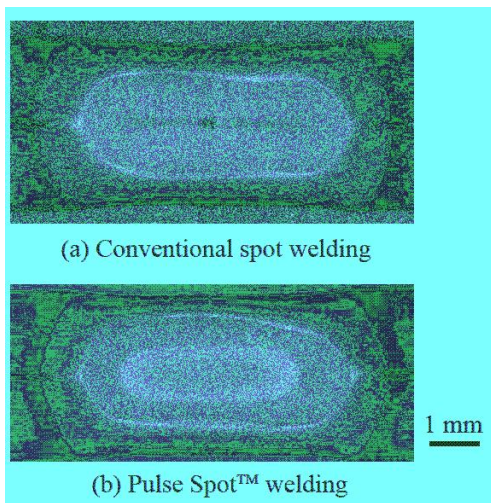
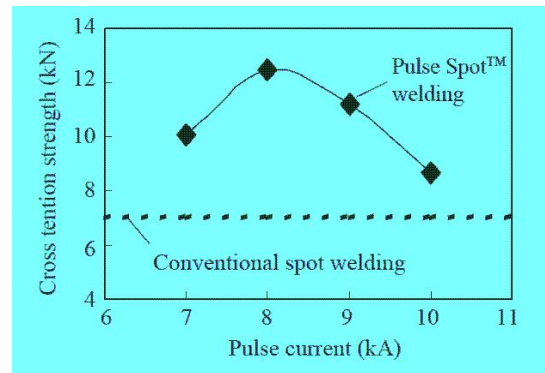
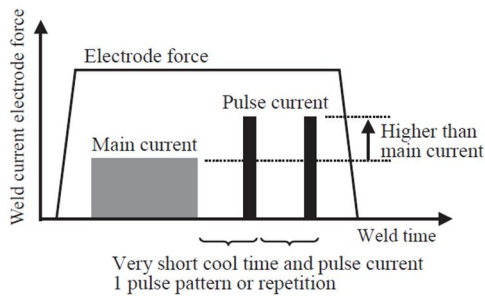


Fig. 5(b) Comparison of conventional spot welding and Pulse Spot™ welding [20]

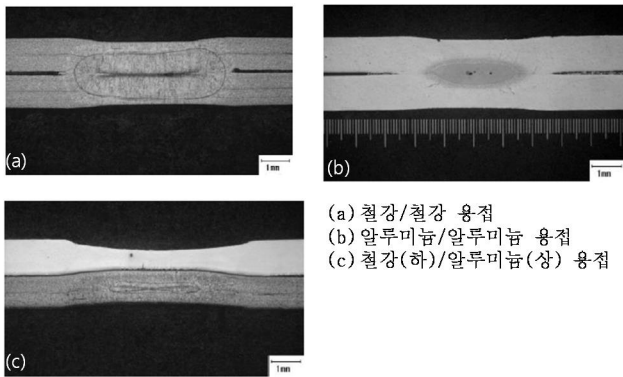


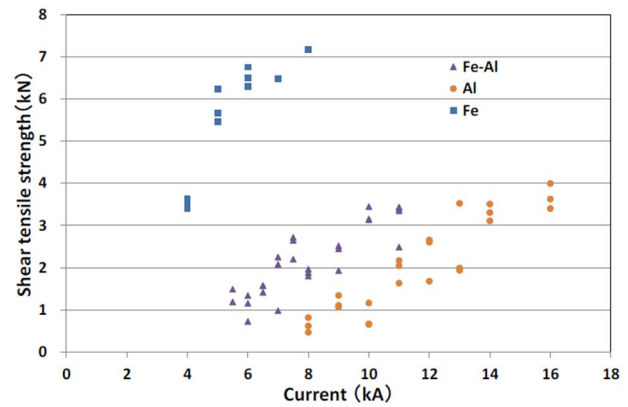
Fig. 6(a) Cross-section of joining area [21]

이 복수 펄스 용접에서는 너깃이 형성되기 전에 용접전극과 판재 사이에 있는 아연도금을 제거하는 것으로부터 용접전극의 수명을 높이며 또한 판재 계면 간에 존재하는 산화물과 오염물질을 제거한 후 용접하는 효과가 있는 것을 알려져 있다. 또한 그림에서와 같이 복수 펄스를 가하는 것에 의해 계면에서 넓고 온전한 너깃이 형성되고 따라서 CTS도 높다는 것을 알 수 있다.

최근에는 차체의 소재에 강도가 높은 고강도강판과 경량인 알루미늄 합금을 적재 적소에 사용한 다중재료화가 적극적으로 진행되고 있다. 그러나 철강과 알루미늄의 이종금속접합에서는 접합계면에 취성인 금속간 화합물이 생성되기 때문에 용접이 어려운 것으로 알려져 있다.

이를 해결하기 위한 수단으로 스폿용접에서는 두 재료 사이에 인서트 재료를 사용하거나 도금강판을 사용하는 방법이 제시되고 있다.

Fig. 6(a)에는 두께 1.2mm의 인장강도 280MPa의 강판과 인장강도 270MPa의 알루미늄 5182-O인 판재를 선단 직경이 6.0mm, 선단 반경이 R40mm의 DR형 Cr-Cu 전극을 이용하여 가압력 2.1kN, 통전 시간 8cycle, 용접전류를 4kA~11kA으로 하고 서보가압식 스폿용접기로 용접한 경우에 대한 용접부 단면 형상을 나타낸 것이다. 비교를 위하여 철강/철강 그리고 알루미늄/알루미늄의 접합 단면도 함께 나타내었다. 철강/철강과 알루미늄/알루미늄의 용접에서는 접합부의 중앙에서 용융 너깃이 형성되고 있다. 반면에 철강/알루미늄 용접에서는 알루미늄 쪽은 접합부에서 용융이 일어나고 있지만 철강 쪽에서는 판의 중심에서 용융 너깃이 형성되고 있음을 알 수 있다.



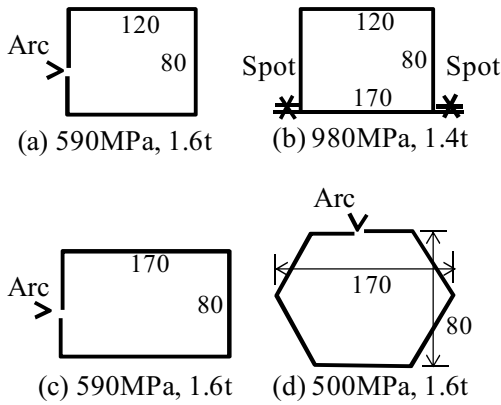


Fig. 7 Effect of part shape and welding method on 3-point bending stiffness and collapse capacities [10]

접(friction stir welding, FSW)의 일종인 마찰교반 스폿 용접(friction stir spot welding, FSSW)을 적용하려는 연구가 진행되고 있다.

참고로 단시간에 두 재료의 계면에서 용접 발열에 의해 용융이 일어나는 용접공정에서의 상변태와 용접변형 등의 가시화, 용접 공정설계 및 용접 불량 원인 등을 분석하기 위한 유한요소해석 SW로는 Simufact.welding(<http://mscsoftware.co.kr>)와 SYSWELD (www.esi-group.com) 가 자주 이용된다.

2.2 고강도강판의 아크용접 특성

차체 경량화를 위한 고강도강판의 채용은 판재의 두께 감소에 따라 차체 강성의 저하문제가 대두되며 따라서 제품의 형상을 유지하면서 강성을 확보하는 방법으로 용접기술을 이용하는 것이 효과적이다. 즉 일정한 용접 피치를 갖는 스폿 용접으로 제작되는 모자형 폐단면 구조 부품의 경우는 연속용접(Ar+ 20% CO₂ 혼합가스에 의한 아크용접 혹은 YAG 레이저-아크 하이브리드 용접)을 사용하고 플랜지부의 길이를 최소로 하는 폐단면 구조로 변경하거나 혹은 단면형상을 확대하는 것에 의해 구조 부품의 강성과 충격흡수에너지에 향상시킬 수 있다.

Fig. 7은 기존에 1.6mm 두께의 DP590 강판으로 구성된 120mm*80mm*170mm 크기의 모자형 채널(hat channel) 부품과 비교하여 단면형상 및 접합방식의 차이에 의한 3점 굽힘강성 및 충격에너지 흡수능력의 향상을 유한요소해석을 통해 비교한 것이다. 굽힘강성과 충격흡수에너지 향상은 (a)의 경우에 -8%, -20% (b)의 경우에 -24%, 42% (c)의 경우에 +13%, +3% (d)의 경우에 +10%, +12%이다.

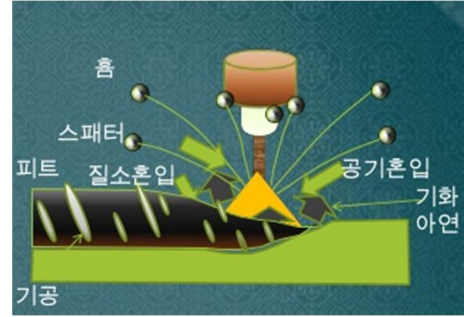


Fig. 8 Welding defects in gas metal arc welding (GMAW) of Zn-coated steel sheets

(주) 용접 기공결함 발생기구: CO₂ (보호가스)→ CO + O, Fe(모재) + O→FeO, FeO+C(모재)→Fe+CO(기공결함)
 (주) 용접와이어 중 탈산제 역할: FeO+Si→Fe+SiO₂ (슬래그)

Table 2 Effect of filler wire strength in MAG welding of DP steels [11]

Filler wire	MIX-50 (490MPa)	MGS-63B (590MPa)	MGS-80 (780MPa)
Steel sheet			
590MPa	OK(627)	OK(633)	-
780MPa	NO(713)	OK(768)	OK(775)
980MPa	NO(801)	NO(851)	OK(960)

Fracture point; OK-base metal, NO-weld metal, ()-tensile strength

참고로 Volkswagen 의 Golf V 의 경우는 차체 전체 용접길이의 45%를 레이저용접으로 하고 있으며 이로 인해 굽힘강성이 35%, 비틀림강성이 80% 증가하였다고 보고되고 있다. 레이저 용접의 도입은 비용 증가를 야기하며 또한 결합부의 갭을 0.2mm 이내로 관리해야 하는 등 엄격한 성형품질의 관리가 수반되어야 한다.

한편 상하 프레스 부품의 체결에 가스메탈 아크용접(Gas Metal Arc welding, GMAW)이 사용되고 있는 전방하부 제어암(front lower control arm, FLCA)과 같은 샤시 부품의 경우는 체결부의 피로특성 확보가 중요하다. 이때 용접부의 피로강도는 피로 크랙이 시작하는 용접비드 끝단 부에서의 응력집중 및 잔류응력에 의해 지배된다. 따라서 용접부를 그라인딩하여 매끈하게 하거나 용접비드 끝단부를 해머로 두드려(peening) 압축응력을 부여하는 방법이 현장에서 자주 사용되고 있다. 또한 아크-플라즈마 하이브리드 용접법을 채용하여 용접비드 끝단부 형상을 평활하게 하는 방법도 있다.

고강도강판의 용접부 강도는 모재 강도가 증가할수록 입열량(=용접전류×용접전압/용접속도)이 적을수록 증가한다. 고강도강판의 MAG 용접(차폐가스로 Ar +10~20% CO₂ 혼합가스 사용) 시에는 고강도강판에 적합한 용가제(filler wire material)를 사용하여야 한다.

Table 2 에는 고강도강판의 용접에 사용한 용가제의 종류에 따른 겹침 용접부의 인장강도를 나타낸다. 780MPa 이상의 고강도강판에 기존의 연강용 용가제(490MPa)를 사용한 경우에는 열영향부(Heat Affected Zone, HAZ)가 모재 보다 낮은 인장강도를 나타내며(HAZ 연화현상) 용접금속에서 파단이 일어난다.

마르텐사이트상 분율이 상대적으로 높은 DP 강판이나 MART 강판은 HAZ 연화 현상이 생길 수 있다. 이 HAZ 연화현상은 Ac₃ 점(약 910°C) 이하로 가열된 부분에서 경질조직이 풀림처리되기 때문에 발생한다. 반면에 TRIP 강판이나 CP 강판에서는 상대적으로 높은 합금원소량 때문에 HAZ 연화 현상이 나타나지 않는다.

아크용접의 경우에는 용융된 모재 및 용가제가 냉각되면서 오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로 변화가 일어날 때 약 4%의 체적팽창이 일어나는데, 이 체적변화가 국부적인 응력장을 형성하기 때문에 용접균열의 원인이 된다.

또한 용접부위에서는 상대적으로 포텐셜에너지가 높아 부식(corrosion)이 가장 먼저 발생한다.

한편 자동차용 차체의 부식을 억제하기 위해 최근 아연도금강판(Zn 용융온도 419°C, 비점온도 906°C)의 채용이 증가하고 있다. 아연도금강판은 아크용접 중의 높은 아크열로 인한 도금층의 손실에 의한 백화현상(efflorescence) 그리고 용접가스와 아연의 기화로 인한 아연가스에 의한 기공결함(blow hole)이나 피트(pit) 등의 용접불량이 자주 문제가 된다. 또한 아연가스는 자체가 용접아크를 불안정하게 하여 스파터와 흠 발생을 증가시킨다(Fig.8).

일반적으로 아연도금강판의 아크용접 시에는 도금 부착량이 증가할수록 하한전류와 상한전류가 상승하는데 상한전류의 최대값보다 하한전류의 증가값이 커서 적정 용접전류 범위는 감소한다. 아연도금강판의 GMAW 용접의 경우에 전압과 전류가 증가할수록 기공발생이 증가하는 경향이 있기 때문에 보호가스로 Ar+10% CO₂, Ar+ 5% O₂, Ar+ 10% O₂ 와 같이 적정 혼합 가스비를 유지하도록 추천하고 있다.

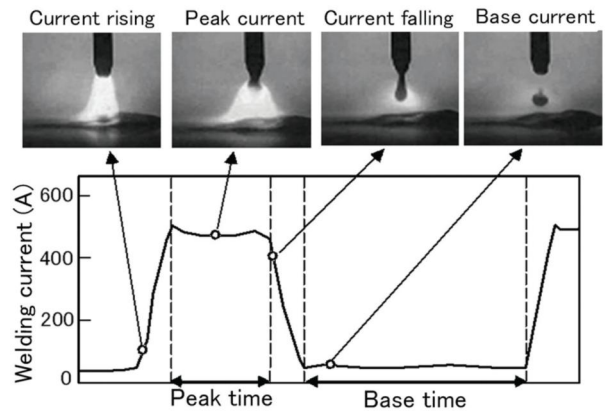


Fig. 9 (a) Droplet transfer phenomenon in pulsed MAG arc welding [22]

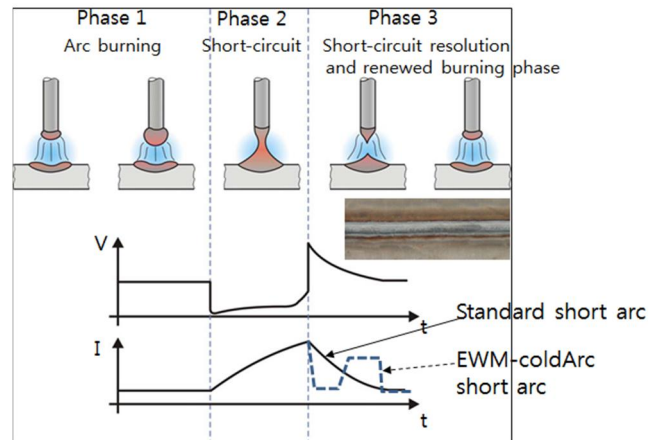


Fig. 9 (b) Material transfer (schematic), voltage and current in the coldArc processes [23]

우수한 부식저항이 요구되는 샤시 부품에 자주 사용되고 있는 아연도금된(Galvannealed, GA) 고강도강판의 아크 용접성의 확보를 위해서는 펄스 MAG 기술의 도입(Fig. 9(a))[22], CMT(cold metal transfer)-GMAW 혹은 coldArc 공정으로 알려진 저에너지 아크용접기술(low energy arc welding)(Fig. 9(b))[23]이나 Si 과 Mn 성분을 낮춘 GA 강판 전용 용접와이어의 개발(Fig.10) 등의 대책이 요구되고 있다.

FLCA 등의 차체 샤시 시스템에 사용되는 고강도도금강판의 용접부 부식에 대한 대책으로는 도금강판을 사용할 때는 용접공정 전에 미리 용접부의 아연층을 제거하거나 용접 후 제품을 아연과 얇은 알루미늄 조각의 혼합성분을 도포하는 아연막코팅(zinc flake coating, ISO 10683) 기술이 미국, 유럽 등에서 적용되고 있다[24].

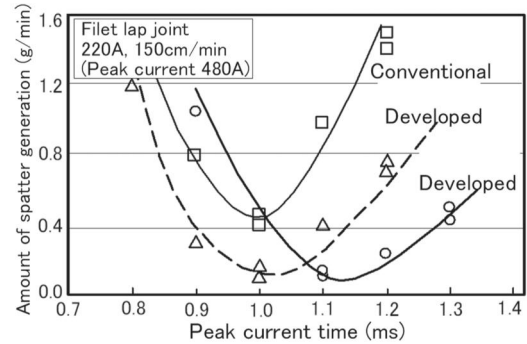
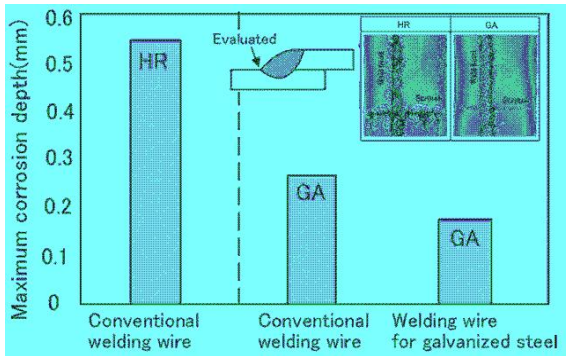


Fig.10 Droplet transfer phenomenon in pulsed MAG arc welding [24]

Table 3 Comparison of bonded joints for T6061 aluminum sheet [25]

	Rigid Epoxy	Rivet	Bolt	Spot Weld	Weld	Toughened Epoxy
Strength of Joint	840	920	1457	1700	3500	3768
Relative Weight	1.03	1.05	2.02	1.00	1.06	1.03
Specific Strength (strength/relative weight)	816	880	721	1761	3327	3658

통상 용접 금속 내에는 일반강재에 비해 수소량이 $10^3 \sim 10^4$ 배로 많이 존재하고 이 수소는 시간이 경과(응고가 진행됨)함에 따라 농도가 낮은 쪽으로 확산하여 간다. 따라서 어느 정도의 잠복기간을 거쳐 용접부에 가해지는 인장 잔류 응력에 따라 파단 강도가 낮은 용접부에서 수소취성 균열이 발생하기도 한다. 용접부의 수소취성은 특히 아연도금처리 고강도강판일 경우에 도금층에 존재하는 수소에 의해 더 많이 발생한다.

이러한 수소취성은 $-150^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 사이에서 일어나며, 실온보다 약간 낮은 온도에서 취화의 정도가 현저해진다고 보고되고 있다. 수소취성 크랙을 억제하기 위해서는 용접 후 약 2 시간 동안 250°C 로 가열하는 저수소 풀림처리(low hydrogen annealing)를 행하는 것이 바람직하다.

이상과 같이 AHSS 강판의 높은 합금성분과 높은 강도로 인해 일반 강판의 경우와 비교하면 용접성에서 차이가 있다. 따라서 자동차사들은 자체적으로 아크 안정성, 스파터, 비드형상, 입열량, 용입량, 결함발생, 용접기와 용접와이어 매칭 등을 최적화한 용접조건 및 평가기준을 제정하거나 국제 규격, ISO 18278-2, 을 채택하고 있으므로 참고하기 바란다. 또한 미국 자동차-철강사 파트너쉽 협회에서는 자동차

용 고강도강판의 용접조건에 대해서 다양한 평가를 수행하여 사용 가이드라인을 제시하고 있다[25]. 한편 국내에서도 한국생산기술연구원과 대한용접학회에서 자동차 강판의 용접기술에 대해서 지식공유형 플랫폼을 구축하고 있다[26].

이 플랫폼에서는 270MPa급 일반강으로부터 1180 MPa급 고강도강까지 다양한 소재(CR, 아연도금, 동종 및 이종소재, 이중두께 용접 등)에 대해서 최적 용접 조건에 대한 DB를 제공하고 있다. 상세한 내용은 뿌리기술 포털사이트(<http://www.root-tech.kr>)에서 확인할 수 있다. 예로 Fig. 11은 동 포털사이트에서 CR780DP 소재에 대한 CO₂ 아크용접에 대한 DB 결과이다.

한편 고강도강판과 경량소재인 알루미늄, 마그네슘 혹은 복합재료와의 이종재료 간의 접합기술로서 접합공정 중에 열원을 사용하지 않는 SPR(self-piercing rivet)이 널리 채용되고 있다. Fig. 12는 초고장력강인 SPFC440와 다이캐스팅 알루미늄 합금인 SILAFONT의 이종재료의 SPR 접합에 대한 실험과 유한요소해석 결과를 나타낸 것이다. SPR 접합된 시편의 접합강도를 조사하기 위한 전단실험에서 접합강도는 4,145N으로 평가되어 충분한 접합강도가 확보되고 있음을 보였다. 이 접합강도는 사용하는 판재의 강도가 높아짐에 따라 증가한다.

전류	50A	125A	200A	275A
속도				
0.5m/min				용락
1.0m/min	융합불량			
1.5m/min	융합불량	융합불량		

Fig.11 Cross section of arc welding of CR780DP steel [26]

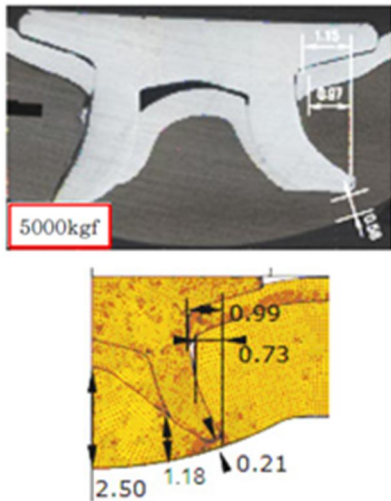


Fig.12 Analysis of simulated results and experimental ones of SPR joining [27]

2.3 고강도강판의 접착제에 의한 접합 특성

한편 최근에는 차량의 안전성 확보는 기본이고 동시에 차량성능 향상에 대한 요구가 높아지고 있다. 즉, 차량의 정적/동적 강성을 높여 주행과 조향 성능을 개선하고, 소음과 진동을 줄이고 또한 차량의 수명과 장기적 가치를 높여주기 혁신기술들에 대한 관심이 높아지고 있다.

이에 경량소재인 알루미늄, 플라스틱, 복합재료 등의 채용이 증가하고 있어 기존의 스폿용접이나 아크용접과 비교하여 차량의 강성증가와 소음감소 효과가 뛰어난 구조용 접착제(structural adhesive)에 의한 친환경 동종 및 이종접합(서로 다른 피착면이 화학적, 물리적 힘에 의해 일체화 된 상태로 정의함)이 점증하고 있는 추세이다. 구조용 접착제는 일반적으로 다음과 같은 특성을 제공한다고 알려져 있다. (1) 정적 강성이 8~15% 증가한다. (2) 동적 강성이 2~3Hz 증가한다. (3) 결합 내구성이 100~10000% 증가한다.

이외에도 용접공정과 비교하면 접착공정은 용접



Fig.13 Potential application areas of bonded hybrid composites [28]

Table 4 Mechanical properties of structural adhesive bond [29]

Property	Crash Durable Epoxy Adhesives	Flexible Epoxy Adhesives
E-modulus [MPa]	1500	400
Elongation at break [%]	20	40
Impact peel strength [N/mm]	32	48
Edge shear strength [MPa]	23	15.4

공정에서 요구되는 높은 에너지 투입, 용접열에 의한 재료의 연화 및 뒤틀림 변형 그리고 후처리 과정이 필요하지 않는 장점이 있다. Table 3에 체결종류에 따른 접합강도, 비중량, 비강도를 나타내었다.

구조용 접착제는 크게 (1) 코팅되지 않은 금속의 접합에 사용되는 에폭시 기반의 구조용 접착제와 (2) 복합재료의 접합에 사용되는 폴리우레탄 기반의 구조용 접착제(2K-PU)로 대별된다. 에폭시 접착제는 오일 흡수력, 내구성 및 다양한 온도범위에서 우수한 기계적특성을 보인다. 차량의 충돌부재에는 특수 내충격 에폭시 구조용접착제(crash durable adhesives, CDA)를 국부적으로 적용한다. 이 CDA는 특히 아연 도금된 강판의 접착에 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 최근에는 -40°C의 저온에서 충격박리강도 손실이 현저히 적은 차세대 접착제가 개발되어 초고강도 강에 적용되고 있다.

한편 폴리우레탄 접착제는 신장률이 높을 때 고강도 및 고강성을 나타내며 우수한 충격, 피로특성을

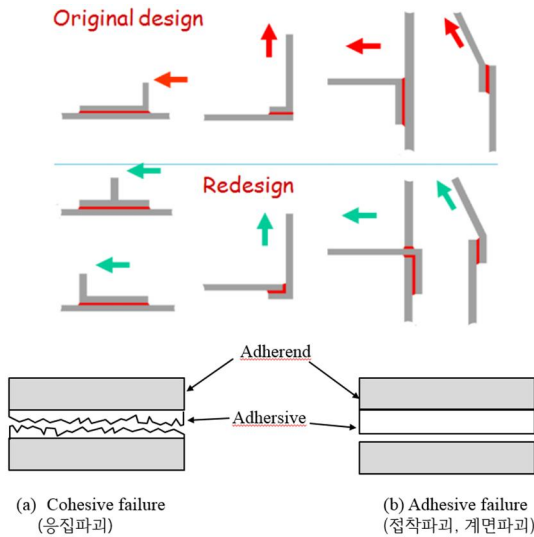


Fig.14 Examples of joint redesign to put the adhesive bond in the preferred modes [29]



Fig.15 Life module of BMW i3 model

보인다.

특히 철강-알루미늄, 플라스틱-철강, 탄소섬유강화 폴리머 (CFRP)복합재료-철강, 폼재(foam material)등의 다종재료의 접합에 매우 유용한 것으로 알려져 있다.

Audi, Benz, GM 등에서는 실런트(sealant)를 포함하여 에폭시와 폴리우레탄 기반 차체 구조용 접착제가 승용차를 기준으로 약 100m (15kg) 정도가 사용되고 있으며, 2015 년 현대자동차 제네시스 모델의 경우는 약 123m 가 사용된 것으로 알려져 있고 향후 점차 그 사용량이 증가추세에 있다.

구조용 접착제는 95% 이상이 열경화성 에폭시를 기반으로 하고 있다. 충돌에 저항해야 하는 구조부에는 높은 영률을 갖는 반면 차체 판넬과 같이 외관이 중요한 부위에는 접합라인 리드 스루(bond-line read through, BLRT, 접합주름을 의미함)가 적은 낮은 영률의 유연성이 우수한 에폭시 접착제가 사용된다. Fig. 13 은 실제 차량에 구조용 접착제가 적용된 부위를 나타낸 예이다[28].

Table 4 에 Dow Automotive System 에서 개발한 CDA

와 유연성이 우수한 접합제의 특성을 나타내었다.

일반적으로 구조용 접착제는 전단 및 인장 모드(특히 압축)에서 가장 강하고 접합의 모든 힘이 분리 선단에 집중되어 있는 박리와 벽계파괴에는 약하다. 따라서 전단력과 인장력이 우세한 접합부를 갖도록 설계하는 것이 바람직하다. Fig. 14는 최대 접착 강도를 위한 접합부 재 설계의 몇 가지 예를 보여준다.

접착제에 의한 접합은 아직까지 접합부의 성능(강도, 내구)을 유지할 수 있는 사용가능 온도범위의 제한, 시간에 따른 성능의 열화, 긴 경화시간(통상 수분이 요구됨), 접합표면 및 공정품질에 따른 접합 성능의 변화 등의 일부 문제점들을 내포하고 있다.

하지만 최근 사용온도에 무관하고 노화성능 및 접착시간이 크게 개선된 고성능 차세대 접합제의 개발과 탄소섬유 복합재료(CFRP)로 이루어진 BMW 사의 i3 모델 라이프 모듈(Fig.15)에 사용한 weld bond 등과 같이 기존의 접합기술과 접착제를 함께 사용하는 하이브리드 접합기술(hybrid joint)의 진보에 의해 점차 그 사용이 늘어날 것으로 전망된다[28, 30~32].

3. 결론

본 기술해설 논문에서는 고강도강판의 용접과 접합기술을 파악하고 관련 선진 연구동향을 정리하였다. 자동차 업체 및 부품업체의 기술자들과 관련 연구자들은 본 해설에서 다룬 용접과 접합기술에 관한 최근의 정보들을 고품위의 고강도 자동차 부품을 제조하는데 활용할 수 있을 것이다. 국제철강협회에서는 첨단 고강도강판의 사용지침을 제시하고 있으므로 참고하면 도움이 될 것으로 생각된다[33].

후기

본 기술해설 논문은 ㈜화신의 기술지원과 산업통산자원부 산업기술거점기관지원사업(대구튜닝지원센터, R0003356) 성과물으로써 관계자 여러분께 감사 드립니다.

REFERENCES

[1] E. Billur, M. S, T. Altan, Challenges in Forming Advanced High Strength Steels, <http://nsmwww.eng.ohio-state.edu/634.pdf>

- [2] www.theicct.org, 2014, EU CO2 Emission Standards for Passenger Cars and Light-commercial Vehicle, International Council on Clena Transportation.
- [3] L.W. Cheah, 2010, Cars on a Diet: The Material and Energy Impact of Passenger Vehicle Weight Reduction in the U.S., Ph.D thesis, MIT 2010.
- [4] R. Balzer, LCA in the Automotive Sector, www.worldautosteel.org.
- [5] J. B. Nam, 2013, Development of New Auto Steels and Application Technology, China Automotive Steel Conference, World Steel/CISA.
- [6] Y. S. Kim, S. H. Yang, S. H. Oh, J. B. Nam, 2013, Mechanical Properties of High Strength Steel Sheets and Its Usage for Lightweight Vehicles, Trans. Mater. Process., Vol.23, No.5, pp. 323~334.
- [7] Y. S. Kim, C. I. Kim, J. B. Nam, S. H. Yang, 2014, Press Forming Characteristics and Recent Forming Technologies of High Strength Steel Sheet, Trans. Mater. Process., Vol.23, No.7, pp. 453~464.
- [8] Y. S. K, G. C. Park, J. B. Nam, B. H Lee, 2015, Die Materials and Their Wear Evaluation for Press Forming of High Strength Steels, Trans. Mater. Process., Vol.24, No.2, pp. 138~146.
- [9] http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/en/490_SSAB_Automotive_final.pdf
- [10] A. Yoshitake, K. Yasuda, 2011, Vision of Application Technologies for High Strength Steel Sheets Supporting Automobile Weight Reduction, J. Japan Soc. Tech. Plasticity, Vol.52, No.606, pp. 766~771.
- [11] D. Y. Choi, Y. G. Kim, 2009, Trend of Joining Technology for Automotive Sheet Steels, J. Korean Weld. Join. Soc., Vol. 27, No.2, pp. 125~130.
- [12] T. K. Han, K. Y. Lee, J. S. Kim, 2009, Recent Development and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications, J. Korean Weld. Join. Soc., Vol.27, No.2, pp. 131~136.
- [13] H. Zhang, J. Senkara, Resistance Welding, Fundamentals and Applications, Talor & Francis, New York, 2006]
- [14] M. I. Khan, 2007, Spot Welding of Advanced High Strength Steels, Master Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [15] J. P. Kong, C. Y. Kang, 2011, Expulsion of Electric Resistance Spot Welding in Advanced High Strength Steels for Automobile, J. Korean Weld. Join. Soc., Vol.29, No.6, pp. 646~652.
- [16] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro, Y.Zhou, 2008, Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels. Materials Trans., Vol. 49, No.7, pp. 1629~1637.
- [17] 占部俊明, 細谷珪弘, 2005, Current Status and Prospective of Automotive High Strength Steel Sheets, J. Japan Soc. Tech Plasticity, Vol.46, No.534, pp. 560~564.
- [18] S. S. Park, Y. M. Choi, D. G. Nam, Y. S. Kim, J. H. Yu, Y. D. Park, 2008, Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 1180 Steels, J. Weld. Joining, Vol. 26, No. 6, pp. 81~91.
- [19] H. Oikawa, G. Murayama, T. Sakiyama, Y. Takahashi, T. Ishikawa, 2007, Resistance spot weldability of high strength steel(HSS) sheets for automobiles, Nippon Steel Technical Report, No. 95
- [20] M. Muneo, T. Koichi, O. Kenji, 2013, Development of next generation resistance spot welding technologies contributing to auto body weight reduction, Nippon Steel Technical Report, No. 18.
- [21] Y. Hirose, K. Niita, S. Nishino, S. Yoshikawa, 2017, Joining mechanism on spot-welding of dissimilar metal and evaluation of joining strength, 2017 Spring Conference, Japan Society of Automotive Engineering, No. 20175082.
- [22] S. Kodama, Y. Ishida, S. Furusako, M. Saito, Y. Miyazaki, T. Nose, 2013, Arc Welding Technology for Automotive Steel Sheets, Nippon Steel Technical Report, Vol.103, pp. 83~90.
- [23] <http://www.ewm-sales.co.uk/>
- [24] http://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_flake_coating
- [25] <http://www.a-sp.org>, Advanced High-Strength Steel (AHSS) Weld Performance Study for Auto-Body Structure Components.
- [26] S. M. Bae, C. H. Kim, S. H. Son, Y. M. Heo, G. S. Yoon, M. J. Kang, 2011, Development of Knowledge Sharing Platform for Welding Technology for the Automotive Industry, J. Korean Weld. Join. Soc., Vol.29, No.5, pp. 11~15.

- [27] D. Kim, Y. Qiu, H. Y. Cho, 2015, Design of Self-Piercing Rivet to Joint in Advanced High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets, J. Weld. Joining, Vol. 33, No. 3, pp. 75~80.
- [28] 3M's Structural Two-Part Epoxy Adhesive Performance vs. Mechanical Fasteners, 3M.
- [29] http://www.dowautomotive.com/pdfs/structural_adhesives_broucher.pdf
- [30] K. Y. Kang, J. M. Lee, 2012, Experimental Study on Evaluation of Bond Strength of Adhesively Bonded Joints by Adhesive, J. Korean Weld. Join. Soc., Vol.30, No.6, pp. 62~67.
- [31] M. M. Abdel Wahab, 2012, Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A review, ISRN material Science Vol. 2012, pp. 1~25.
- [32] 박지성, 김진봉, 문진범, 장홍규, 윤순호, 2016, 미래 자동차용 다중소재 경량차체 구조기술, 기계와 재료, Vol.28, No.2, pp. 42~57.
- [33] <http://www.worldautosteel.org/projects/ahss-guidelines>