자동차 샤시부품용 고강도강재의 용접부 내구성능 향상기술 개발동향과 전망

배 규 열^{*,†} · 정 홍 철^{*}

^{*}포스코 철강솔루션마케팅실 집합연구그룹

Development Trend and Prospect for Improving Fatigue Performance of Advanced High Strength Steel Welds in Automotive Chassis Applications

Gyuyeol Bae^{*,†}, and Hongchul Jeong^{*}

^{*}Welding & Joining Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO, Pohang, 37859, Korea

[†]Corresponding author : gbae@posco.com

(Received November 21, 2017 ; Revised December 6, 2017 ; Accepted December 11, 2017)

Abstract

In general, welds of advanced high strength steel (AHSS) do not exhibit appreciable increase in fatigue strength unlike the base metal case. Thus, weld fatigue strength is insensitive to the steel type and grade of current AHSS. The use of AHSS for light-weighting must be accomplished by improving the fatigue performance of the weld joint. This article review original work and important new developments in the field of weld fatigue behavior of AHSS in terms of mechanical and metallurgical factors. This review surveys the experimental literature, summarizes the current technological concepts, and identifies the outstanding issues with improving the weld fatigue performance. Suggestions for the directions of future research on AHSS weld fatigue are offered.

Key Words : AHSS, Automotive chassis, GMAW, Weld fatigue, Low-temperature transformation, Post-weld treatment

1. 서 론

최근 자동차 산업 분야에서는 지구 온난화 문제 등 환경보호에 따른 연비규제 정책으로 인해 차체 및 부품류의 경량화 기술 연구가 큰 이슈로 부상하고 있다. 이러한 기조에 따라 자동차 주행 성능에 중요한 샤시 부품류 또한 경량화를 위한 고강도 강재의 적용이 필요한 실정이다. 부품 경량화 달성을 위해서는 소재의 고강도화가 필수적이며, 반복적인 피로하중이 가해지는 환경에서 고강도 강재로 제작된 부품의 내구성능 보증이 중요한 요소라 할 수 있다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 자동차 샤시부품 조립시 강도 확보를 위해 주로 이용되는 가스메탈아크 용접의 경우, 용접와이어의 용착에 의

Fig. 1 MAG and MIG welding applications of various car parts¹⁾

Fig. 2 Relationship between tensile strength of steel and fatigue strength²⁾

해 부품간 겹침이음 용접이 이루어지므로 이음부의 기하학적 형상 부여가 불가피하다. 이는 반복피로 응력(노치효과)로 작용하여 파단기점이 되어 결과적으로 부품의 내구성능 저하를 초래하므로 고강도 강재 적용의 이점이 상실되는 한계를 지닌다.

따라서 자동차 샤시부품의 경량화 및 고강도화에 따라 용접부의 피로수명 저하에 따른 내구성능 향상이 주된 이슈이며, 가령 북미 Auto Steel Partnership (A/S-P)의 Chassis Projects 분과에서 용접부 피로강도비 향상이 주요 지표로 운영되고 있을만큼 핵심 해결 과제라 할 수 있다. 이는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 강재의 강도 증가에 따른 피로강도 상승분 대비 용접부의 피로강도 상승분은 매우 미미한 수준이라는 것이 실제 고강도 샤시부품의 설계 자유도를 저하시키는 요인이 되고 있으며, 최근 유럽, 미국, 일본 등 철강사-자동차사-대학-용접재료사가 컨소시엄 형태로 상호 협력하여 샤시부품용 고강도강 용접부의 피로강도 향상을 위한 연구를 집중적으로 수행해 왔다.

본 논문은 최신 자동차 샤시부품용 고강도강재의 용접부 내구성능 향상기술 연구 및 개발동향을 살펴보고 향후 전망을 제시하고자 한다.

2. 고강도강재 용접부 피로특성

2.1 용접비드 형상 영향

일반적으로 Fig. 3에 나타난 것과 같이 용접부 피로강도는 기계적 관점에서는 주로 용접토우의 형상에 따른 응력집중 그리고 야금학적 관점에서는 용접토우의 인장 잔류응력에 영향을 받는다.

Fig. 4는 신일본제철에서 2013년도에 발표한 결과

Fig. 3 Fatigue crack originating from weld toe of carbon steel and typical distributions of residual stresses in weld joint³⁾

Fig. 4 Fatigue strength of arc welded joints⁴⁾

로 두께 2.3mm의 열연강판의 강도 수준에 따른 겹침이음 가스메탈아크 용접부의 벤딩 피로특성 ($R=-1$) 평가결과를 보여준다. 본 실험에서는 용접 루트부의 피로 크랙을 방지하기 위해 겹침이음부 양측을 double lap joint 형태로 용접하였다. 모재의 강도가 증가함에 따라 용접부의 피로강도가 소폭 증가함을 알 수 있다.

강재의 강도가 증가함에 따라 용접부 피로특성 향상을 위해 기계적인 관점에서 용접비드의 곡률반경을 확대하여 응력집중을 저감하는 것이 중요하다. Fig. 5는 American Iron & Steel Institute와 Oak Ridge National Lab에서 발표한 결과로 일반 연강 및 590MPa급 DP강 대비, 780MPa급 DP강이 용접비드 형상 개선을 통한

Fig. 5 Significant effect of weld profile improvement on advanced high strength steel weld fatigue life⁵⁾

Fig. 6 Improvement of weld profile (from A to B) for 2.0mm 780DP steel improve K_f by 17% or fatigue life by 6.5 times⁶⁾

피로수명 향상 효과가 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 6에 나타난 것과 같이, FEM 해석을 통해 용접토우의 곡률반경을 1.0mm에서 2.5mm로 증가시킬 경우 780MPa급 DP강 용접부의 응력집중계수(K_f)는 17% 감소되고, 피로수명은 6.5배 증가한다.

이와 유사한 개선 방향으로, Fig. 7은 현대자동차에서 발표한 결과로 두께 2.0mm의 590MPa급 DP강 가스메탈아크 용접부와 상대적으로 입열량은 크지만 아크

Fig. 7 Fatigue resistance (S-N plots) of 590DP steel welds prepared by gas metal arc and plasma arc welding processes⁷⁾

길이와 폭을 증가시킨 플라즈마 아크용접부의 용접비드 형상 및 피로특성을 비교하여 향상 결과를 확인하였다.

2.2 용접부 미세조직 영향

전술한 바와 같이, 가스메탈아크 용접부의 피로균열은 응력 집중부인 용접비드 토우에서 개시되어 용접열영향부인 연화부를 따라 급속히 전파한다. 일본 JFE Steel 특허에 따르면, 780MPa급 강재의 용접부 피로강도 향상을 위해서는 표면으로부터 0.1mm 깊이에서 0.1mm 간격으로 경도 측정시 최소경도 위치가 용융선으로부터 0.3mm 이상 떨어져 있어야 한다고 기술하였다⁸⁾.

또한, 응력 집중부인 토우부 재질, 즉 CGHAZ에 Acicular ferrite의 분율이 증가하면 피로균열 개시 및 초기 전파에 대한 저항성 향상으로 피로특성 개선이 가능한 것으로 보고되었다⁷⁾.

한편, 인장강도 370MPa 및 500MPa급 강재의 용접 열사이클을 재현하여 CGHAZ 시편 제작후 벤딩 피로시험 평가 결과, Polygonal ferrite 대비 Widmanstatten ferrite가 높은 인장강도 및 피로강도를 보였다⁹⁾. 단, 전반적으로 CGHAZ가 모재 대비 피로강도가 높은 것으로 보아, 실 용접부의 피로강도 저하에 미치는 재질의

영향은 비드형상 영향에 비해 크지 않다는 것을 알 수 있다.

2.3 강재 성분 영향

앞서 논의한 용접부의 피로강도 향상, 즉 용접비드의 곡률반경 확대를 위한 강재 성분의 영향은 용융지의 유동성 측면에서 검토가 되었다. 신일본제철의 기술보고에 따르면, 강재의 Si 함량이 0.33%까지 증가할 때 용접비드의 곡률반경이 증가하고 이는 용융지의 Marangoni 대류가 약화되어 유동이 용융지 중심에서 바깥쪽으로 형성된 것에 기인한다고 설명하였다²⁾. Fig. 8에 나타난 것과 같이 강재의 Si 함량이 0.003%로 낮을 때에는 이와 반대의 현상으로 인해 용접비드의 곡률반경이 감소하고 언더컷 발생에 보다 민감한 것을 알 수 있다.

2.4 용접재료 효과 및 개발 동향

샤시부품용 고강도강재 가스메탈아크 용접부의 피로 강도 향상을 위한 용접재료 개발 방향은 기계적 관점인 용접비드 형상 개선 측면에서 CO₂ 혼합에 의한 아크 수축을 최소화하기 위한 순수 Ar 가스 안정화 용접재료를 개발하는 것과 야금학적인 관점에서 용접금속의 응고수축에 따른 인장 잔류응력을 저온상 변태 팽창, 즉 압축응력으로 상쇄할 수 있도록 용접재료의 마르텐사이트 변태 개시(Ms) 온도를 응고 발생 온도 영역까지 낮춘 저온변태형 용접재료를 개발하는 것이다.

일본 Kobelco는 전술한 개념을 구현하기 위한 플렉스 코어드 와이어를 개발하여 발표하였다²⁾. Fig. 9에 나타난 것과 같이, MIG (100%Ar) 용접이 가능하고 이에 따라 Ms 온도를 낮추기 위해 통상 첨가하는 고가의 Mn 또는 Ni 대신 저가의 C를 증량하여 보다 경제적으로 순 Ar 용접에 따른 용접비드의 곡률반경 확대

Fig. 8 Effect of Si content of steel sheet on weld bead shape²⁾

및 저온변태 특성에 따른 용접부의 인장 잔류응력 감소로 피로특성을 효율적으로 향상시킬 수 있다.

또한, 전술한 플렉스 코어드 와이어를 활용하여 가스 메탈아크 용접시 진행각, 작업각 및 아크위치를 최적하여 용접부의 피로강도 극대화가 가능하였다¹⁰⁾. Fig. 10에 나타난 것과 같이, 포스코의 780MPa급 고버링 열연강판의 용접재료에 따른 용접비드 형상 및 용접금속 미세조직을 비교하였다. 80kg급 솔리드 와이어 대비, 플렉스 코어드 와이어 적용시 용접금속 미세조직의 치밀화

Fig. 9 Relationship with argon mixing rate in shielding gas and toe radius of the bead and residual stress on surface of weld toe position²⁾

Fig. 10 Comparison of bead shape and microstructure of 780HB steel welds prepared by different welding wires and processes¹⁰⁾

Fig. 11 Bending fatigue strength (S-N plots) of 780MPa grade hot-rolled steel welds prepared by different strength welding wires¹¹⁾

및 강도 향상이 가능하다.

한편, 2016년 신일철주금의 발표에 따르면 용접재료의 고강도화를 통해 용접부 피로강도 향상이 가능하다. Fig. 11에 나타난 것과 같이, 두께 2.3mm의 780MPa 급 열연강판의 가스메탈아크 double lap joint 용접부의 벤딩 피로강도는 용접재료의 강도에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이 때, 용접재료의 인장강도는 Wire A : 470MPa, Wire B : 570MPa, Wire C : 870MPa이다. 이는 용접토우 부근의 용접금속 강도 증가와 연관이 있다.

고강도 저온변태형 용접재료 개발 관련해서는 Arcelor-Mittal Global R&D-Oak Ridge National Lab-Colorado School of Mines-ESAB이 공동으로 2011년부터 2014년까지 3년간 연구개발 프로젝트를 수행하였다. Fig. 12에 나타난 것과 같이 새로 개발한 용접재료를 980MPa 급 DP강에 적용시 통상의 ER70S 솔리드 와이어 대비 용접토우의 인장 잔류응력 저감 효과로 인해 피로수명 향상이 가능한 것을 보였다.

Fig. 12 Comparison of residual stress distributions and fatigue life of welded samples using LTPT wire and conventional solid wire¹²⁾

2.5 용접부 후처리 기술

전술한 저온변태형 용접재료 개발은 용접시 용접부의 잔류 응력을 제어하는 것이 용접비드 형상을 제어하는 것보다 생산 현장에 현실적으로 적용성이 높다고 판단 것에 있다. 단, 자동차 부품 제조 과정 또는 그 이후 단계에서 용접부의 잔류응력을 보존하는 것이 가능한 것인가에 대해서는 논쟁이 있으며, 추가적인 규명이 필요하다.

이러한 관점에서는 부품 제조비용은 다소 증가하지만 용접부 후처리 기술 개발 및 적용을 통한 용접부 피로강도 향상이 가능할 것이다. 전통적으로는 용접부 피닝 또는 국부 재용융을 통한 드레싱 기술이 소개되어 왔다.

일본 JFE Steel 특허 기술에 따르면, 플라스마 열원을 통한 용접비드 끝단부 재용융 처리, 즉 용접토우를 중심으로 모재와 용접비드 양쪽을 모두 재용융하여 용접토우 곡률반경 확대와 용접부의 인장 잔류응력 감소가 동시에 가능하다고 설명하였다¹³⁾.

또한, JFE Steel의 다른 특허 기술에 따르면, 용접비드 끝단부 (타격면 폭 1/4 이내의 부위)를 타격하여 소성변형 영역을 형성하고 용접토우 근방에 압축응력 부여를 통해 피로강도 향상이 가능하다고 설명하였다¹⁴⁾.

2015년 현대자동차 재료개발센터 자동차강관개발 TFT에서는 Coupled Torsion Beam Axle 부품 MAG 용접부의 응력집중계수를 낮추기 위해 TIG 드레싱을 적용하였고, 그 결과 시편의 피로강도는 기존 MAG 용접부 대비 40%, 실제 부품의 피로수명은 무한수명으로 기존 대비 5배 이상 향상 가능하다고 보고하였다¹⁵⁾.

Fig. 13은 두께 2.9mm의 포스코 980MPa급 DP

Fig. 13 Cross-sectional micrograph of fatigue failed 980DP steel weld joint prepared by MIG welding and TIG dressing

강의 double lap joint MIG 용접부에 TIG 드레싱을 최적화하여, $R=0.1$ 로 피로강도를 평가한 결과이다. 파단부의 단면조직에서 확인할 수 있듯이 용접비드 곡률반경 확대 및 재질 강화로 인해 피로 파손부의 위치가 용접토우에서 TIG 드레싱 열영향부로 이동한 것을 알 수 있다.

최근 포스코 특허에는 기존의 TIG 또는 플라스마 재용융 드레싱 기술과는 차별화 된 레이저 defocus 빔을 활용한 국부 재용융 기술이 소개되었다¹⁶⁾. 본 기술은 일본 JFE Steel에서 제시한 플라스마 열원 대비 재용융부 재질 연화를 최소화 하면서 국부적인 강화 효과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 일본 오사카 접합 과학 연구소에서 발표한 Laser Peening에 의한 압축 잔류응력 효과 대비 비드형상 개선 효과도 동시에 얻을 수 있는 장점이 있다¹⁷⁾.

Fig. 14에 나타낸 것과 같이 두께 3.2mm의 포스코 780MPa급 고버링강의 double lap joint MIG 용접부에 레이저 defocus 드레싱을 최적화한 후, $R=0.1$ 조건에서 피로특성을 평가한 결과, 피로강도 270MPa 이상을 만족하였다. 피로파손 위치 또한 모재에 근접한

Fig. 14 Cross-sectional micrographs of 780HB steel weld joints prepared by MIG welding and laser-defocus dressing (after fatigue test)¹⁶⁾

드레싱 토우로 이동한 것을 알 수 있다.

한편 포스코 특허기술에 따르면 크기 $80\mu\text{m}$ 이하의 경질입자를 3.0MPa의 분사압력으로 용접토우에 피닝 처리를 하는 μ -shot peening 기술을 소개하였다. 이를 통해 압축응력 부여 및 표층부의 초미세 나노결정립화가 가능하여 용접부 피로강도 향상이 가능하다^{18,19)}. 또한, shot blasting 효과에 의해 용접토우에 형성되는 슬래그 제거도 가능하여 도장 밀착성 및 도장후 내식성 향상도 가능할 것으로 보인다⁴⁾.

고강도 샤시부품 용접부의 내식성 및 내구성능 향상 관점에서 JFE Steel은 용접토우의 슬래그 형성 자체를 줄이기 위한 용접 보호가스 및 용접재료의 영향을 검토하였다. 통상의 $\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$ 대비 $\text{Ar}+5\%\text{CO}_2$ 보호가스 및 이에 적정한 용접재료를 적용하여 용접부 도장후 부식시험에 의한 15년 상당의 부식 용접부를 구현한 후 용접부의 벤딩 피로특성을 평가한 결과, 기존 대비 피로강도가 약 1.7배 향상됨을 확인하였다²⁰⁾.

3. 결 론

본 리뷰논문에서는 자동차 샤시부품용 고강도강재 용접부 내구성능 향상기술의 최신 연구개발동향과 향후전망을 살펴보았으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 강재의 강도 증가에 따른 피로강도 상승분 대비 용접부의 피로강도 상승분은 매우 미미하며, 고강도강재의 용접부 피로특성 향상을 위해서는 기계적인 관점에서 용접비드의 곡률반경을 확대하여 응력집중을 저감하는 것이 중요하다.

2) 야금학적인 측면에서 용접토우의 CGHAZ 재질 개선을 통해 용접부의 피로강도 향상이 가능하나, 전반적으로 CGHAZ가 모재 대비 피로강도가 높으므로 실제 용접부의 피로특성에 미치는 재질의 영향은 비드형상 영향 대비 크지 않다.

3) 일본, 유럽 및 미국의 선행 연구 결과에 따르면 용접재료의 고강도화, 순Ar 안정화 및 저온변태 특성구현을 통해 고강도강재 용접부의 피로 강도 향상이 가능하므로 향후 용접재료의 국산화 개발에 대한 검토가 필요하다.

4) 국내외 자동차 샤시부품용 용접부 후처리 기술은 타격핀 또는 샷 피닝이 소개되었고, 국부 재용융 기술은 플라스마 아크 또는 TIG 드레싱 기술이 검토되었으며, 레이저 defocus 빔을 활용한 드레싱 기술도 제시되었다. 또한 샤시부품 용접부의 도장후 내식성 및 내구성능을 동시에 향상시킬 수 있는 용접 기술 개발도 필요하다.

5) 북미 Auto Steel Partnership (A/S-P)의 Chassis Projects 분과에서는 용접부 피로강도비 0.8 이상을 확

보할 수 있는 가이드라인 도출 연구가 진행중에 있으며, 향후 초고강도 강재의 용접부 내구성능 향상기술 개발이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

ORCID: Gyuyeol Bae : <http://orcid.org/0000-0002-2803-0119>

ORCID: Hongchul Jeong : <http://orcid.org/0000-0002-2051-9438>

References

1. Advanced MAG and MIG Welding Wires, Meeting Car Manufacturing Requirements for Fast and Efficient Welding, *KOBELCO Technical Highlight*, 12 (2015) (<http://www.kobelco-welding.jp/education-center/technical-highlight/vol12.html>)
2. Reiichi Suzuki et al., Expansion of MX-MIG process as Pure Ar Gas Shielded Welding Method - for Carbon Steel, *KOBELCO Technology Review* 32 (2013), 24-32
3. Sindo Kou, Residual Stresses, Distortion, and Fatigue, *Welding Metallurgy 2nd Edition* Ch. 5 (2013), 122-141
4. Shinji Kodama et al., Arc Welding Technology for Automotive Steel Sheets, *Nippon Steel Technical Report* 103 (2013), 83-89
5. Dave Anderson et al., Fatigue Performance of AHSS GMAW Lap Joints, *Great Designs in Steel* (2007)
6. Zhili Feng et al, Fatigue Performance of Advanced High-Strength Steels (AHSS) GMAW Joints, *SAE International* 2009-01-0256, <https://doi.org/10.4271/2009-01-0256>
7. Godwin Kwame Ahiale et al., Microstructure and fatigue resistance of high strength dual phase steel welded with gas metal arc welding and plasma arc welding processes, *Metals and Materials International* 19(5) (2013), 933-939, <https://doi.org/10.1107/s12540-013-5005-3>
8. Japanese Patent 2013-220431
9. Abdel-Monem El-Batahy, Influence of HAZ microstructure and stress concentration on fatigue strength of welded structural steel, *Materials Letters* 21 (1994), 415-423 [https://doi.org/10.1016/0167-577x\(94\)90252-6](https://doi.org/10.1016/0167-577x(94)90252-6)
10. Korean Patent 10-1639905
11. Shinji Kodama et al., Improvement of fatigue strength in fillet lap joints of high strength thin plates by using high strength welding wire, *Japan Welding Society 2016 Fall Conference*
12. Zhili Feng et al., Improving Fatigue Performance of AHSS Welds, *ORNL/TM-2014/680* (2014) <https://doi.org/10.2172/1209200>
13. Japanese Patent 2014-004609
14. Japanese Patent 2014-014831
15. Kwang Bok Lee et al., Development of Durability Enhancement Technology for Arc Weldings in Advanced High Strength Steel (AHSS) Chassis Parts, *Journal of Welding and Joining* 33(4) (2015), 50-56 <https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.4.50>
16. Korean Patent 10-1720087
17. Sakino Yoshihiro et al., Fatigue Life Enhancement of Fillet and Butt Welded Joints after Laser Peening, *Transactions of JWRI* 41(1) (2012), 71-76
18. Korean Patent 10-1639921
19. W. B. Lee et al., Strengthening Dual Phase Steel Welds by Shot Peening, *ISIJ International* 49(12) (2009), 1972-1974, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1972>
20. JFE Steel Corp., Development of corrosion resistance and fatigue strength improvement welding technology of chassis parts, *Japan Welding Society 2015 Fall Conference*