

# 자동차용 첨단 고강도강의 개발 동향 및 용접성

한태교·이규영·김종상

## Recent Developments and Weldability of Advanced High Strength Steels for Automotive Applications

Tae-Kyo Han, Kyoo-Young Lee and Jong-Sang Kim

### 1. 서론

자동차용 소재로는 크게 철강, 비철금속, 비금속 등으로 구분된다. 자동차산업에서 환경문제가 사회적 이슈로 대두되자, 경량화가 시대적 요구사항이 되면서 알루미늄, 마그네슘, 플라스틱 등의 경량소재 사용이 증가하고 있지만, 현재까지 가격, 강도, 내식성, 성형성 등 철강소재 대비 개선되어야 할 숙제가 많은 것이 사실이다. 경량화라는 시대적 요구가 강조되는 한편, 승객 및 보행자의 안전규제 또한 점진적으로 강화되면서, 자동차 차체 무게는 각종 안전 및 편의장치 부착으로 인해 무거워지는 모순에 빠지게 된다. 이 상반된 모순의 재료측면의 해결책은 강도 및 성형성이 우수한 AHSS (Advanced High Strength Steel)을 채용함에 의하여 두께를 낮추어 경량화하는 방안이다.

현재 자동차 차체에는 일반강에서 AHSS까지 다양한 강종들이 적용되고 있으며, 경량화를 위해 더욱 선진화된 AHSS 강종을 적용하기 위해 철강업체들의 연구 개발이 가속화되고 있다. Fig. 1에 자동차용 강종개발 경향을 알아보기 쉽게 인장강도(Tensile Strength, TS)-연신율(Elongation, El) balance를 해당 강종과 함께 나타내었다. 강도가 낮은 경우에는 보통 연신율이 높으며, 강도가 증가함에 따라 연신율이 감소하는 경향을 보이는데, 이러한 강도와 연신율의 균형이 바나나(banana) 모양의 형태로 나타나므로 이러한 그림을 Banana-Diagram으로 부른다. Fig. 1에서 바나나 모양의 형태를 띄고 있는 강종군이 3개로 구분되어 있음을 볼 수 있다. 가장 아래쪽에 위치한 강종군은 TS x El 조합이 25,000MPa·%보다 작은 값을 갖는 강종들로서 여기에는 Mild(연질)강, IF(Interstitial Free)강, 고강도 IF강, BH(Bake Hardening)강, HSLA(High Strength Low Alloy)강과 일반 AHSS 등이 있다. 일반 AHSS에는 DP(Dual Phase)강과 TRIP

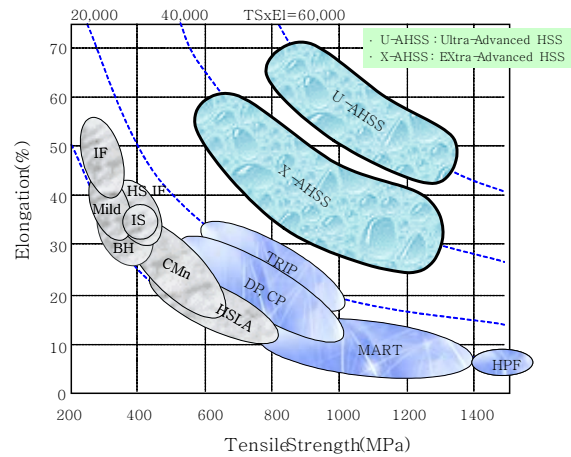


Fig. 1 Relationship between tensile strength and elongation of various steel grades

(Transformation Induced Plasticity)강, CP(Complex Phase)강이 현재 상용화되어 있다. 일반적인 AHSS이 외에 초고강도를 만족시키기 위하여 개발된 MART(MARTensitic)강과 HPF(Hot Press Forming)강이 고강도-저연신형 형태로 바나나 곡선의 오른쪽 부분을 차지하고 있다. Banana diagram의 윗부분에 위치한 2개의 강종군 즉, X(eXtra)-AHSS와 U(Ultra)-AHSS는 TS x El balance가 매우 높은 값을 가짐으로써, 현재의 연질강, HSLA, AHSS 등을 대체하여 경량화에 기여할 차세대 자동차용 제품으로 기대된다.

한편, 차체 혹은 사시 부분에 강판을 적용하기 위해서는 각 부품의 조립이 필수적이며, 조립 방법으로는 크게 용접(welding), 접착(adhesive bonding), 기계적 결합(mechanical fastening) 등이 있다. 다시 용접은 저항 점용접(RSW: Resistance Spot Welding), 아크 용접(Arc Welding), 레이저 용접(LBW: Laser Beam Welding)등이 차체 접합법으로 사용되고 있다. 자동차는 약 300여개의 프레스 성형품으로 이루어져

있는데, 원가 측면에서 유리한 저항 점용접이 차 1대당 4,000점 이상으로 가장 많이 적용되고 있다. 이 밖에도 차체 구조상 저항 점용접으로 용접하기 어려운 부위 혹은 특수한 목적으로 아크 용접, 브레이징 등의 접합법이 사용되고 있다.

본 논문에서는 현재 적용범위가 확대되고 있는 AHSS와 차세대 자동차용 강판으로 각광받을 것으로 기대하는 X-AHSS 및 U-AHSS강의 개발동향을 알아보고 차체 용접 중 가장 많이 적용하고 있는 저항 점용접성에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 자동차용 냉연강판의 발전

1960년대까지 대부분의 냉연강판은 연신율 및  $r$ -value 향상을 목적으로 하는 연질의 인장강도 300MPa급의 냉연강판이 주류를 이루었다. 1968년 미국의 안전규제법(FMVSS, Federal Motor Vehicle Safety Standard)이 제정됨에 따라서, 안전성 향상을 위하여 보강재 등에 인장강도 390~590MPa급 고용강화강 또는 490~690MPa급 석출강화강이 적용되기 시작하였다. 1973년 오일쇼크 이후 자동차 연비향상이 요구되면서 경량화 작업이 활발하게 추진되었으며, 경량화의 일환으로 강판을 고강도화하면서 두께를 박물화하는 방법이 대두되게 되었다. 이때 개발된 것이 DP형 복합조직강이었으나, 낮은 소성이방성으로 외판으로 적용되지는 못했다. 유사한 시기에 인장강도 340~440MPa급 P첨가 Al killed강이 최초로 차체의 내판 및 외판용 고강도 강판으로 개발되었다. 1980년대에는 0.003%의 극저탄소를 기지로 탄, 질화물 형성원소인 Ti, Nb를 단독 혹은 복합첨가한 IF-HSS(Interstitial Free High Strength Steel), 성형, 도장후 소부시 항복강도가 ~ 50MPa정도 증가하는 소부경화강 등이 개발되었다. 1990년대에는 오스테나이트 변태유기 소성 현상을 이용한 TRIP강이 개발되어 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다<sup>1)</sup>.

## 3. AHSS 개발동향

AHSS는  $TS \times EI$  값이 25,000MPa·%보다 낮은 강도를 가지며 변태조직을 제어함으로써 강도가 확보되는 집단으로 정의되며, Fig. 1에서 중앙부 하단에 위치한 전형적인 DP, TRIP강이 이에 속한다. 이러한 강들은 1970년대 오일쇼크 이후부터 긴시간 연구 개발되어 왔는데<sup>2-7)</sup>, 잔류 오스테나이트, 마르텐사이트 및 베이나이트 등의 변태상을 갖는 미세조직을 어떻게 이용하는가와 적정 변태상을 적정량 갖도록 하는 상변태/상분배

제어가 연구핵심이었다. 특히 이러한 연구는 AHSS의 변태조직을 제어할 수 있는 다양한 냉각 기술이 적용되는 연속소둔 및 연속용융도금 라인을 활용한 제품 연구에서 매우 중요하게 된다.

DP강은 페라이트 기지 내에 제 2상으로 마르텐사이트가 island 모양으로 분포된 조직을 갖는 강을 일컫는다. Fig. 2는 DP강의 전형적인 SEM조직을 보여준다. 일반적으로 연질의 페라이트가 강의 연성을 부여하고, 경질의 마르텐사이트가 강도를 확보하게 된다. 강이 변형되게 되면, 마르텐사이트를 둘러싸고 있는 저강도의 페라이트상에 변형이 집중되어 높은 가공경화가 발생된다. 이러한 우수한 연성과 가공경화 특성으로 비슷한 항복강도를 갖는 일반 고강도강 보다 매우 높은 인장강도를 보여준다. DP강에서 C(carbon)은 강의 경화능을 증가시켜, 상용 생산라인에서 허용 가능한 냉각속도에서 마르텐사이트를 형성시켜, 최종 제품에서 이상조직을 얻도록 해준다. 이와 더불어 Mn, Cr, Nb, Mo 등의 원소 또한 독자적 혹은 복합적으로 경화능을 향상시키는 데 도움을 준다. 이상의 합금원소들은 우수한 기계적 성질뿐 아니라, 우수한 용접성을 확보하기 위해서 적절히 첨가되어야 한다.

TRIP강의 미세조직은 페라이트 주기지에 잔류 오스테나이트, 베이나이트가 분산된 조직이다. TRIP강은 잔류 오스테나이트가 점진적으로 마르텐사이트로 변태되고, 지속적으로 가공경화가 이루어지면서 국부 네킹이 억제됨에 의하여 연신율이 향상된다. TRIP강은 DP강에 비해 초기 가공 경화율은 낮지만, DP강의 가공 경화율이 낮아지기 시작하는 높은 변형 수준까지도 가공경화가 꾸준히 진행된다. TRIP강은 마르텐사이트 변태 개시온도( $M_s$ )를 상온 이하까지 낮추어 오스테나이트를 상온에서 잔류시키기 위해 DP강보다 많은 C를 첨가하며, 오스테나이트로의 C 농화를 촉진하기 위하여 Si 및 Al을 단독 또는 복합으로 첨가하고 있다. TRIP

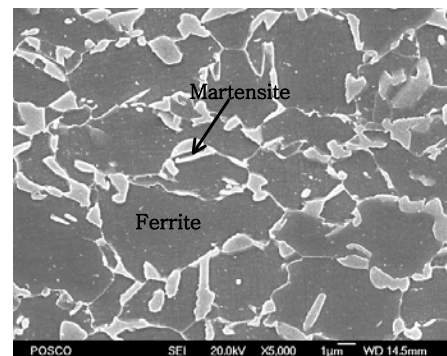


Fig. 2 Microstructure of DP steel with ferrite and martensite

강에 추가적으로 첨가되는 합금원소들은 점용접성을 열화시키게 되는데, 이 문제는 용접사이클을 수정함으로써 개선될 수 있다.

TRIP강 대비 DP강의 주요한 이점은 용접성에 있는데, 이는 TRIP강에 비해 DP강의 C함량이 적은 것에 기인한다. 또 다른 DP강의 이점은 우수한 도금재의 표면품질이다. Si의 함량이 높은 TRIP강은 Si이 소둔 열처리 동안 표면 산화를 촉진시키고 이러한 표면 산화물이 아연의 젖음성을 열화시킴에 의하여 표면품질이 열화되는 단점이 있다.

DP강은 낮은 항복강도, 우수한 소부경화능, 양호한 표면품질로 향후 자동차 외관적용에 높은 잠재력을 가지고 있다. 그러나, DP강의 낮은 r-value로 인하여 외관적용에 한계가 있다. 높은 r값을 얻기 위하여는 화학성분, 열연/냉연 조업인자, 소둔온도 등의 정밀한 제어를 통하여 ND//〈111〉 집합조직을 발달시켜야 하는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>. 한성호 등에 의하면<sup>9)</sup>, 재결정 전에 Mo carbide를 생성시킴에 의하여 고용 C함량을 감소시켜 {111} 집합조직 발달을 촉진함으로써, 높은 r-value를 얻을 수 있으며, 이후 소둔시에 탄화물의 용해를 통하여 마르텐사이트를 확보하여 r값이 우수한 DP강의 제조가 가능함을 보고하였다.

DP강에 Si을 첨가하면 연신율이 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>10)</sup>. Si이 열연재의 Mn-rich 퍼얼라이트 밴드를 억제함에 의하여, 소둔후 균일한 마르텐사이트의 분포를 촉진하게 된다. 또한, Si은 페라이트 내의 용질 원자를 오스테나이트 쪽으로 확산시켜 페라이트 청정화를 촉진하기도 한다.

#### 4. X-AHSS 개발동향

일반적인 AHSS에 비하여 우수한 강도와 연신율 balance를 갖는, TS x El > 25,000MPa·%, 고연성 초고강도강에 대한 연구가 다양한 야금학적 접근방법으로 실험실 차원에서 진행되어 왔다<sup>11-23)</sup>.

X-AHSS강의 첫 번째 예로써, M-TRIP(Martensite based TRIP)강은 마르텐사이트를 기지로 하는 TRIP강으로 정의되는데, Speer 등에 의해 제안된 Q&P (Quenching and Partitioning) 프로세스에 의하여 제조된다<sup>11,12)</sup>. Q&P프로세스에서는 오스테나이트 단상역 혹은 페라이트와 오스테나이트의 2상역 열처리를 통하여 오스테나이트를 전부 혹은 일부를 형성시키고, 이후 마르텐사이트와 오스테나이트 분율을 제어하기 위해  $M_s$ 와  $M_f$  사이의 온도로 급냉시킨다. 급냉된 오스테나이트를 특정한 온도에서 일정 시간 유지하는 동안 마르텐사이트 내의 C가 오스테나이트로 partitioning함에

의하여 오스테나이트내의 C농도가 농화되게 된다. TS-EI은 통상의 TRIP강을 Q&P 프로세스로 하게 되면 25,000MPa·%보다 조금 높게 된다.

Bhadeshia등<sup>15)</sup>은 SB-TRIP(Super Bainite TRIP)강을 제안하였는데, 이 강은 나노 사이즈의 베이나이트가 잔류 오스테나이트 내에 삽입된 형태를 갖게 된다. 이 새로운 개념에서는 다량의 탄소를 함유한 TRIP강을 저온에서 열처리하는데, 이 프로세스의 단점은 높은 탄소량과 낮은 변태온도에 기인하여 베이나이트 변태가 매우 느리다는 것이다. 베이나이트 변태속도를 가속화시키기 위해 Lee 등은 베이나이트 변태속도에 미치는 합금원소의 영향을 조사하였다<sup>16,17)</sup>. 이 강의 기계적 성질은 인장강도1187Mpa, 연신율 39%을 나타내었다.

1970년대 이후 고Mn TRIP강에 대해 열연 및 상소둔에서 역변태를 이용한 연구가 진행되어왔다<sup>18-22)</sup>. 이 연구의 목표는 역변태동안에 Mn을 오스테나이트로 분배시킴에 의하여 오스테나이트의 안정성을 증가시키는 것이다. 최근에 생산성 향상을 위하여 연속소둔공정을 활용하여 역변태 TRIP강을 제조하는 방안이 도출되었는데<sup>23)</sup>,  $A_{c1}$ 과  $A_{c3}$  사이의 온도로 정밀하게 제어함으로써 목표 미세조직이 얻어지게 되며, 개발된 강종의 기계적 성질은 인장강도 1100MPa, 연신율 29%이며, TSxEl은 31,900MPa·%로 X-AHSS에 속한다.

#### 5. U-AHSS 개발동향

오스테나이트의 TWIP(TWinning Induced Plasticity; 쌍정유기소성) 현상을 활용하여 개발된 강종을 TWIP강이라고 하는데, Fig. 1의 오른쪽 상단에 나타난 U-AHSS강의 물성을 만족할 수 있다. TWIP강과 더불어 몇몇 AHSS강의 인장곡선을 Fig. 3에 나타낸다.

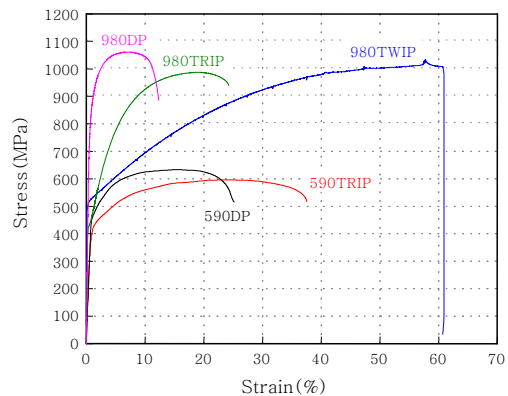


Fig. 3 Stress-strain curve of 980MPa TWIP steel compared to those of conventional advanced high strength steels

TWIP강의 TS x EI은 약 65,000MPa·%로서 함께 나타낸 AHSS강 대비 약 3배 이상의 높은 값을 나타낸다. 이 우수한 성능은 변형 동안 생성되는 쌍정에 의해 얻어진다. 쌍정이 생성됨으로서, 오스테나이트 결정립이 분화되고, 연속적인 가공경화가 일어나게 되어 연신율이 크게 개선되게 된다. 가공경화거동은 적층결합 에너지 (SFE: Stacking Fault Energy)에 의존하는데, SFE가 재료의 변형기구를 결정짓기 때문이다. TWIP강은 낮은 SFE로 인해 쌍정 거동이 변형 동안 발생하여 연신율이 크게 개선되게 된다.

TWIP강은 1990년대 초 POSCO에서 성공적으로 시험 제조되었으나, 당시 시도는 설비 및 생산성 한계로 상용화까지 확대되지는 못했다<sup>24)</sup>. 최근 우수한 물성에 대한 철강사 및 자동차사들의 관심이 증가하고 있으며, 상용화를 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다<sup>25)</sup>.

## 6. 자동차용 AHSS의 점용접성

저항 점용접은 통전시 금속에 발생하게 되는 저항발열을 이용하여, 너깃(nugget)을 형성-용융, 응고시켜 접합하는 기술이다. 저항발열 Q는 다음과 같은 성질을 가지고 있다<sup>26)</sup>.

$$Q \propto (R1 + R2) \cdot I^2 \cdot t$$

여기서 R1, R2, I, t은 각각 접촉저항, 고유저항, 통전전류, 용접시간을 말한다. R1은 피용접재의 표면 특성과 관련되고, R2는 강종의 고유저항으로서 피용접재의 고유의 특성으로 볼 수 있으나, I, t 등은 저항발열에 영향을 미치는 점용접의 중요한 변수가 된다.

AHSS는 변태조직을 제어하여 강도를 확보하는 강종이기 때문에 연결강 대비 화학조성과 미세조직이 다르다. 모든 용접법은 급가열 및 급냉각의 열사이클을 수반하지만, 특히 저항점용접의 경우 순간 냉각속도가 레이저 용접의 경우보다도 빠른 ~수천°C/s에 이르기 때문에 강도확보를 위하여 첨가된 합금성분에 기인한 향상된 소입성으로 인하여 AHSS강의 경우 연결강과는 다른 용접 특성을 보인다. 경화능 확보를 위해 첨가된 합금원소는 저항 점용접의 빠른 냉각속도에 의해 용접과정 중에 너깃 및 열영향부(HAZ, heat affected zone) 조직 대부분이 마르텐사이트, 베이나이트 등으로 변태되어, 용접부가 취화되기도 한다. 또한 높은 합금성분은 모재의 고유저항을 증가시켜, 합금성분이 적은 연결강보다 임계 너깃경을 형성하는 하한전류와 spatter가 발생하는 상한전류 모두를 감소시키는 특성

을 가지며, 특히 하한전류의 감소폭 대비 spatter 발생전류의 감소 폭이 커지게 되어, 가용 용접 전류구간이 연결강 대비 좁아지는 경향을 갖는다. 임계너깃경은 국제규격 혹은 자동차사 내부에서 규정하고 있는데, ISO 국제 규격에서는 아래의 수식으로 규정하고 있다.

$$\text{임계 너깃경} = 3.5 \sqrt{t}, \text{ 여기서, } t \text{는 강종 두께}$$

AHSS강의 높은 합금성분에 기인한 상기 문제로 인해, 대부분의 자동차사에서는 합금성분에 대한 용접부의 경화능 혹은 취화정도를 나타내는 수식인 Ceq (Carbon equivalent)를 도입하여 AHSS 합금성분 첨가량을 규제하고 있으며, 자동차사 마다 자체 기준에 의거한 Ceq식을 사용하고 있다. 예를 들면, 일본 Nissan 자동차사의 경우 아래의 수식<sup>27)</sup>을 채택하여 사용하고 있다.

$$Ceq = C + Mn/20 + Si/30 + 2P + 4S \leq 0.24$$

한편 AHSS의 모재강도가 높기 때문에, 저항점용접시 높은 가압력이 필요하게 된다. 가압력이 충분하지 못하면 강판사이의 밀착이 부족하여, 접촉저항이 크게 증가하게 되고, 이로 인해 너깃이 충분히 성장하지 못하며, 또한 spatter가 낮은 전류에서 발생하게 됨으로써, 가용 용접전류구간이 좁아지게 된다<sup>28,29)</sup>.

AHSS강의 높은 합금성분과 높은 강도로 인해 발생하는 용접성의 차이로부터 자동차사는 AHSS에 대한 용접조건 및 평가기준을 자체적으로 제정 혹은 국제 규격을 선정하여 사용하고 있다. Table 1에 유럽 자동차사 대부분이 채택하고 있는 ISO18278-2의 용접조건을 예로 나타내었는데, 모재 강도를 기준으로 가압력의 차이를 두고 있음을 알 수 있다.

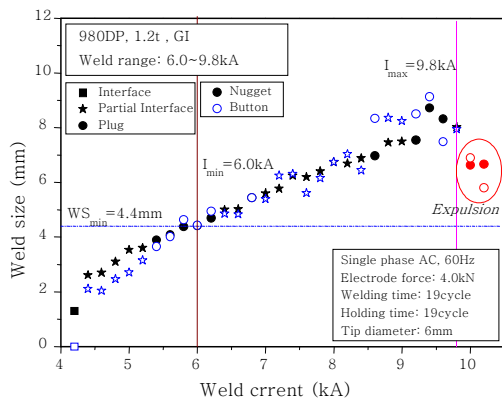
일반적으로 자동차용 강판 소재에 대해, 저항 점용접성을 평가할 때, 냉연소재에 대해서는 너깃경-통전전류와 파단형태로 평가하는데 이를 그래프화 하여 나타낸 것을 Weld Lobe라고 한다. Fig. 4에 POSCO에서 개발한 인장강도 980MPa급 DP강의 Weld Lobe를 나타내었다.

한편, 차체 경량화 및 승객 안전성 확보를 위하여 AHSS의 적용량이 증가하고 있는 추세에도 불구하고, AHSS의 저항 점용접성에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 특히 차세대 자동차용 강판으로 기대되고 Mn, 고 Al을 함유하는 X-AHSS, U-AHSS 및 Ceq가 높은 강종에 대해서도 체계적인 연구가 선행되어야 한다.

**Table 1** Welding parameters for steel sheets

Sheet thickness (mm) <sup>a</sup>	Electrode diameter (mm)	Electrode force (kN)		Number of pulse	Welding time cycles <sup>d</sup> Weld time <sup>b</sup>		Hold time	Hold time cycles <sup>d</sup>	
		Rm <380Mpa	Rm ≥80MPa		Rm <380MPa	Rm ≥380MPa		Uncoated sheet	Coated sheet
0.5	6.0	1.70	2.10	1	5 + X	6 + X	-	c	c
0.6	6.0	1.90	2.30	1	6 + X	7 + X	-	c	c
0.7	6.0	2.10	2.60	1	7 + X	8 + X	-	c	c
0.8	6.0	2.30	3.00	1	8 + X	9 + X	-	c	c
0.9	6.0	2.50	3.50	1	9 + X	10 + X	-	c	c
1.0	6.0	2.70	3.50	1	10 + X	11 + X	-	c	c
1.2	6.0	3.00	4.00	1	12 + X	14 + X	-	c	c
1.5	8.0	4.00	4.50	3	6 + X	7 + X	2	15	20
1.8	8.0	4.50	5.00	3	7 + X	8 + X	2	15	20
2.0	8.0	4.50	5.00	4	6 + X	7 + X	2	15	20
2.5	8.0	5.00	6.00	5	6 + X	7 + X	2	20	25
3.0	8.0	5.50	6.50	5	7 + X	8 + X	2	25	30

<sup>a</sup> 용접소재가 표기한 두께와 다른 경우, x.x~x.x4의 경우 낮은 값을 사용하고, x.x5~x.x9경우 높은 값을 사용할 것  
 예: 두께가 0.8~0.84mm일 때는 0.8mm을, 0.85~0.9mm일 때는 0.9mm을 사용할 것  
 두께가 1.2~1.34mm일 때는 1.2mm를, 1.35~1.5mm일 때는 1.5mm를 사용할 것  
<sup>b</sup> 도금재 용접의 경우의 용접시간은 X cycle  
<sup>c</sup> 유지시간은 용접시간과 동일  
<sup>d</sup> 1 cycle은 0.02초



**Fig. 4** Weld lobe of galvanized DP steel with tensile strength of 980MPa

### 7. 맺음말

지구환경 보호를 위한 차체 경량화와 승객의 안전성 향상을 동시에 충족시킬 수 있는 AHSS 개발 및 적용이 점차 확대되고 있으며, 보다 강화되는 안전 및 환경규제를 만족시키기 위하여 X-AHSS와 U-AHSS의 개발 및 적용이 요구되고 있다. 변태강화 기구를 주로 활용하는 첨단 고강도강은 기존 강재에 비하여 합금첨가량이 필수적으로 증가하게 되며, 이에 따른 용접성의

열화는 첨단 고강도강의 확대 적용에 걸림돌이 되고 있다. 고연성-초고강도를 만족하는 차세대 자동차용 강판의 실용화를 위해 용접에 관한 체계적이고, 끊임없는 연구가 요구된다.

### 참고 문헌

1. W. C. Jeong : KSAE, **18-5** (1996), 12 (in Korean)
2. V. F. Zackay et al. : Trans. ASM, **Vol.60** (1967), 252
3. P. J. Jacques, E. Girault, Ph. Harlet and F. Delannay : ISIJ Int., **Vol.41** (2001), 1061
4. B. C. De Cooman : Current Opinion in Solid State & Mater. Sci., **Vol.8** (2004), 285
5. C. D. Horvath and J. R. Fekete : Int. Conf. AHSS for automotive applications proceedings, June 6-9, 2004, Winter park, Colorado, USA, 3
6. D. K. Matlock, G. Krauss, L.F. Ramos and G. S. Huppi : Structure and Properties of Dual-Phase Steels eds by R. A. Kot and J. W. Morris, TMS-AIME, New York, USA (1979), 62
7. R. D. Lawson, D. K. Matlock and G. Krauss : Fundamentals of Dual Phase Steels, TMS-AIME, Chicago, (1981), 347
8. R. K. Ray, J. J. Jonas and R. E. Hook : Int. Mater. Rev. **Vol.39** (1994), 129
9. S. H. Han, Y. Ahn, K. G. Chin and I.B. Kim : J. Kor. Inst. Met. & Mater. **Vol.46** (2008), 713 (in Korean)
10. Y. Ahn : Proceedings of the Korean Institute of

- Metals and Materials 2008 Fall meeting, Oct. 23~24, 78 (in Korean)
11. J. Speer, D.K. Matlock, B.C. De Cooman : Acta Mater. **Vol.51** (2003), 2611
  12. D.V. Edmondsa, F.C. Rizzo b, B.C. De Cooman, D.K. Matlock d, J.G. Speer : Mater. Sci. Eng. **Vol.A438-40** (2006), 25
  13. K. Sugimoto and S. Hashimoto : ISIJ Int., **Vol. 42** (2002), No. 8, 910
  14. K. Sugimoto, B. Yu, Y. Mukai and S. Ikeda : ISIJ Int., **Vol. 45** (2005), No. 8, 1194
  15. H.K.D.H. Bhadeshia : Mater. Sci. Forum, **Vol.500-501** (2005), 63
  16. K. Lee, Y. R. Im and K. G. Chin : Materials Science and Technology(MS&T) 2008, October 5-9, Pittsburgh, Pennsylvania, 1785
  17. K. Lee : POSCO internal report (2008)(in Korean)
  18. R.A. Grange and C.R. Hribal: "Low -Carbon 6% Manganese Martensitic Steels," Edgar C. Bain Laboratory for Fundamental Research Report **No.1453**, USS, November 1968
  19. R.L. Miller : Met. Trans. A , **Vol. 3A**, April, (1972), 905
  20. T. Furukawa and O. Matsumura : Netsu Shori (Heat Treatment in Japanese), **37-4**, (1997), 204
  21. K.G. Chin et al.: Materials Research Society of Korea, **Vol. 15**, (2005), 115 (in Korean)
  22. M.J. Merwin: THERMEC2006 Conference. Proceedings, Materials Science Forum, **Vol. 539- 543**, (2007), 4327
  23. Y. H. Jin and K.G. Chin : POSCO internal report (2008) (in Korean)
  24. Y. G. Kim, T. W. Kim and S. B. Hong : Proc. of ISATA (1993), Aachen, Germany, p.269
  25. S. K. Kim, J. W. Cho, W. J. Kwak, G. Kim and O. Kwon : Proc. of METEC 2007, Dusseldorf, Germany
  26. M. J. Kim : Resistance welding, Kimunsa,(1998)v
  27. Takeshi Nishi et al. : Nippon Steel Tech. Rep. **No.20** (1982)
  28. K. Yamazaki et al. : Quat. Jour.of JWS **17-4** (1999), 553
  29. M. Ono et al. : Welding Technology, **No.3**(2003), 77



- 한태교(韓台敎)
- 1975년생
- POSCO 기술연구원 자동차소재연구그룹 책임연구원
- 합금설계, 용접야금
- e-mail : tkhan00@posco.com



- 김종상(金鍾常)
- 1960년생
- POSCO 기술연구원 자동차소재연구그룹 그룹리더
- 합금설계, 용융도금
- e-mail : jsangkim@posco.com



- 이규영(李圭榮)
- 1971년생
- POSCO 기술연구원 자동차소재연구그룹 전문연구원
- 합금설계, 집합조직, 재결정
- e-mail : tylee1@posco.com