Ferrite-Bainite dual phase 강의 피로균열진전 특성 평가

김덕근* · 조동필* · 오동진* · 김명현*,†

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

A Study of Fatigue Crack Growth Behaviour for Ferrite-Bainite Dual Phase Steel

Deok-Geun Kim*, Dong-Pil Cho*, Dong-Jin Oh* and Myung-Hyun Kim*,†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received August 28, 2015 ; Revised October 6, 2015 ; Accepted November 25, 2015)

Abstract

With the recent increase in size of ships and offshore structures, there are more demand for thicker plates. As the thickness increases, it is known that fatigue life of the structures decrease. To improve the fatigue life, post weld treatments techniques, such as toe grinding, TIG dressing and hammer peening, are typically employed. However, these techniques require additional construction time and production cost. Therefore, it is of crucial interest steels with longer fatigue crack growth life compared to conventional steels. This study investigates fatigue crack growth rate (FCGR) behaviours of conventional EH36 steel and Ferrite-Bainite dual phase EH36 steel (F-B steel). F-B steel is known to have improved fatigue performance associated with the existence of two different phases. Ferrite-Bainite dual phase microstructures are obtained by special thermo mechanical control process (TMCP). FCGR behaviours are investigated by a series of constant stress-controlled FCGR tests. Considering all test conditions (ambient, low temperature, high stress ratio), it is shown that FCGR of F-B steel is slower than that of conventional EH36 steel. From the tensile tests and impact tests, F-B steel exhibits higher values of strength and impact energy leading to slower FCGR.

Key Words : Fatigue crack growth rate, Dual phase steel, Ferrite-Bainite

1. 서 론

최근 선박 및 해양구조물의 대형화로 인해 사용되는 강재의 두께도 점차 증가하고 있다. 강재 두께의 증가로 인해 피로 수명은 저하되지만, 설계 강도의 확보를 위하여 불가피하게 강재의 두께를 증가시키고 있는 실정이다¹⁾. 특히, 12,000 TEU 이상의 대형 컨테이너선의 경우 두께 80 mm 이상의 고강도 강재를 해치 코밍 부분에 적용하고 있으며, 이로 인한 피로 파괴의 위험성은 더욱 높아지고 있다. 이에, 구조물의 설계 강도를 확보하는 범위 안에서 피로 수명을 증가시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다²⁻⁴⁾.

IIW (International Institute of Welding)에서는 선박 및 해양구조물의 피로 수명을 증가시키기 위해 다

양한 용접부 후처리 방법을 제안하고 있다⁵⁾. 이는, 주로 기계적인 가공(toe grinding, TIG dressing)을 통해 용접 Toe부의 형상을 개선하거나, 기계적인 충격을 통해 용접부 표면에 압축 잔류응력을 생성시켜 피로 수명을 증가시키는 방법들(hammer peening, high frequency mechanical impact)로써, 이러한 방법들은 피로 강도 증가 측면에서 뛰어난 효과를 보이는 것으로 알려져 있다⁶⁾. 하지만 용접부 후처리 방법에 대한 제약 조건과 생산 시수 및 부대비용의 증가는 경제성 측면에서 적절한 방법의 선택에 대한 어려움을 주고 있다. 이에 따라, 선주 및 선급에서는 구조물의 피로 수명 확보를 위해 균열정지 특성이 확보된 강재의 개발 및 적용을 요구하고 있다.

최근 TMCP (Thermo mechanical control process) 공정 적용을 통한 균열정지 특성이 확보된 강재 개발에

대한 많은 연구가 수행되고 있다. 일반적인 TMCP 공정은 압연 공정 후, 500 - 800℃ 범위의 온도로 물을 이용하여 가속 냉각하여 상온으로 공냉을 실시한다. 하지만, Guan 등은 일반적인 TMCP 공정과 달리 강재를 800℃에서 1시간 유지한 뒤 물을 이용하여 상온으로 가속 냉각을 실시하고, 200℃의 온도에서 30분간 tempering을 수행하여 기존 강재 대비 bainite 함유량이 증가된 강재(F-B steel, Ferrite-Bainite dual phase steel)를 개발하였다⁷⁾. 2차 상변태에 의해 생기는 bainite 조직은 균열 진전에 큰 영향을 미친다. 이에, 본 연구에서는 열처리를 통해 균열 정지 특성이 확보된 강재(F-B steel)와 기존의 EH36 steel에 대한 피로균열진전 특성을 비교, 분석하였다. 또한, 피로균열진전 시험을 통해 두가지 온도(ambient 및 -10 ℃)와 두가지 응력비($R = 0.1$ 및 0.5)에 의한 영향을 고찰하였다.

2. 재료 및 기계적 특성

2.1 화학조성

본 연구에서 사용된 F-B steel과 EH36 steel은 각각 ASTM A131의 EH36 강재이며, F-B steel의 경우 TMCP 과정 중 통상적인 냉각속도보다 더 빠른 냉각속도로 제어함으로써 bainite 조직을 생성하였다⁸⁾. 두 강재에 대해 화학조성 분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

분석 결과 ASTM A131에서 요구하고 있는 EH36 강재의 화학조성을 모두 만족하였으며 두 강재의 화학성분에는 큰 차이가 나타나지 않았다.

2.2 인장 및 충격인성 시험

EH36 steel과 F-B steel에 대한 인장 시험 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 인장 시험 결과 ASTM A131의 최소 기준치를 모두 만족하였고 F-B steel이 EH36 steel 대비 항복강도는 평균 40 MPa (약 11%), 인장강도는 평균 9 MPa (약 2%) 높게 나타남을 확인하였다.

ASTM A131의 충격인성 최소 기준치 만족 여부 확

Table 2 Results of tensile test

	Elongation (%)	Yield stress [MPa]	Tensile stress [MPa]
ASTM A131	22 min.	355 min.	490-620
F-B steel	36-42	419-422	515-534
EH36 steel	35-36	364-397	510-521

Fig. 1 Results of impact test

인을 위해 -40℃에서 충격인성 시험을 실시하였고 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. 두 강재 모두 ASTM A131에서 제시하는 충격인성 최소 요구치 34J를 크게 상회하는 것을 확인하였다. 또한, 압연을 통해 제작된 강재이므로 1/2t 보다 1/4t에서 F-B steel의 경우 평균 49J (약 41%), EH36 steel의 경우 평균 41J (약 35%) 높게 나타났다. F-B steel이 EH36 steel 대비 1/4t에서 평균 11J (약 7%), 1/2t에서는 평균 3J (약 3%) 높게 나타났다. 충격인성 시험 결과를 통해 통상적인 TMCP 과정으로 생산되는 EH36 steel과는 달리 화학조성은 변화시키지 않고 급랭공정을 추가하여 생산된 F-B steel은 bainite가 생성되어 물성시험 결과 항복강도, 인장강도 및 충격인성 모두 향상되는 것으로 판단된다.

3. 피로균열진전 시험 및 결과

3.1 시험 방법

피로균열진전 시험은 ASTM E647에 따라 CT (Compact

Table 1 Chemical composition for F-B steel and EH36 steel (wt%)

	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	Ceq
ASTM A131	<0.18	0.9-1.6	0.1-0.5	<0.035	<0.035	>0.015	0.02-0.05	0.05-0.1	<0.02	<0.35	<0.2	<0.4	<0.08	<0.38
F-B steel	0.124	1.327	0.288	0.013	0.004	0.053	<0.001	0.001	0.011	0.006	0.019	0.007	0.002	0.35
EH36 steel	0.123	1.333	0.290	0.013	0.004	0.053	<0.001	0.001	0.011	0.007	0.019	0.007	0.002	0.35

Fig. 2 Dimension of FCGR specimen

Table 3 FCGR test conditions

Temperature		Stress ratio	
Ambient	-10℃	0.1	0.5

tension) 시험편의 형상으로 결정하였다⁹⁾. 이때, F-B steel과 EH36 steel의 피로 시험편의 두께는 10 mm이며 시험편 형상은 Fig. 2에 나타내었다. 피로 시험에 사용된 장비는 축 인장/압축 유압 피로 시험기(IMT 8803, INSTRON)를 사용하였고, 피로 하중의 파형은 정현파(Sinusoidal wave), 주파수는 20Hz로 피로균열진전 시험을 수행하였다. 또한, 컨테이너선의 설계온도(-10℃) 뿐만 아니라, 구조 건전성 평가에 활용되는 BS 7910에서 피로균열진전 속도의 저응력비와 고응력비가 나뉘는 응력비 0.5에서 시험을 실시하였으며 시험의 주요 조건은 Table 3에 요약 정리하였다¹⁰⁾.

본 시험에 앞서 기계가공 된 시험편에 날카로운 균열을 생성시키기 위해 ΔK 감소 방법을 사용하였으며, ΔK 감소량은 ΔK 감소율을 $-0.04 \text{ mm}^{-1/2}$ 로 설정하였다. 피로균열진전 시험 수행 중, compliance 방법을 사용하여 균열길이를 측정하기 위해 COD gage (Crack opening displacement gage)를 사용하였으며 균열길이 계산식은 아래 식 (1)과 (2)를 사용하였다.

$$\alpha = a/W = 1.001 - 4.6695u_X + 18.460u_X^2 - 236.82u_X^3 + 1214.9u_X^4 - 2143.6u_X^5 \quad (1)$$

$$u_X = \left\{ \left[\frac{EvB}{P} \right]^{0.5} + 1 \right\}^{-1} \quad (2)$$

여기서, a 는 균열길이(mm), W 는 시험편의 너비(mm),

v 는 COD (mm), B 는 시험편의 두께(mm), P 는 시험편에 작용하는 하중(N)을 의미한다.

이를 통해 얻어진 균열길이를 이용하여 ΔK (Stress intensity factor range)를 아래 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (3)$$

이렇게 계산된 ΔK 를 이용하여 식 (4)에서 제시된 Paris' law를 통해 da/dN - ΔK 선도를 작성하고 균열전파 특성을 나타내는 재료상수인 C 와 m 을 각각 도출하였다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

3.2 시험 결과

미세조직 외에 다른 시험 조건은 동일하게 피로균열진전 시험을 수행하였으며 결과를 피로균열진전 속도(da/dN)와 ΔK 의 선도로 Fig. 3, 4 및 5에 나타내었다. 상온(RT)/응력비 0.1에서의 실험결과, $\Delta K = 30 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}]$ 에서 F-B steel의 피로균열진전 속도가 약 42% 감소하였다. 시험조건을 변경하였을 때, 저온(-10℃, LT)/응력비 0.1 조건에서는 상온(RT)/응력비 0.1의 결과와 마찬가지로 $\Delta K = 30 [\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}]$ 에서 F-B steel의 피로균열진전 속도가 약 24% 더 느린 것을 확인하였다. 하지만 상온(RT)/응력비 0.5의 시험조건에서는 이전 시험결과들과는 달리 피로균열진전 속도에서 큰 차이가 없었다. 상온(RT)/응력비 0.1의 경우와 저온

Fig. 3 Comparison between EH36 steel and F-B steel (Ambient/R=0.1)

Fig. 4 Comparison between EH36 steel and F-B steel (-10°C/R=0.1)

Fig. 5 Comparison between EH36 steel and F-B steel (Ambient/R=0.5)

(-10°C, LT)/응력비 0.1의 경우에서 F-B steel에 함유된 bainite 조직에 의해 피로균열진전 속도가 감소하는 것으로 판단된다.

각 시험 조건에서 재료상수를 Fig. 6과 7에 나타내었다. F-B steel의 경우 시험 조건이 변경되었을 때, 재료상수 m 의 차이는 약 3% 이내로 크게 차이가 나지 않는 경향이 나타났으며, EH36 steel의 경우 재료상수 m 은 최대 약 28% 까지 차이가 나타났다. 두가지 강재 모두 재료상수 C 의 경우 저온에서 가장 낮게 계산되었으며 높은 응력비에서 가장 높은 값이 계산되는 동일한 경향이 나타났다.

시험결과를 통해 도출된 두 강재의 피로균열진전 특성을 나타내는 재료상수(C , m)를 사용하여 각 조건별로 아래 식 (5)를 통해 피로 수명을 계산하였다.

$$N = \int_{a_i}^{a_f} (dN/da) da \quad (5)$$

Fig. 6 Results for material constant 'm'

Fig. 7 Results for material constant 'C'

Fig. 8 Comparisons of fatigue crack growth life

여기서 N 은 피로균열진전 수명, a_i 는 피로 예비균열을 포함한 초기균열길이(13.7 mm), a_f 는 최종균열길이(50 mm)로 선정하였으며 dN/da 는 피로균열진전 속도의 역수이다.

수명을 계산한 결과는 Fig. 8에 나타내었으며 상온(RT)/응력비 0.1에서 F-B steel의 수명은 EH36

steel 대비 약 15% 증가하였으며 저온에서는 약 18% 증가하였다. 상온(RT)/응력비 0.5에서 수명을 계산한 결과 F-B steel의 수명이 EH36 steel 대비 약 5% 수명이 크게 나왔는데 피로균열진전 속도가 크게 차이가 나지 않아 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.

3.3 미세조직 관찰

피로균열진전 속도와 수명이 차이가 나는 원인 분석을 위해 미세조직을 관찰하였다. 파단된 시험편을 이용하여 커팅-마운팅-폴리싱 과정을 거쳐 200배의 배율로 확대하여 촬영하였으며 미세조직 사진을 아래 Fig. 9와 10에 나타내었다. EH36 steel의 경우 ferrite와 pearlite조직이 관찰되었고, F-B steel의 경우 ferrite와 bainite가 혼재된 조직을 나타냈다. 미세조직 관찰 결과에서 나타난 바와 같이 두 강재 모두 ferrite는 동일하게 생성되어 있으나, F-B steel의 경우 EH36 steel에서 나타나는 pearlite와는 달리 bainite 조직이 관측되었다. 미세조직 관찰 결과를 통해 TMCP 강재 제조 시 통상적인 냉각속도보다 빠른 냉각속도로 제어함으로써 bainite 조직이 형성됨을 확인하였다. 기존의 EH36 steel 대비 F-B steel의 강도와 충격인성이 향

Fig. 9 Microstructure of EH36 steel

Fig. 10 Microstructure of F-B steel

상 되었지만 강도가 증가하여도 피로균열진전 속도가 증가한다는 기존의 연구결과가 존재한다¹¹⁾. 이러한 관점에서 bainite 조직에 의해 강재의 균열정지 특성이 나타나는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 미세조직에 따른 EH36 steel 및 F-B steel의 피로균열진전 속도 특성을 측정, 비교 및 검토하고자 하였다. 두 강재에 대해 인장시험, 충격인성 시험 및 피로균열진전 시험 결과 얻어진 연구 성파를 아래와 같이 정리하여 나타내었다.

1) F-B steel과 EH36 steel의 화학조성은 동일하며 서로 다른 TMCP 공정에 의해 미세조직만 변화되었다.

2) 인장시험 및 충격인성 시험 결과 F-B steel이 EH36 steel 대비 항복강도는 평균 40 MPa (약 11%), 인장강도는 평균 9 MPa (약 2%) 및 충격인성은 1/4t에서 평균 11J (약 7%), 1/2t에서 평균 3J (약 3%) 높게 나타났다.

3) 상온/응력비 0.1 및 저온/응력비 0.1에서 피로균열진전 시험 결과, $\Delta K = 30 [MPa \cdot m^{0.5}]$ 기준 F-B steel의 피로균열진전 속도는 EH36 steel 보다 각각 42% 및 24% 더 낮게 나타났으며, 피로균열진전 수명은 각각 약 15% 및 18% 더 높게 나타났다. 상온/응력비 0.5에서는 피로균열진전 속도와 수명이 큰 차이가 나지 않음을 확인하였다.

4) 미세조직을 관찰한 결과 F-B steel에서는 ferrite와 bainite가 혼재된 조직이 나타났으며, EH36 steel은 ferrite와 pearlite 조직이 관찰되었다. 기존의 EH36 steel 대비 F-B steel의 강도와 충격인성이 향상 되었지만 강도가 증가하여도 피로균열진전 속도가 증가한다는 기존의 연구결과가 존재한다. 이러한 관점에서 bainite 조직에 의해 강재의 균열정지 특성이 나타나는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문(저서)은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014H1C1A1073088). 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 GCRC과제의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0030013).

References

1. Wen Jie Xin, Dong Jin Oh and Myung Hyum Kim, A

- study of the Thickness Effect using Structural Stress Approach for Fillet Welded Joints, *Journal of KWJS*, 32-2 (2014), 37-42 (in Korean)
2. Sung Won Kang, Myung Hyun Kim, Jae Young Choi, Wha Soo Kim and Young Min Paik, A Study on the Fatigue Strength Improvement using Weld Toe Burr Grinding, *Journal of KWJS*, 24-2 (2006), 42-47 (in Korean)
 3. Seung Yong Lee and Kab Soo Kyung, A Study on the Fatigue Strength Improvement of the Fillet Welded Connections with respect to Post-Weld Treatment, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28-5A (2008), 665-672 (in Korean)
 4. Jeong Woo Han and Seung Ho Han, Research for Fatigue Life Extension Techniques in Weldments via Pneumatic Hammer Peening, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33-8 (2009), 842-848 (in Korean)
 5. A. Hobbacher, Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07. WRC bulletin 520, *The welding Research Council*, New York, (2007)
 6. Yong Kim and Bo young Lee, Methods for Fatigue Strength Improvement of the Weld Structure (II) - Post Weld Improvement Methods -, *Journal of KWJS*, 30-2 (2012), 105-108 (in Korean)
 7. M. Guan and H. Yu, Fatigue crack growth behaviors in hot-rolled low carbon steels, A comparison between ferrite-pearlite and ferrite-bainite microstructures, *Materials Science & Engineering A*, 559 (2013), 875-881
 8. ASTM, Standard Specification for Structural Steel for Ships, *ASTM A131* (2014), 1-7
 9. ASTM, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, *ASTM E647-13* (2013), 1-50
 10. BSI, Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, *BS 7910* (2013), 1-480
 11. D.F. Laurito, C.A.R.P. Baptista, M. A. S. Torres and A. J. Abdalla, Microstructural effects on fatigue crack growth behavior of a microalloyed steel, *Procedia Engineering*, 2 (2010), 1915-1925