

## 고장력강판 적용 샤시부품의 용접부 내구수명 향상기술 개발

이 광 복\* · 오 승 태\*†

\*현대자동차 연구개발본부 재료개발센터 자동차강판개발TFT

### Development of Durability Enhancement Technology for Arc Weldings in Advanced High Strength Steel (AHSS) Chassis Parts

Kwang Bok Lee\* and Seung Taik Oh\*†

\*\*Sheet Metal Development TFT, Research & Development Division, Hyundai Motor Company, Gyeonggi-do 18280, Korea

†Corresponding author : geniusli@hyundai.com

(Received August 12, 2015 ; Revised August 20, 2015 ; Accepted August 24, 2015)

#### Abstract

In general, discontinuity of metallurgical and structural points of weld zone could decline the fatigue strength. For the lightweight trend, the AHSS application in automotive chassis is in-progress. However, there are few research reports on AHSS welds fatigue strength in especially automotive chassis parts. Therefore, in this study, we evaluated the effects of the factors affecting the AHSS welding fatigue strength. As the result, the stress concentration of weld bead is the most important factor for welding fatigue strength. For the enhancement of welding fatigue strength, we focused on reducing the stress concentration of the welding beads. So, we applied and proved the plasma welding process and GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) dressing method. It was verified by uniaxial fatigue specimen, fatigue performance increased from 40 to 60% by applying TIG dressing method compared to the conventional GMAW (Gas Metal Arc Welding). These results could be recommended the enhancement of fatigue performance of AHSS.

Key Words : AHSS, Chassis System, Arc Welding, GMAW (MAG), GTAW (TIG), Butt Joint, Lap Joint, Durability Enhancement Technology, Post Treatment, Plasma Welding, GTAW (TIG) Dressing

#### 1. 서 론

지구 온난화와 자원 고갈, 유가 상승 등의 외부 요인에 의해 전세계 자동차 산업의 개발방향은 에너지 효율 향상에 맞춰져 있다. 이를 위해 재료적인 측면에서 기여할 수 있는 방법으로 고장력강 적용 확대에 의한 차량 경량화가 있다. 현재 당사에서도 철강재 전반으로 고장력강 적용 확대를 진행중에 있다. 특히, 내구 성능이 만족되어야 하는 샤시부품도 경량화의 대상으로 고장력강이 대거 적용되고 있으며 대부분 용접에 의해 제작된다.

일반적으로 용접부는 구조적 불연속점 및 야금학적 불연속점으로 작용하여 피로강도를 저하시키는 것으로

알려져 있다<sup>1)</sup>. 구조적인 불연속점으로는 형상에 의한 응력집중 인자가 대표적이며, 야금학적인 불연속점으로는 용접 입열에 의한 모재, 용접부 및 열영향부 간의 물성차이가 대표적인 인자이다. 특히 재료의 강도가 높은 고장력강일 수록 열영향부의 연화 현상 또는 경화 현상이 강도가 낮은 연강 대비 크게 나타나므로 야금학적 불연속부의 영향이 증대 되는 경향에 대한 많은 보고들이 있다. 그러나 실제 자동차 샤시부품에 적용되는 고장력강들의 용접부 피로평가 결과 뿐만 아니라 어떠한 인자가 피로특성을 저하에 직접적인 영향을 끼치는지에 대한 연구결과는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 샤시부품에 적용되고 있는 대표적인 고장력강인 440 MPa, 590 MPa, 1470 MPa 급 강종의 모재 강도 및 용접부 형상에 대한 피로강도

를 정량화하여 용접시편 피로 데이터를 확보하였으며, 피로강도를 저하시키는 주요 영향 인자를 확인하였다. 또한 주요 영향 인자를 최소화 하는 방향으로 용접부 수명향상 방안을 제시하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실험방법

#### 2.1.1 소재 및 용접 방법

본 연구에서 사용한 소재는 샤시부품에 주로 적용되고 있는 냉간성형용 고장력 열연강판(SAPH440-P, SPFH590DP-P ; 각 2.0t)과 핫스탬핑용 초고장력 열연강판(SPBH1470-P ; 1.8t)의 세 강종이며, 동종 및 이종재간 용접을 통해 용접시편의 기계적 물성(인장강도, 경도, 피로강도)을 시험하였다. 이종재간 용접은 실제 부품의 재질 매칭 조건을 반영하여 하판에 SPBH1470-P, 상판에 SPFH590DP-P를 적용하였다.

각각의 목적에 맞게 대표적인 샤시용접부 형상2)인

- ① 맞대기 용접(형상의 영향 검증, A1)
- ② 맞대기 용접후 비드 제거(강도의 영향 검증, A2)
- ③ 겹침 용접(형상의 영향 검증, B)
- ④ 이종 겹침 용접(응력집중계수 측정, DB)의 4가지 형상을 제작하였으며, 각각을 Fig. 1에 나타내었다.

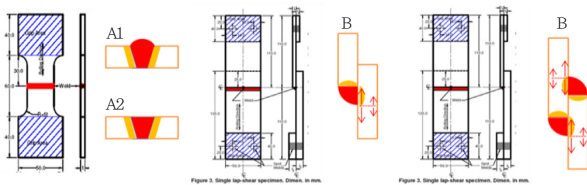


Fig. 1 Shape of Test specimens<sup>3)</sup>

Table 1 Welding conditions for MAG

	Current	Voltage	Speed
Lap-Joint	170~180 A	18 V	70 cm/min
Butt-Joint	140 A	19 V	63 cm/min
Wire	ER70S-6(YGW12), $\Phi$ 1.0 mm		

Table 2 Welding conditions for Plasma welding and TIG dressing

	Current	Voltage	Speed
Plasma	200 A	18 V	55 cm/min
TIG Dressing	120 A	18 V	21 cm/min
Wire	ER70S-6(YGW12), 1.2 mm $\Phi$ * With or Without wire for Plasma welding		

Table 3 Combination of welding specimens

Type	Met-hod	Mark		Material Types			
				590	440	1470	590/1470
Butt	MAG	BG-NB	No Bead	0	0	0	
	MAG	BG-OB	One side Bead	0	0	0	
Lap	MAG	LG		0	0	0	
		LG-T	TIG Dressing				0
		LG-D	Dissimilar steel				0
	Plasma	LP-W	With wire	0			
		LP-NW	Without wire	0			
Double Lap	MAG	DLG		0			
		DLP		0			

현 양산조건을 반영한 용접 방법은 샤시 부품 용접에 가장 많이 사용되고 있는 GMAW(Gas Metal Arc Welding, 이하 MAG)용접법을 적용하였다. 또한, 용접부 응력집중을 완화하여 내구수명을 향상 시킬 것으로 예상되는 플라즈마 용접법과 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding, 이하 TIG) 드레싱 법을 적용하였으며, 겹침 용접시편으로 고주기 피로수명을 평가하여 MAG 용접결과와 비교하였다. 최적 용접 조건은 인장시험 결과를 통해 도출되었으며 그 결과를 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

Table 3은 본 연구에서 수행한 용접부 형태와 강종 및 용접방법의 조합을 나타낸다. 각각의 조합으로 총 143개의 시편이 제작되었다.

#### 2.1.2 피로 시험 및 파면 분석 방법

인장시험 결과 용접부의 건전성이 확보가 확인된 후 각각 Table 1과 Table 2의 용접조건으로 용접시편들을 제작하였다. 피로성능 평가를 위한 시험편들은 ASTM E4662에 의거하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 겹침 용접 용접부의 피로시편은 인장시험편과 같이 폭 25 mm로 가공하였다.

고주기 피로시험은 MTS사의 810 Model을 이용하

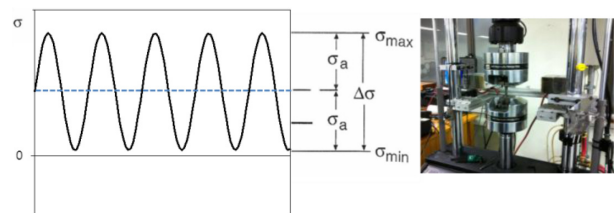
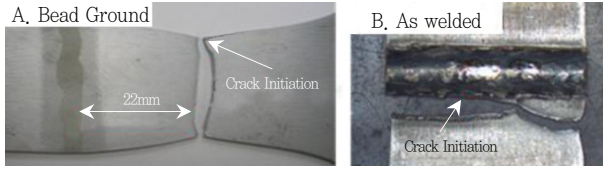


Fig. 2 Fatigue test condition and test Equipment



**Fig. 3** Crack initiation points of 440 MPa grade butt welded specimens (A : Bead ground, B : As welded)

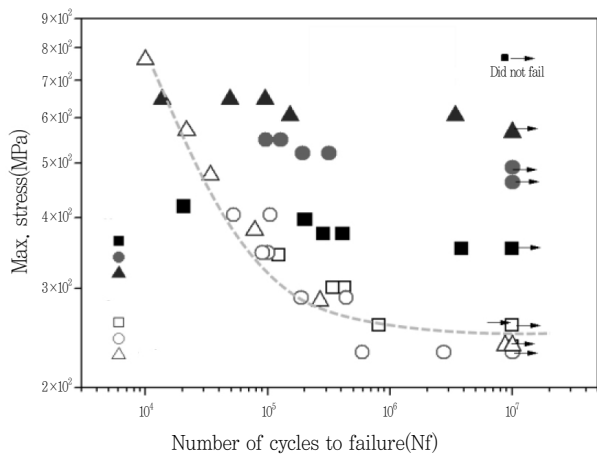
였고, 20 Hz, sine 파형의 R = 0.1 조건으로 시험하였으며, 피로강도의 기준은  $N = 10^7$ 을 만족하는 최대 응력으로 설정하였다. 피로시험시의 최대 응력( $\sigma_{max}$ )은 각 용접시편의 인장강도의 90%부터 10%씩 부하 응력을 감소시키면서 도출하였다. 겹침 용접시편의 피로시험에서 입력 하중에 의한 시편의 회전 모멘트를 최소화하기 위하여 모재와 동일한 두께의 판재를 덧대어 시편을 장착하였다. 피로균열의 시작위치와 용접부의 기하학적 형상 및 야금학적 불연속 정도를 판단하기 위하여 피로시편의 표면 및 파단면을 광학현미경과 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 다각적으로 분석하였다.

2.2 MAG용접 조건 시험 결과

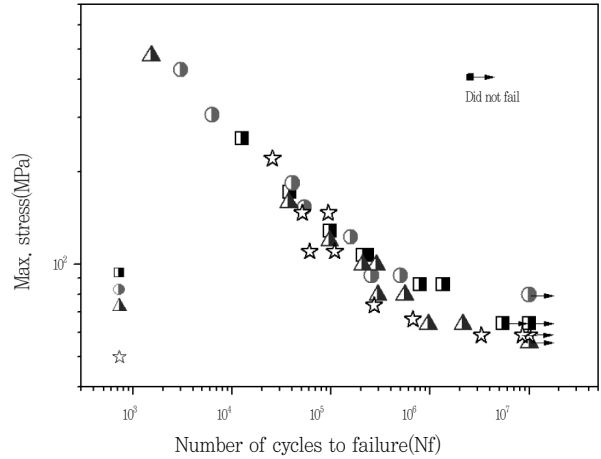
2.2.1 맞대기 용접시편 평가 결과

Fig. 4는 3종의 모재에 대해 MAG 맞대기 용접에 대해 용접비드가 존재하는 경우와 용접비드를 제거한 경우의 평가를 비교한 결과이다.

용접비드를 제거하여 용접부 형상 인자를 배제한 시편에서 모재 강도의 영향을 확인할 수 있었으며 기존 유사 연구결과<sup>3)</sup>에서 알려진바와 같이 모재강도가 높을수록 피로강도가 높게 나타났다. 파단 시편의 경도 평가 결과 3가지 소재의 용접시편 모두 미세조직상 가장 연화된 부분(440 : 모재, 590DP : 열영향부, 1470 : 용접부)에서 파단이 발생하였으며, 이는 인장시험에서



**Fig. 4** Results of the high frequency fatigue test for butt welded specimens



**Fig. 5** Results of the high frequency fatigue test for single lap-joint welded specimens

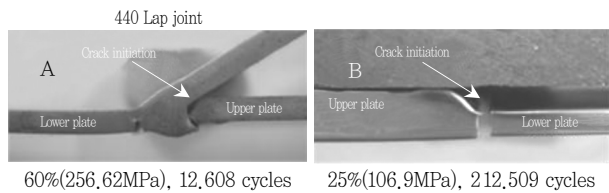
의 파단 위치와 동일하다(Fig. 3A). 440소재는 용접 입열로 인해 용접부 및 열영향부의 결정립 미세화가 진행되어 모재부가 가장 연질부로 나타났으며, 590DP소재는 열영향부 조립역에서 모재의 마르텐사이트 조직이 페라이트로 변태 되면서 연화되었다. 1470소재의 경우에는 시험에서 600 MPa 수준의 용가재(ER70S-6)를 사용함에 따라 용접부가 연질부로 나타났다.

용접비드가 존재하는 경우 이러한 미세조직적인 영향은 응력집중 효과에 비해 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 평가 결과 모재의 강도가 높아짐에도 불구하고 440, 590, 1470 모두 유사한 피로강도를 나타내었다. 또한, 3개 강종 모두 용접비드부에서 파단이 시작되고 전파되었다(Fig. 3B).

2.2.2 겹침 용접 결과

실제 사시 부품에 주로 적용되고 있는 겹침 용접시편의 고주기 피로평가 결과 맞대기 용접 대비 용접비드의 응력집중효과가 지배적으로 나타나 모재 강도에 의한 차이를 확인하기 어려웠다.

겹침 용접시편의 경우 파단위치는 모재의 강도에 관계 없이 부하 응력의 인장강도에 대한 비율에 따라 나타났다. 피로강도가 인장강도 대비 50% 이상의 고응력



**Fig. 6** Crack initiation points of 440 MPa grade single lap joint welded specimens. (A : High stress ratio;60% of UTS, Root crack B : Low stress ratio;25% of UTS Toe crack)

비에서는 루트부에서, 50% 이하의 저응력비에서는 토우부에서 파단이 시작되고 전파됨이 확인되었으며, Fig. 6에 나타내었다. 이러한 현상은 겹침 용접시편의 피로시험시에 1축 압축, 인장 응력 이외에도 굽힘 모멘트가 작용하게 되는데, 인장강도의 50% 이상의 고응력비에서는 루트부에서 굽힘 모멘트의 영향이 커지고, 저응력비에서는 상대적으로 굽힘 모멘트의 영향이 작기 때문에 응력집중의 위치가 달라지는 것으로 판단된다.

### 2.3 용접부 피로수명 향상 방안

일반적으로 샤시부품의 내구시험은 탄성영역 이하의 저응력비 구간에서 진행되며 실제 차량의 응력이력도 마찬가지이다. 실험 결과에 의하면 이 구간에서는 용접 토우부에 응력이 집중되어 파단이 일어나므로 겹침 용접시편 토우부의 응력집중을 완화해 주면, 피로수명 향상 효과를 얻을 수 있을 것으로 예상되었다. 저자들은 이를 위해 토우부 응력집중 완화에 효과가 있을 것으로 예상되는 플라즈마 용접법과 TIG 드레싱법을 적용하여 겹침용접 시험편으로 고주기 피로평가하였다. Fig. 7에 용접비드 형상에 따른 응력집중 정도를 나타내었으며, 비드형상 개선에 의해 응력집중 정도가 완화됨을 보여 준다.

#### 2.3.1 플라즈마 용접 결과(590 MPa용접시편)

플라즈마 용접법은 TIG 용접법과 유사한 용접법으로 녹지 않는 텅스텐 전극을 사용하므로 안정적인 아크를 유지할 수 있다. 플라즈마 용접장치는 오리피스 가스라

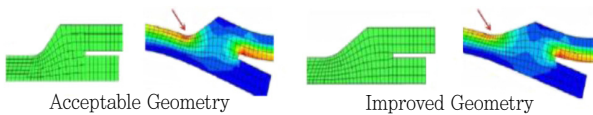


Fig. 7 Stress concentration effect, which is determined by the geometric shape of the weld toe<sup>4)</sup>

Table 4 Welding conditions for Plasma welding and MAG

	MAG	Plasma(wire)	Plasma(nowire)
Material	590DP	590DP	590DP
Speed	55 cm / min	35 cm / min	40 cm / min
Shielding Gas	Ar 70%, CO <sub>2</sub> 30%	Ar 100%	Ar 100%
Orifice Gas	-	Ar 100%	Ar 100%
Wire	ER70S-6	ER70S-6	-
Apperance			

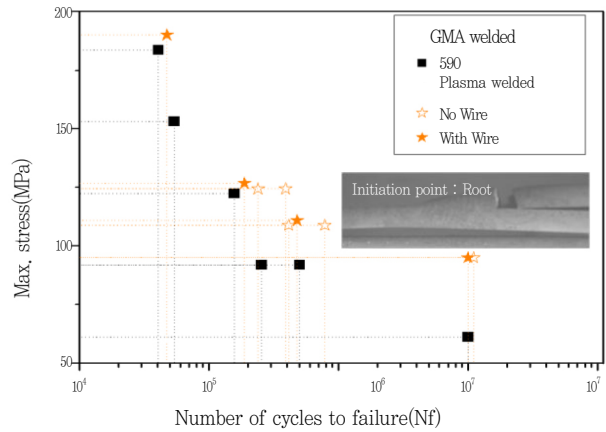


Fig. 8 Results of the high frequency fatigue test for single lap-joint welded by plasma welding

고 불리우는 가스가 고온 아크를 집중시켜 플라즈마로 변화되는 원리이며, 열집중도가 TIG 대비 20배 이상 높아(TIG : 50 W/mm<sup>2</sup>, 플라즈마 : 1000 W/mm<sup>2</sup>) 열변형이 적고 레이저 용접 수준의 미려한 외관이 특징이다. 현재 도어프레임 등의 일부 차체부품에 TIG용접을 대체하여 사용중이나, 샤시부품 적용 사례는 없다.

플라즈마 용접법은 제살용접과 와이어 송급 용접이 모두 가능하며, 본 연구에서는 두가지 모두 진행하였다. 상세 조건과 비드형상은 Table 4에 나타내었다.

플라즈마 용접의 경우 기존 MAG용접 대비하여 비드의 형상이 미려하여 응력집중이 완화되므로 피로강도가 60 MPa에서 95 MPa로 60% 향상되는 결과를 얻었으며 이를 Fig. 8에 나타내었다.

와이어의 첨가 여부는 피로수명과 큰 관계는 없었다. 또한, MAG 용접과 달리 저응력비에서도 용접 토우부가 아닌 루트부에서 파단이 일어난 것으로 보아 플라즈마 용접에 의한 응력집중 완화로 토우부에서는 더 이상 응력집중이 일어나지 않음을 확인할 수 있었다.

플라즈마 용접이 높은 용접품질과 피로 성능을 나타내지만 양산에 적용하기 어려운 몇 가지 문제점이 있다. 첫째로 장비가격이 기존 MAG용접기 대비 10배 가량 비싸며, 둘째로 피용접물의 갭에 대한 민감도가 크고 토치가 커서 자동화 티칭이 용이하지 않다. 이에 저자들은 양산적용이 용이한 용접 후처리법들에 대해 연구하였다.

#### 2.3.2 TIG 드레싱 결과(상판 : 1,470 MPa, 하판 : 590 MPa, 겹침용접시편)

용접 후처리에 대한 연구는 주로 후판을 사용하는 조선, 토목등의 구조물 분야에서 발전하였다.<sup>5-7)</sup> 후처리법은 용접 토우부의 응력집중부의 형상을 기계적(초음파 충격처리(UIT), 해머 피닝, 버 그라인딩(BG) 등),



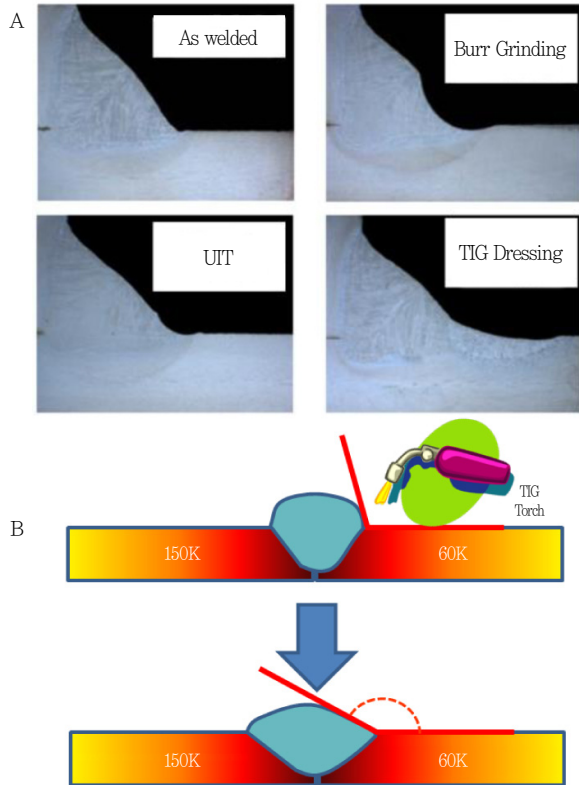


Fig. 9 A : Welding Post treatment methods<sup>6)</sup>  
 B : Schematics of TIG Dressing

열적으로 완화해 주는 방법(TIG 드레싱법)과 용접부 부근에 압축 잔류응력을 인가해 주는 방법(샷 피닝) 등이 대표적이다(Fig. 9A). 저자들이 위의 여러가지 방법들에 대해 양산가능성과 효과에 대해 검토해본 결과, 자동차 사시부품에는 TIG 드레싱법이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

TIG 드레싱법은 먼저 MAG 용접으로 피용접재를 용접한 이후에 전주 또는 취약부에 선택적으로 TIG 토치로 용접비드를 재가열 및 재용융 해줌으로써 비드 토우부의 응력집중을 완화해주는 기술이다.(Fig. 9B) 이는 플라즈마 용접에 비해 피용접물의 갭에 대한 민감도가 작고(양산 용접과 동일), TIG 토치의 가격이 MAG 용접기 보다 저렴하며, 내구 취약부에만 국부적으로 적용 가능하므로 자동화가 용이하고 원가 상승이 크지 않은 장점이 있다.<sup>8)</sup>

Fig. 10에는 TIG 드레싱 시편과 MAG시편의 피로 시험 결과를 나타내었다. 플라즈마 수준의 미려한 비드 형상은 아니지만, 토우부의 응력집중이 완화되어 피로 강도가 51 MPa에서 72 MPa로 40% 향상되었다. 플라즈마 용접과 마찬가지로 저응력비 시험 하에서도 루트부에서 파단이 일어난 것으로 보아 토우부의 응력집중은 일어나지 않았다.

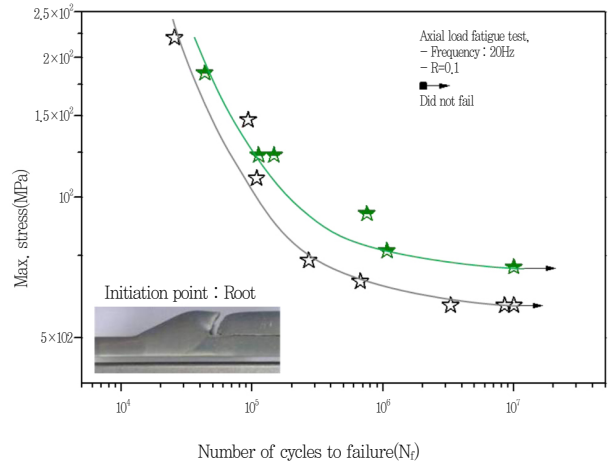


Fig. 10 Results of the high frequency fatigue test for single lap-joint, post treated by plasma welding

TIG 드레싱법은 높은 작업 속련도가 요구되며 오염에 취약한 단점이 있으나 자동화 공정이 마련되면 극복 가능할 것으로 기대된다.

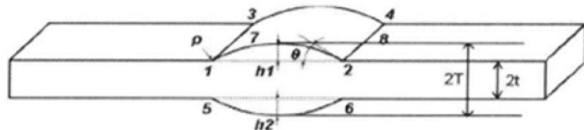
### 2.4 응력집중 효과 분석

저자들은 MAG 용접에서 비드에 의한 응력집중을 완화한 플라즈마 용접 및 TIG 드레싱법의 피로강도 향상 정도를 고주기 피로평가를 통해 정량적으로 확인했다. 응력집중에 의한 피로수명 저하를 나타내는 피로응력집중계수( $K_t$ )는 직접 구하기 어렵기 때문에  $K_t$ 와 비례하며 기하학적 형상으로 구할 수 있는 응력집중 계수(Stress Concentration Factor, SCF :  $K_t$ )를 모재와 용접비드가 이루는 각도와 곡률 등으로 아래의 식(19)을 이용해 계산하였으며, Fig. 11에 각각의 용접법 형상에 따른  $K_t$ 값을 나타내었다.

피로평가 결과와 마찬가지로 플라즈마 용접과 TIG 드레싱법에서 토우부의 비드 각도가 향상되고 이에 반비례하여  $K_t$ 값이 감소함을 확인했다. 저자들의 시험 결과  $K_t$ 가 4.410)이상이면 강중에 무관하게 피로강도가 유사함을 알 수 있었다. 현재 사시 부품들의 경우 대부분 MAG용접으로 접합이 되며,  $K_t$ 값이 4.0 이상 수준으로 고장력강 적용에 의한 내구향상 효과가 거의 나타나지 않는다. 모재의 강도 효과를 보기 위해서는 용접부 형상에 있어  $K_t$ 값을 최대한 작게 할 수 있는 용접법의 도입(TIG 드레싱법 등)이 필요하다고 판단된다.

### 2.5 실부품 내구향상 효과 검증

시험상태의 피로강도 향상 효과 검증을 위하여 초고장력강판이 적용된 부품을 선정하였다. 대상부품은 소형



$$K_t = 1 + \left[ \frac{1 - \exp(-0.9\sqrt{T/h} \cdot (\pi - \theta))}{1 - \exp(-0.9\sqrt{T/h} \cdot \pi/2)} \right] \cdot \left( \frac{1}{2.8T/t - 2} \cdot \frac{h}{\rho} \right)^{0.65} - \text{form1}^{(9)}$$

Stress Concentration Factor( $K_t$ )for weld bead

$\rho$  : The radius of curvature

$\theta$  : The angle between the toe and plate

$h$  : Height of the bead

$2T$  :  $h_1 + h_2 + 2t$

$2t$  : Thickness of the material

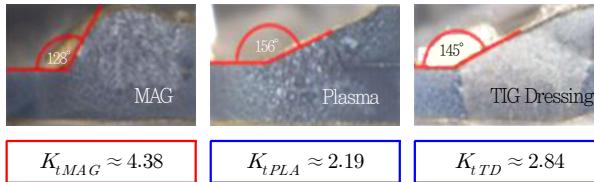


Fig. 11  $K_t$  values and shape for various welding methods

차 후륜 서스펜션인 CTBA(Coupled Torsion Beam Axle)로 1470 MPa급 핫스탬핑 빔과 590 MPa급 트레일링암이 용접된 구조이며, 주로 이 두 부품의 용접부에서 내구 파단이 시작되는 것으로 알려져 있다. 기존의 내구해석 및 내구시험 결과로부터 Fig. 12A에 표시한 부위가 가장 취약한 부분임을 확인하였으며, 이 부위에 국부적인 TIG 드레싱 처리한 부품과 별도의 처리를 하지 않은 양산부품을 내구 평가하여 결과를 비교하였다.

부품의 제작은 양산라인에서 MAG용접된 부품에 시편상태에서 얻은 TIG 드레싱 최적 조건을 적용하여 수동 작업하였다. 내구시험 모드는 실차 주행 로드데이터를 반영한 모듈 내구시험을 시행하였으며, 일련의 과정을 Fig. 12에 각각 나타내었다.

Fig. 12D에서 보듯이 TIG 드레싱 처리 이후의 부품은 외형적으로 미려한 형상은 아니지만 단면을 확인한 결과 응력집중이 완화된 형상을 보였으며 실제 내구 평가에서도 기준 수명 대비 5배 이상에서 크랙이 발생하지 않는 무한수명을 나타내었다.

### 3. 결 론

고장력강의 용접부 피로평가 결과 모재 강도와 용접 비드에 의한 응력집중에 대한 영향 인자를 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 맞대기 용접 후 비드를 제거한 시편에서 모재

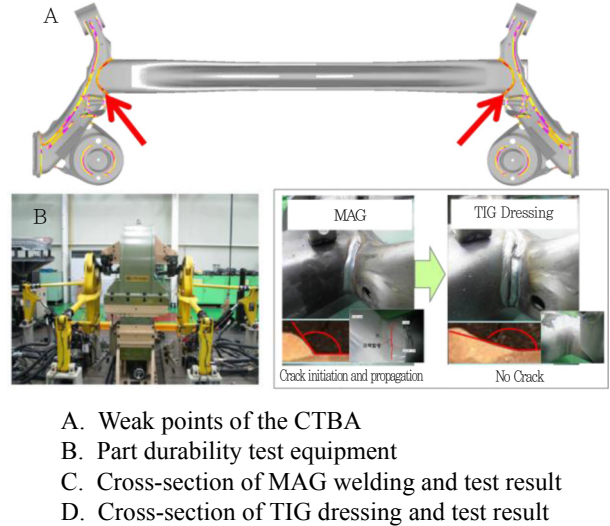


Fig. 12 Actual part evaluation of CTBA

강도와 피로강도는 서로 비례함을 확인할 수 있었다.

(2) MAG용접에서는 용접비드가 존재할 경우 비드의 토우부가 응력집중부로 작용하여 모재 강도에 관계없이 유사한 피로강도를 나타내었다. 특히 샤시에서 가장 많이 적용되는 겹침 용접의 경우 440 MPa, 590 MPa, 1470 MPa 세 강종 모두 동일 수준의 피로강도를 보였다. 즉, 고장력강의 용접부 피로 물성은 모재의 강도보다 용접비드 토우부의 응력집중에 의해 지배되며, 용접부의 피로강도 향상을 위해서는 응력집중을 완화할 수 있는 용접 기술 또는 후처리법이 필요하다고 판단되었다.

(3) 플라즈마 용접법 평가 결과 비드의 응력집중계수 완화 효과로 피로강도가 기존 MAG 용접 대비 60% 향상된 것을 확인할 수 있었으나, 용접 조건 등을 양산 사양에 적용하기 어려운 문제가 있었다.

(4) 건축, 토목, 조선 분야에서 피로물성 향상을 위해 사용되고 있는 TIG드레싱법 평가 결과, 응력집중계수와 피로강도가 기존 MAG용접 대비 40% 향상되는 결과를 시편상태에서 확인할 수 있었으며, 부품상태(CTBA)에서 한계내구 평가 결과 무한수명을 나타냄을 확인하였다. TIG 드레싱 기술은 용접부 전주에 적용하기도 하지만 취약부에만 국부적으로 적용 가능하므로, 처리 시간과 비용 상승이 크지 않은 장점도 가지고 있다. 이러한 연구 결과들은 향후 고장력강 용접부의 내구문제 개선에 대한 대안으로 적용 가능할 것으로 기대된다.

### References

- Bannantine et al., Fundamentals of metal fatigue analysis, 1990, Prentice Hall
- Byeong-Choon Goo, Jai-Hoon Kim, Fatigue Tests of

- Welded Joints and Comparison Study of Foreign Codes, *Journal of KWJS*, 25(14~23) (in Korean)
3. John J.F. Bonnen et al., Durability of Advanced High Strength Steel Gas Metal Arc Welds, *SAE International* 2009-01-0257
  4. Jae-Won Kim, Yeong-Do Park, Selection of Optimal Welding Conditions for GMAW of High Strength Steel and Characterization of Weldability Change, *KWJS 2011-Autumn* 138 (in Korean)
  5. Chin Hyung Lee et al., Effect of weld geometry on the fatigue life of non-load-carrying fillet welded cruciform joints, 2009, *Engineering failure analysis* 16, 849-855.
  6. Pedersen et al., Comparison of post weld treatment of high strength steel welded joints in medium cycle fatigue, 2001, *International Institute of welding XIII-2272-09*
  7. Haagensen et al., IIW recommendations on post weld improvement of steel and aluminum structures, 2001, *International Institute of Welding XIII*
  8. Fatigue behavior of arc welded assemblies-Paths of improvement, 2011, Arcelor Mittal Report
  9. Jai-Hoon Kim, Byeong-Choon Goo, A Study on the Fatigue Life Estimation Using Butt Weld Bead Profiles, 2004, *Journal of The Korean Society For Railway* 7(2), 125-129 (in Korean)
  10. Stress concentration factors 3rd Ed. 2007, Peterson