



이상조직강의 가스 메탈 아크 용접 겹치기 용접부의 피로 강도 및 파괴 거동

Fatigue Strength and Fracture Behavior for Overlap Weldment of Gas Metal Arc Welding in Dual Phase Steel

김선진* · 손명균***† · 박정훈*** · 란도 데와***
 Seon-Jin Kim*, Myung-Koon Son***†, Jeong-Hun Park*** and
 Rando Tungga Dewa***

(Received 24 January 2018, Revision received 05 March 2018, Accepted 01 April 2018)

Abstract: The aim of this study is to investigate a high cycle fatigue properties and fracture behavior of overlap joint weld by gas metal arc welding for various weld root gaps existence in Dual Phase steel which is one of popular Advanced High Strength Steels. The results of a load-controlled fatigue tests showed a reduction of fatigue strength due to the effects of overlap welding geometry and weld root gap existence between upper and lower sheet. The fatigue life was also decreased with increasing in weld root gap length. In addition, four modes of fracture behavior were observed in accordance with weld root gap length and applied loading stress levels. SEM investigation for fractured specimens showed that the crack initiation occurred in multiple sites from weld toe and roots. Striations and micro cracks were also noticed in the propagation area. Thus dimple and voids were observed in the final fracture area and occurred simultaneously with necking phenomenon.

Key Words : Dual Phase Steel, Gas Metal Arc Welding, Overlap Root Gap, High Cycle Fatigue Test, Dimple

1. 서 론

차량 경량화를 위한 자동차 차체 부품의 재료로 널리 사용되고 있는 첨단 고강도강(Advanced High Strength Steel)은 기존 고강도강의 높은 강도의 증가에 따른 연성의 손실과 성형성 저하를 보완하는 강재이다. 높은 강도와 향상된 성형성을

모두 만족하는 재료이며, 또한 자동차 연비를 개선시키고, 안전 측면에서 충돌 에너지 흡수 향상 목적으로도 자동차 차체 및 프레임 재료로 사용이 증대되어 왔다.

첨단 고강도강 중 하나인 이상조직강(Dual Phase Steel)은 강한 성질의 마텐사이트와 연한 성질의 페라이트 두 종류의 금속 조직이 공존하여 높은

***† 손명균(교신저자) : 한국 GM

E-mail : myungkoon.son@gm.com, Tel : 032-520-0645

*김선진 : 부경대학교 기계설계공학과

***박정훈, 란도 데와 : 부경대학교 대학원 기계설계공학과

***† Myung-Koon Son(corresponding author) : GM, Korea.

E-mail : myungkoon.son@gmail.com, Tel : 032-520-0645

*Seon Jin Kim : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyung National University.

***Jeong-Hun Park, Rando Tungga Dewa : Dept. of Mech. Design Eng., Graduate School, Pukyung National University.

최대 인장 강도와 낮은 항복강도를 모두 제공하고 있으며, 자동차 산업에서 요구하는 우수한 용접성 및 부식저항성도 가지고 있다. 이상조직강은 차량용 차체와 프레임의 점 용접(spot welding)을 통해 적용되던 것에서 최근에 들어 상대적으로 두꺼운 판재로 가스 메탈 아크 용접(Gas Metal Arc Welding)을 통해 로우어 콘트롤 암(lower control arm), 튜블라 엑슬 빔(tubular axle beam) 등과 같은 현가 장치용 부품 재료로도 사용되고 있는 추세이다.¹⁻⁷⁾

현재까지 차체 강판용 고강도강의 용접 부 피로 수명에 영향을 미치는 인자는 Hong⁹⁾과 Godwin¹⁰⁾ 등에 의해 용접 비드의 형상과 용접 길이 등이 영향을 미치는 것으로 연구되어져 왔다. 하지만, 차체용 판재로 사용될 때와 달리 현가장치 부품의 판재로 사용되는 경우, 상대적으로 두꺼운 판재 사용과 보다 복잡한 형상 인해 상하판의 겹침 용접부에서 용접 루트 갭이 필연적으로 발생하게 된다.⁸⁻¹¹⁾

이에 본 연구에서는 겹치기 용접부에 존재하는 용접 루트 갭이 피로 성능에 미치는 영향과 파괴 특성을 연구하기 위하여 이상조직강 모재 피로 시험편과 가스 메탈 아크 겹치기 용접 피로 시험편을 용접 루트 갭 크기별로 제작하여 고주기 피로 시험을 진행하였다. 그리고 모재의 조직과 겹치기 용접부 용접형상을 확인하기 위해 광학 현미경(optical metallography)를 이용하여 관찰하였고, 피로 파괴 거동을 확인하기 위해 피로시험 파 단면을 주사 전자 현미경(scanning electron microscope)을 사용하여 확인하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 DP590강 모재의 화학적 구성 성분은 Table 1과 같으며, 별도 인장 시험을 통해 얻어진 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 조직 관찰을 위해 경면 연마를 하였고, 부식 처리는 나이탈액 5%로 약 15초간 부식하여 광학 현미경으로 관찰하였다. Fig. 1에 보듯이 모재의 미세 조직은 이상화조직강의 대표적인 조직인 다각형 페

라이트와 부정형 마텐사이트로 두 조직이 공존하며 구성되어 있는 것으로 나타났다.²⁾

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 피로시험편의 형상과 치수 및 겹치기 용접과정을 나타낸다.



Fig. 1 Microstructure of Dual Phase Steel; white phase : martensite, darker phase : ferrite

Table 1 Chemical Composition (%)

C	Si	Mn	P	S
0.0733	0.027	1.652	0.0267	0.0019

Table 2 Mechanical properties

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
682	441	26.9

2.2 용접 조건과 제작 시편

본 실험에 사용된 재료는 DP590HR(hot roll), 두께 3.2 mm 열간압연 강판이며, 시험편의 채취는 압연 방향을 길이 방향으로 채취하였다. 겹치기 용접 피로시험편 제작은 압연 강판을 압연 방향으로 동일하게 두 장의 판재를 겹쳐 놓고 상판과 하판 용접 루트 갭 크기별(root gap length = 0, 0.5, 1.0, 1.5 mm)로 4종이 제작되었으며, 적용된 가스메탈 아크 용접 조건은 실제 생산 제품 양산 조건으로 Table 3과 같다. 시험편 가공은 와이어 방전 커팅기로 ASTM E466에 따른 크기로 절단되었다. 겹치기 용접 시험편은 Heo⁽¹³⁾의 연구에서와 같이 시험 시 하중 작용 축을 시험편과 일치시키고, 시험편을 시험기에 장착 시 변형을 방지하기 위하여 동일 두께의 판재를 그림부 양 끝단에 추가 부착하였다.¹²⁻¹³⁾

Table 3 Welding Condition

Current (A)	240
Voltage (V)	24
Speed (cm/min)	60
Input	3 PHASE AC 200/220V, 50/60Hz, 3kVA

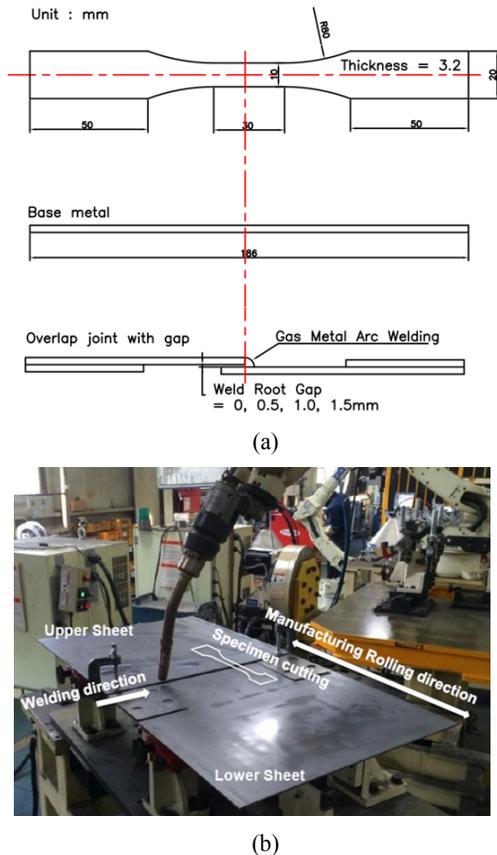


Fig. 2 HCF specimen with ASTM E466: (a) shape and dimensions; and (b) GMAW process with overlap sheet for fatigue test specimen.

2.3 용접부와 미세조직

Fig. 3은 광학현미경으로 관찰된 용접부 조직을 분류하고 그림으로 나타낸 것으로, 용접부를 용융부와 열영향부 및 모재부 3 영역으로 분류하고, 열영향부는 조대립 열영향부와 세립 열영향부로 다시 두 영역으로 분류하여 전체 4 영역으로 구분

하였다. 이는 GMAW 용접이 진행되는 동안 용융부 온도가 Ac3 이상으로 증가된 다음 급냉이 되면서 복합 조직의 변형된 결과로 판단된다.

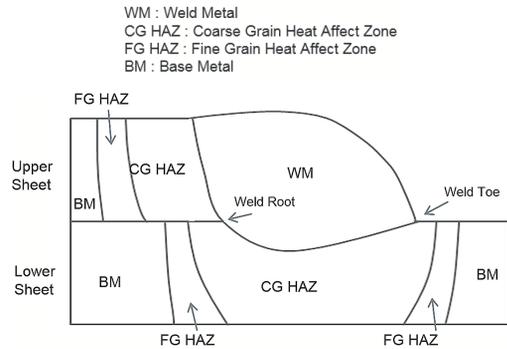


Fig. 3 Schematic diagram of cross section of overlap welding

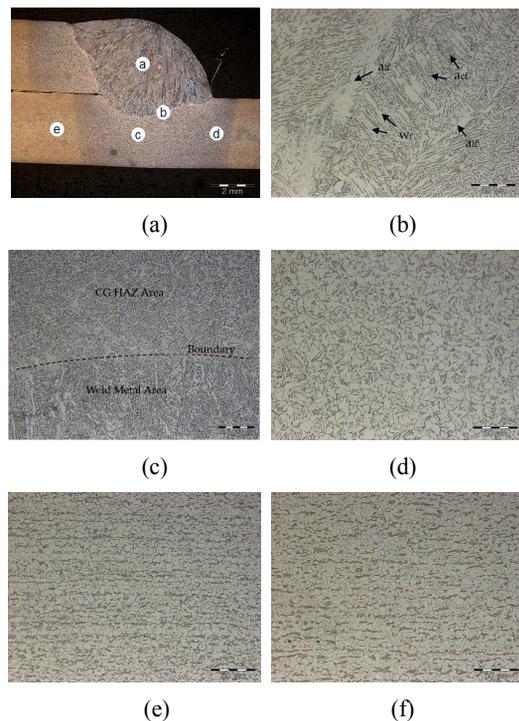


Fig. 4 Microstructures of different zone of GMAW Overlap Welded DP590; (a) Positions of microstructure, (b) WM, (c) Boundary between WM and HAZ, (d) CG HAZ, (e) FG HAZ, (f) BM

Fig. 4는 겹치기 용접부 용접 단면의 각각 다른 영역의 미세조직의 사진을 나타내고 있으며, Fig. 4(a)에 전체 촬영된 위치를 표시하였다.

Fig. 4(b) 용융부의 경우, 3가지 형태의 페라이트가 불규칙적으로 구성이 되어 있으며, 짧은 바늘 형태의 불규칙한 가시형 페라이트(acf : Acicular Ferrite)와 일정한 형태가 없는 타형 페라이트(alf : Allotrimorphic Ferrite)가 나타났으며, 마지막으로 측면 판상형 페라이트(wf : widmanstatten ferrite)가 관찰되었다. Fig. 4(c)에서는 용융부와 열영향부의 경계부가 확연하게 구분되어져 있는 것을 볼 수 있으며, Fig. 4(d)에서는 모재와 세립열영향부에 대비하여 조대한 입자가 나타났다. 각 용접 루트 갭 크기별 시험편에서도 Sushovan¹⁴⁾의 연구에서와 같이 미세조직의 구분 및 분포가 유사 경향을 보였다.^{14,15)}

3. 피로 시험 결과 및 고찰

3.1 피로시험 및 결과

가스메탈아크 겹치기 용접부에 대한 피로 강도에 미치는 용접 루트 갭의 영향을 알아보기 위해 실시한 고주기 피로시험은 MTS 370 (MTS systems co., USA, 100 KN, 1500 mm) 유압제어식 만능시험기를 사용하였으며, 시험 조건은 하중비 R=0.1, 시험 속도 10 Hz로 일정 진폭 하중을 정현 파로 인가하여 피로 시험을 실시하고 파단이 없을 시 10⁶ cycle에서 시험을 중단하였다. 겹치기 용접 피로 시험편에 인가된 응력은 관련 연구에서 측정된 0.5 mm 루트 갭 시험편의 인장 전단 강도 40% 수준(210MPa)을 기준으로 파단시 10% 씩 저감하면서 시험을 실시하였다.

Fig. 4는 고주기 피로 시험의 결과를 나타낸 것으로, 겹치기 용접 시험편과 모재시험편 전체의 응력-수명 선도를 보여주고 있다. 피로 시험 결과를 근거로 응력-수명 관계식은 응력수준 $\Delta\sigma$ 와 피로 수명 N_f 를 상수 A, b와 함께 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 4에 회귀 계수 (regression coefficient)를 나타내었다.

$$\Delta\sigma = A(N_f)^b \tag{1}$$

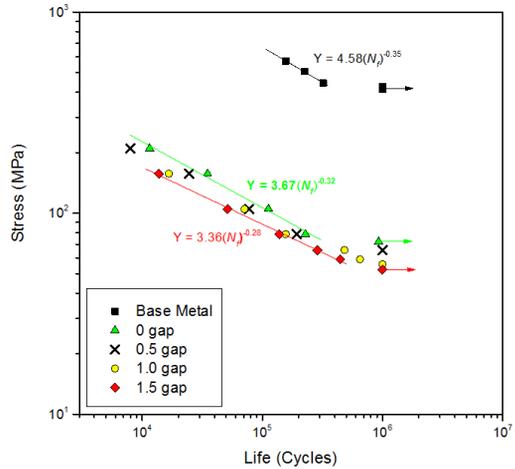


Fig. 5 High cycle fatigue S-N curves of DP590 base metal and overlap weld specimens

Fig. 5에서 보여 주듯이 이상조직강 모재시험편은 인장 강도 대비 약 75% 수준에서 피로한도를 보였고, 겹치기 용접 피로시험편은 모재 시험편 피로 한도 대비하여 80% 이상의 피로한도 감소율을 보였다. 그리고 같은 응력 레벨에서 용접 루트 갭이 클수록 피로수명이 짧게 나타났으며, 응력-수명 선도는 용접 루트 갭이 증가함에 따라 좌측으로 이동하며 다소 완만해지는 경향을 보였다. 겹치기 용접 피로 시험편에서 1.5 mm 시험편의 피로 한도는 0 mm 용접 루트 갭 시험편에 대비하여 추가적으로 27% 감소함을 나타내었고, 루트 갭이 증가함에 따라 피로 수명의 저하 및 피로 한도의 감소를 나타내는 것을 확인하였다. 겹치기 용접 피로 시험편은 용접 토우 부 또는 루트 갭 부에서 파단이 발생하였는데, 이는 겹치기 용접부 형상의 불연결성이나 용접 루트 갭의 존재로 인해 높은 응력 집중이 발생한 결과로 생각된다.^{8,17)}

겹치기 피로 시험편의 경우 고주기 피로 시험에서 같은 응력 조건이라도 시험편의 용접 루트 갭 크기에 따라 다른 파단 양상을 보였다. Fig. 6는 피로 시험 후 파단된 겹치기 피로 시험편의 파단 양상을 4가지 모드로 구분한 것이다. 소성 변

형 여부와 파단 위치 등에 따라 분류하고 Table 4와 같이 정리하였다. 소성 변형을 동반하고 시험편 하판 용접 토우 부에서 파단 된 모드 A, 소성 변형을 동반하여 균열이 토우 부 및 루트 부 두 곳에 발생한 모드 B, 변형 없이 하판 용접 토우 부에서 발생한 모드 C, 마지막으로 변형 없이 상판 용접 루트 부에서 파단 된 모드 D로 구분하였다.

Table 5에서 보듯이 같은 용접 루트 갭 시험편이라도 인가된 응력에 따라 파단 양상이 변형을 동반한 하판 용접 토우 부 파단의 모드 A에서 저 응력 영역에서는 변형을 동반하지 않고 하판에서 파단되는 모드 C로 변화되었다. 0.5~1.5 mm 시험

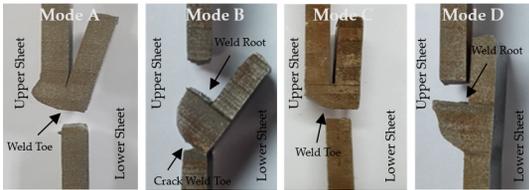


Fig. 6 Typical of fractured specimens distinguished by fracture mode

Table 4 Comparison of fracture modes

Fracture Mode	Deformation	Fracture location	Crack point
Mode A	Yes	Lower	1 point
Mode B	Yes	Upper	2 point
Mode C	No	Lower	1 point
Mode D	No	Upper	1 point

Table 5 Distinguished modes based on stress level and fatigue life

Stress (MPa)	Fatigue Life (cycles)				Stress Level
	0gap	0.5gap	1.0gap	1.5gap	
210	11,544	8,000	-	-	High
157	34,997	24,525	16,682	13,782	
105	112,602	77,409	71,041	51,243	Low
79	228,321	192,667	156,579	138,052	

* light blue : mode A, dark blue : mode B, light yellow : mode C, dark yellow : mode D

편에서도 변형여부는 인가된 응력 수준에 영향을 받는 동일한 경향을 나타냈다. 그리고 같은 응력 수준이라도 루트 갭의 크기에 따라 파단 양상이 변경되는 현상이 고 응력과 저 응력 영역에서 동일하게 나타났다. 고 응력 수준의 시험에서는 0 mm 루트 갭 시험편이 시험 하판 용접 토우 부 파단 양상(모드 A)에서 0.5~1.5 루트 갭 시험편은 변형을 동반하며 파단이 상판 용접 루트 부로 이동하고, 균열이 하판 용접 토우 부에서도 발생하는 파단(모드 B)으로 변경되었다. 저 응력에서도 변형이 없는 하판 파단(모드 C)에서 1.5 mm 루트 갭 시험편의 경우는 상판의 루트 부 파단으로 파단위치가 변경되었다. 같은 응력 조건에서 파단의 위치와 균열의 발생은 루트 갭의 크기에 영향을 받는 것으로 판단되며, 루트 갭의 존재 유무와 갭 크기가 증가함에 따라 응력 집중부의 위치가 변경되고, 노치 효과가 상승되는 것으로 생각된다.^{13,14,18)}

3.2 피로파괴 파단면 분석

Fig. 7은 대표적인 모재 피로 시험편의 피로 파단면 사진으로 인가된 하중은 모재의 최대 인장 하중의 70% 수준이며, 약 32만 사이클에서 파단되었다. 그림에서 보듯이 균열은 좌측면에서 시작하여 중심부를 지나 최종 파단되었고, 여러 곳에서의 초기 균열 발생과 피로 균열 스트라이에이션을 확인할 수 있으며, 최종 파단부에서는 연성과 파괴의 특징인 딴플과 넥킹 현상을 보였다.

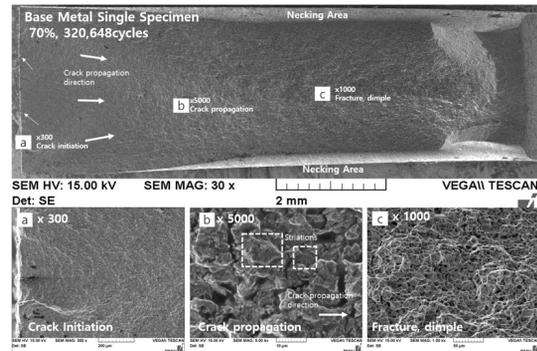


Fig. 7 Typical SEM images of fatigue fracture surface for DP 590 steel base metal specimen

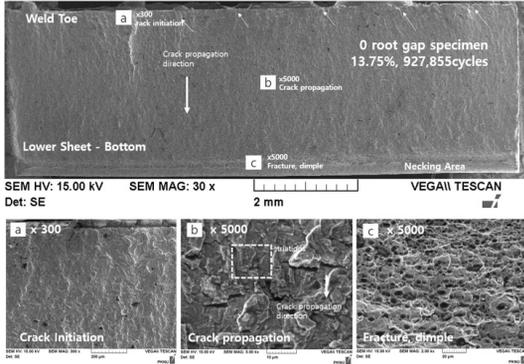


Fig. 8 SEM images of fractured overlap welding specimen with 0mm root gap, and 13.8% stress level & 927,855cycles

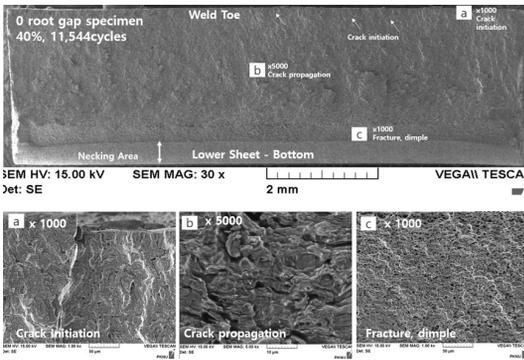


Fig. 9 SEM images of fractured overlap welding specimen with 0mm root gap, and 40% stress level & 11,544cycles

Fig. 8과 9는 같은 0 mm 루트 갭 시험편의 사인으로 각각 다른 피로 수명을 나타내고 있다.

Fig. 9는 고 응력의 상대적으로 짧은 1.1만 수준의 파단 수명을 가진 파단면에 비해 Fig. 8의 경우는 저 응력에서 파단되고, 92만 수준의 장 수명을 가진 넓은 피로균열 진전 구간을 보여 주고 있다. 반면에, 고 응력의 Fig. 9의 최종 파단면이 상대적으로 넓게 나타났으며, 피로 파괴 파단면의 거칠기도 고 응력일수록 상대적으로 불 균질한 파단면을 보였다.

Fig. 8, 9의 두 시험편은 동일하게 용접 토우 부에서 초기 균열이 발생하였으며, 피로 균열 진전

부에서 스트라이에이션과 미세 균열이 관찰되었다. 최종 파단부에서는 연성파괴의 특징인 딴플이 확인되었고, 모재 시험편과 같이 최종 파단 시 넥킹 현상이 확인되었다. 루트 갭의 크기에 따라서 또한 응력에 따라 파단 위치 및 양상은 달랐으나, 초기 균열, 피로 균열 진전, 최종 파단 및 연성 파괴현상은 동일한 경향을 보였다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 이상조직강에 대한 가스 메탈 아크 용접의 겹치기 용접부의 피로 강도 특성을 평가하고 파단면을 검사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모재 시험편에 비해 겹치기 용접 시험편의 피로 강도가 크게 저하되는 결과를 보였으며, 같은 응력레벨에서 용접 루트 갭 크기 증가에 따라 피로강도가 감소하는 경향을 나타냈다.
- 2) 피로 시험에 인가된 응력 수준과 겹치기 시험편의 용접 루트 갭의 크기에 따라 최종 파단 위치 및 굽힘 변형 동반 여부 등이 다르게 나타났다.
- 3) 이상조직강 겹치기 피로시험편 최종 파단 영역에서 딴플 파괴와 넥킹 현상이 발견되었다. 이는 최종 파단시의 연성 파괴의 양상을 보여주는 것으로 판단된다.

References

1. Xu. J. Zhang, Y. S. Xinmin, Lai, Chen, 2008, "Experimental investigation of fatigue performance of spot welded dual phase sheet steels", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 13, No. 8, pp. 726-731.
2. Danyang. D, Yang. L, Yuling. Y, Jinfeng. L, Min. M, Tao, 2014, "J. Microstructure and dynamic tensile behavior of DP600 dual phase steel joint by laser welding", Material Science & Engineering, Vol. 594, pp. 17-25.
3. Koo. J. S, Choi. J. S, Jeon. T. R, Huh. Y. H, Lee. H. M, 2005, "Evaluation of Tensile and

- Low Cycle Fatigue Properties of High Strength Steel DP590", Korean Society of Automotive Engineers Spring Congress, pp. 919-924.
4. Apple. C. A, Fountoulakis. S. G, Kelly. S. C, Gentilcore. M. L, 2004, "Hot-Rolled 590 MPa Tensile Strength Dual Phase Steel For Structural Automotive Components", Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, No. 2004-01-0504, ISBN 0-7680-1424-7.
 5. Kornel. M, Eszter. K, Pasquale. R. S, 2016, "Gas metal arc welding of dissimilar AHSS sheets", Materials and Design, Vol. 109, pp. 615-621.
 6. M. K. Son, S. J. Kim, 2017, "Study of Influence of Gas Metal Arc Weld Overlap Root Gap for Tensile Shear Strength and Fracture Behavior", Fall Conference of The Korean Society for Power System Engineering.
 7. M. K. Son, S. J. Kim., 2017, "Study of Influence of Weld Root Gap on the Fatigue Strength of GMAW Overlap Welding and Fatigue Fracture Behavior", Fall Conference of The Korean Society for Power System Engineering.
 8. Hong. T. K, Abolhassan. K, Todd. L, John. B, Mark. A, Hua-Chu. S, 2011, "The Effect of Welding Dimensional Variability on the Fatigue Life of Gas Metal Arc Welded Joints", Society of Automotive Engineers Int. J. Mater. Manuf. 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 298-313.
 9. Godwin. K. A, Oh. Y. J, 2014, "Microstructure and fatigue performance of butt-welded joints in advanced high-strength steels", Material Science & Engineering, Vol. 597, pp. 342-348.
 10. Zhili. F, Yan. S, Chonghua. J, John. C, Min. Kuo, 2009, "Fatigue Performance of Advanced High-Strength Steels (AHSS) GMAW Joints" SAE International, 2009-01-0256, ISSN 0148-7191.
 11. Catherine. M. A, Lai. W. J, Lee. J. W, Pan. J, 2014, "Failure modes of gas metal arc welds in lap-shear specimens of high strength low alloy (HSLA) steel", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 131, pp. 74-99.
 12. ASTM E466, Standard Practice for Conduction Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, 2002.
 13. Heo. C, Kwon. J. W, Cho. H. D, Choi. S. J, Chung. W. Y, 2012, "Evaluation of Fatigue Behavior for Laser Welded High Strength Steel Sheets (SPFC590)", Trans of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 53-64.
 14. Sushovan. B, Tapan. K. P, Mahadev. S, 2016 "High-cycle fatigue behavior of MIG Brazed galvanized DP600 steel sheet join-effect of process parameters.", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 82, pp. 1197-1211.
 15. Sindo. K, 2002 "Post-Solidification Phase Transformations. In Welding Metallurgy", 2nded, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NewJersey, USA, pp. 232-237
 16. Khan. M. S, Bhole. S. D, Chen. D. L, Biro. E, Boudreau. G, Deventer. J. V, 2009, "Welding behavior, microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot welds between galvanized HSLA350 and DP600 steels", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 14, No. 7, pp. 616-625.
 17. Kim H. J, Kang. S. W, Kim. M. H, 2011, "Fatigue Assessment of High Strength Steel with Butt Welded Joints for the Root Gap Difference.", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 1, pp. 56-61.
 18. Miyazaki. Y, Furusako. S, 2007, "Tensile Shear Strength of Laser Welded Lap Joints", Nippon Steel Technical Report.