ISSN 2466-2232
Online ISSN 2466-2100

304L 스테인리스 강 용접부의 저주기 피로 성능 평가

황재현* · 오동진* · 이도영** · 전민성** · 김명현*,†

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과
**삼성중공업

Low Cycle Fatigue Performance of 304L Stainless Steel Weldments

JaeHyoen Hwang*, DongJin Oh*, DoYoung Lee*, MinSung Chun* and Myung-Hyun Kim*,†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea
**Samsung Heavy Industry, Geoje 53261, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr
(Received January 11, 2016 ; Revised February 2, 2016 ; Accepted February 25, 2016)

Abstract

Recently, the market of liquefied natural gas is growing in accordance with shale gas development and environmentally friendly policies. Also, LNG is in the spotlight as an alternative fuel to previously used fossil fuel and the fuel for the ship to meet emission standards which takes effected by IMO (International Maritime Organization). According to growth of LNG, LNG carriers needs are also expected to increase significantly. This study investigates low cycle fatigue (LCF) performance of 304L stainless steel weldments to investigate fatigue performance in plastic strain region. 304L stainless steel is known to have improved fatigue performance at cryogenic conditions. LCF behavior are investigated by a strain-controlled condition up to 1% strain range and conducted with three different thickness (3mm, 5mm, 10mm). Also, test were performed with three different strain ratio R such as R = -1, -0, 0.5, Finally, the fatigue design curve for 304L stainless steel weldments at room tem- perature are proposed. Considering all test conditions, it is shown that LCF performance have similar tendency regardless of thickness and strain ratio. LCF design curve of 304L stainless steel weldments are lower than 304L stainless steel base metal.

Key Words : Low cycle fatigue, 304L Stainless steel, Strain-controlled, Fatigue design curve

1. 서 론

최근, 셰일 가스의 개발과 국제적인 환경 규제로 인해 LNG (Liquified Natural Gas)시장이 성장하고 있다. 셰일 가스는 2000년도 미국의 천연 가스 생산량 중 1.6%에 불과하였으나 2010년도에는 23.1%로 급증하였다[1]. 또한, LNG는 기존에 사용되던 화석 연료인 HFO (Heavy Fuel Oil)과 MDO (Marine Diesel Oil)의 대체연료로써 각광을 받고 있으며, IMO (International Maritime Organization, 국제해사기구)에서 제시하는 선박 배출 가스 규제인 Tier III를[2] 만족시킬 가장 적합한 연료이다.

이에 따라, LNG를 추진연료로써 사용되는 선박량은 증가할 것으로 예상되며 LNG 벙커링 시스템에 대한 수요 및 이를 운송하기 위한 운반선의 수요 또한 점차 증가할 것으로 기대된다[3].

LNG를 운송함에 있어 효율성을 위해 액화는 필수적이다. LNG는 대기압에서 약 -163℃에서 액화되며 이는 기체 상태일 때 보다 99.8%의 부피 감소가 이루어진다. 또한 극저온을 견디기 위해 LNG 저장 용기에 사용되는 재료는 극저온에서 좋은 인성 및 취성파괴에 대한 안전성을 가져야 한다. 일반적으로 극저온 용기에 사용되는 재료는 Invar alloy, 304L stainless steel, Al-5083 alloy과 Nickel steel이 있으며 제작되는 구조물이 사용되는 특성에 따라 재료를 분류하여 사용되

Journal of Welding and Joining, Vol.34 No.3(2016) pp47-51
http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.47

고 있다[4].

LNG 저장 용기에 안전성 확보를 위해 극저온에서의 고주기 피로, 피로균열진전 및 파괴 특성에 관한 연구는 최근 지속적으로 수행되고 있다[5-8]. 일반적으로 피로 성능은 온도가 낮아질수록 유사하거나 더 높은 성능을 나타내며 용접을 통해 제작되었을 경우 용접부의 결함과 구조적 불연속성으로 인해 피로 성능에 저하가 나타나는 것으로 알려져 있다[9].

LNG 추진 선박의 저장 용기에 사용되는 IMO Type C tank의 경우 설계 증기압이 높기 때문에 두께가 얇아 질 경우 소성 변형이 발생하게 된다. 이러한 이유로 인해 기존의 탄성 범위 내의 반복응력을 기반으로 한 피로 성능 평가 결과로는 저장 용기의 안전성을 평가하는데 한계를 가지게 된다. 이에 따라, 극저온용 재료에 대하여 변형률을 기반으로 한 피로 성능에 대한 연구가 진행되어 있으나[6] 용접부에 대한 변형률 기반 피로 성능에 대한 연구는 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 304L stainless steel의 용접부에 대해서 변형률 기반의 피로 성능을 평가하였으며 기존에 사용되던 304L stainless steel의 모재에 대한 변형률 기반 피로 설계 선도와 비교·평가 및 용접부에 대한 변형률 기반 피로 설계 선도를 제시하였다.

2. 재료 및 기계적 특성

2.1 화학조성

본 연구에서 사용된 304L stainless steel은 파이프, 소형 용기 및 대형 저장 용기에 사용되는 강재이며, 극저온에서 뛰어난 연성을 가지는 것으로 알려져 있다. 해당 강재에 대한 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

2.2 모재와 용접재의 기계적 물성치

본 연구에 사용된 304L stainless steel과 용접재인 E308LT-1에 대한 기계적 물성치를 Table 2에 정리하여 나타내었다. 모재와 용접재의 항복 강도는 각각 241MPa과 527MPa로 용접재가 2배 높게 나타났으며, 인장 강도는 각각 586MPa과 590 MPa로 동일한 물성을 보였다.

Table 2 Results of tensile test

	UTS [MPa]	0.2% YS [MPa]	Elongation (%)
304L stainless steel	586	241	55
E308LT-1	590	527	42

3. 저주기 피로 시험 및 결과

3.1 시험 방법

저주기 피로 시험은 파단이 10^4 미만에서 발생할 때로 정의 하며, 탄성 범위 내의 반복 하중으로 제어되는 고주기 피로 시험과 달리 탄성 범위를 벗어난 소성범위에서의 반복 변형률 제어로써 수행된다. 저주기 피로 시험은 ASTM E606에 따라 진행되었으며[10], 시험편의 형상은 판재 형태로 결정하였고 시험편은 두께에 따른 저주기 피로 성능을 파악하기 위해 각각 3mm, 5mm 와 10mm 로 결정하였다. 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 저주기 피로 시험에 사용된 장비는 축 인장, 압축 유압 피로 시험기 (IMT 8803, INSTRON)를 사용하였다. 저주기 피로 하중의 파형은 Trapezoidal waveform과 Triangle waveform 중 후자를 선택하였으며 실험은 전체 상온, 주파수는 0.5Hz로 수행하였다. 저주기 피로 시험에 있어 파단의 정의는 하중 감소법을 적용하여 하중의 50% 가 감소하였을 때를 최종 파단으로 정의하였다.

일반적으로 하중이 낮은 범위에서는 응력과 변형률의 관계는 선형적이므로 하중제어와 변형률제어에 의한 피로 시험 결과는 동일하다. 그러나, 높은 하중 범위(저사이클 영역)에서의 응력과 변형률 거동은 비선형적이므로 이를 정확히 평가하기 위해서 변형률제어를 통한 평가 방법이 가장 적합하다. 이때, 저주기 피로 시험을 통해 얻어진 전체 변형률(ε_a)은 식 (1)과 같이 탄성 변

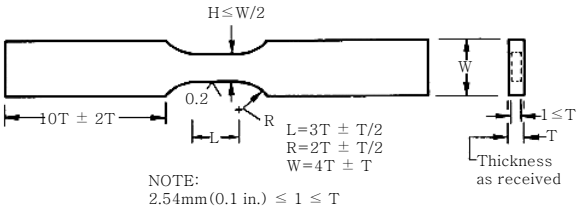

Fig. 1 Dimension of low cycle fatigue test specimen

Table 1 Chemical composition for 304L stainless steel (wt%)

	C	Mg	P	N	S	Si	Cr	Ni	Iron
304L stainless steel	0.03	2.00	0.045	0.10	0.030	0.75	18-20	8-12	Balance

형률(ε_e)과 소성 변형률(ε_p)의 합으로 나타낸다.

$$\epsilon_a = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (1)$$

또한, 식 (1)의 탄성 변형률과 소성 변형률은 Basquin model 적용을 통해 log-log 좌표에서 각각의 직선으로 나타낼 수 있으며, 파단 수명이 포함된 식 (2)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \epsilon'_f(2N_f)^C \quad (2)$$

식 (2)를 일반적인 변형률-수명 관계식이라 하며 이를 적용하여 변형률-수명 선도를 작성 한다. 이때, 식 (2)에서 σ'_f는 피로 강도 계수, b는 피로 강도 지수, ε'_f는 피로 연성 계수, c는 피로 연성 지수이며 N_f와 E는 각각 파단 수명과 탄성 계수를 나타낸다.

반복 하중에서 응력-변형률 선도는 재료의 연화, 경화에 의해 단순 하중에서의 응력-변형률 선도와 다른 거동을 보인다. 이때, 단순 하중에서와 마찬가지로 반복 응력-변형률 선도는 log-log 좌표에서 직선으로 나타나며 식 (3)과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'} \quad (3)$$

이때, $\Delta\sigma$는 응력 범위를 나타내며, n′과 K′은 각각 반복적 변형률 경화지수와 반복적 강도계수를 나타낸다.

3.2 시험 결과

본 연구에서는 304L stainless steel 용접부 저주기 영역에서 시험편 두께(3mm, 5mm, 10mm)와 변형률 비(R=-1, 0.1, 0.5) 의 변화가 피로 강도에 미치는 영향을 분석하였다. 저주기 시험을 통해 얻어진 시험 결과들을 변형률-수명 선도로 Fig. 2에 정리하여 나타내었다. Fig. 2에 나타난바와 같이, 시험편의 두께가 3mm인 경우 가장 낮은 피로 성능을 나타내었으며, 시험편의 두께가 5mm인 경우 가장 높은 피로 성능을 보였다. 이와 같이, 두께에 의한 영향은 304L stainless steel 용접부 저주기 피로 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 저주기 영역에서는 항복 이상의 과도한 응력에 의해 두께 효과가 나타나지 않았을 것으로 판단되며, 저주기 피로 설계를 위해서는 적절한 두께가 고려되어야 함을 알 수 있다.

변형률 비의 변화에 따른 저주기 피로 시험 결과를 정리하여 반복 응력-변형률 선도와 변형률-수명 선도로 각각 Fig. 3과 4에 나타내었다. Fig. 3에 나타난바와

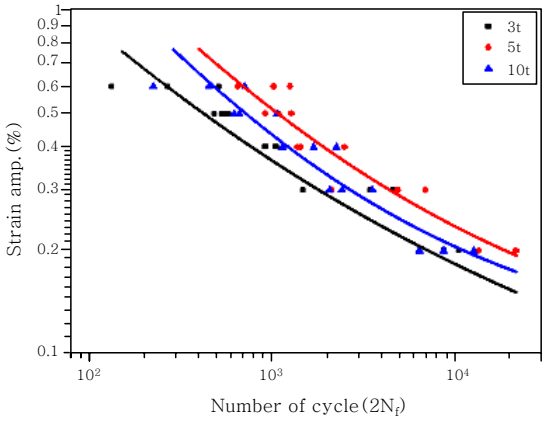

Fig. 2 Strain-life curve at room temperature

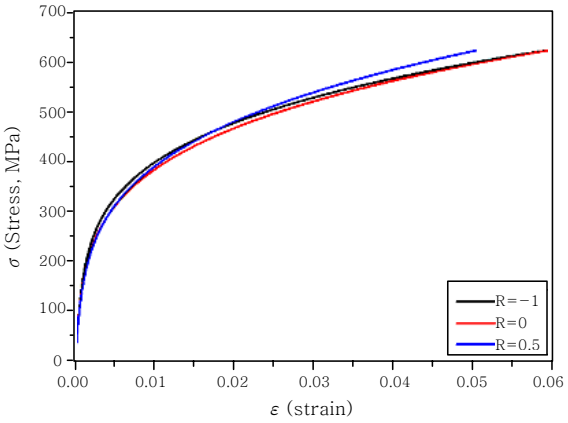

Fig. 3 Cyclic stress-strain curve at room temperature at different strain ratio

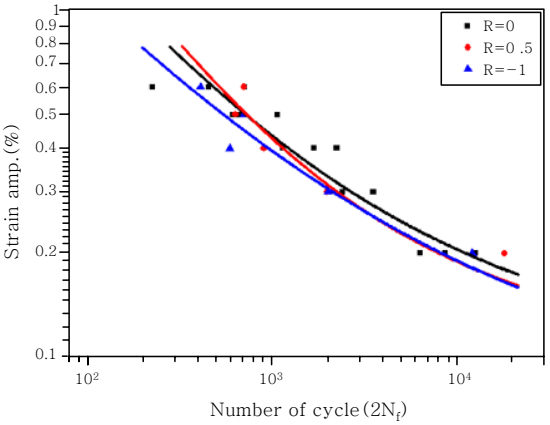

Fig. 4 Strain-life curve for room temperature with different strain ratio

같이, 변형률 비가 -1, 0, 0.5로 변화함에 따라 반복 응력-변형률 선도는 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 변형률 비 변화에 따른 피로 성능도 큰 차이가 없음을 Fig. 4에서 확인하였다. 일반적으로 모재의 저주기 피로 성능은 평균 응력이 0에 가까운 경우 변형률 비의

영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 평균 응력이 0에 가깝게 나타났으며, 이에 따른 용접부의 저주기 피로 성능에서도 변형률 비의 영향은 미미한 것으로 판단 할 수 있다.

두께 변화에 따른 탄성 변형률-수명 선도와 소성 변형률-수명 선도를 Fig. 5, 6, 7에 정리하여 나타내었다. 2,000 cycle 이하의 영역에서는 소성 변형률이 지배적이며 2,000 cycle 이상의 영역에서는 탄성 변형률이 지배적임을 확인하였다. 이때, 정확한 천이 구간을 파악하기 위해 탄성 변형률과 소성 변형률의 교차 지점인 피로 천이 수명을 계산하였으며, 10mm, 5mm, 3mm 두께에 따라 각각 1,910cycle, 2,649cycle, 674cycle로 나타났다. 또한, 앞서 언급한 두께에 따른 피로 성능 결과와 유사하게 시험편의 두께가 5mm인 경우의 천이 수명이 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 용접부 비드 형상에 의한 응력 집중 효과에 영향을 받았을 것으로 사료되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

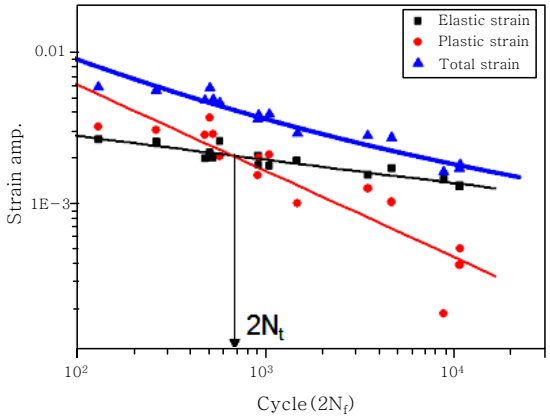

Fig. 5 Strain-life relationship with 3t at room temperature

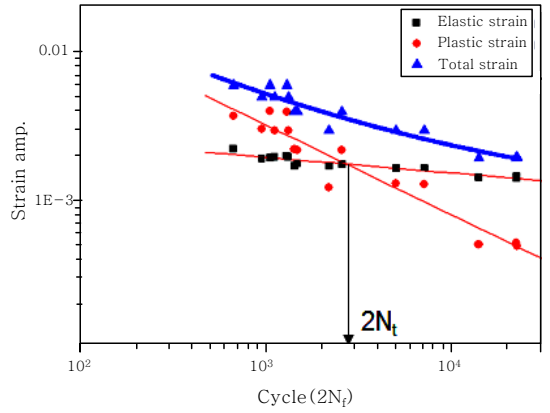

Fig. 6 Strain-life relationship with 5t at room temperature

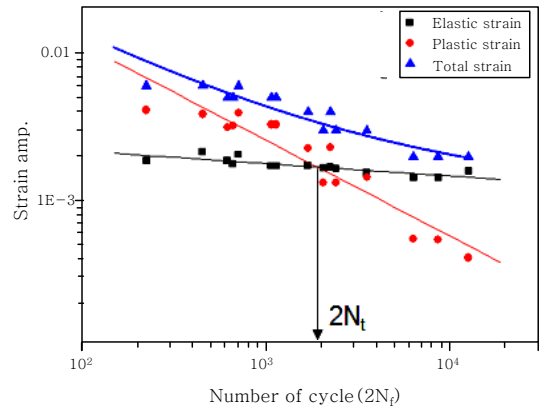

Fig. 7 Strain-life relationship with 10t at room temperature

3.3 저주기 피로 설계 선도

ASME code에서는 304L stainless steel 모재에 대한 저주기 피로 설계 선도만을 제시하고 있으며 용접부에 대해 적용하기는 부적합할 것으로 판단된다. 이에, 본 연구에서는 304L stainless steel 용접부의 저주기 피로 성능 평가를 수행하였으며 이를 바탕으로 저주기 피로 설계 선도를 제시하였다. 이때, 각각의 시험 결과들을 정리하여 하나의 피로 설계 선도로 나타내었고 시험 결과에서 도출된 지수들을 Table 3에 정리하였다. 이를 적용하면 별도의 저주기 피로 시험 없이 304L stainless steel 저주기 피로 설계에 필수적인 용접부의 피로 설계가 가능 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 얻어진 304L stainless steel 용접부의 피로 설계 선도와 ASME code에서 제시하고 있는 모재 설계 선도를 Fig. 8에 정리하여 나타내었다. Fig. 8에

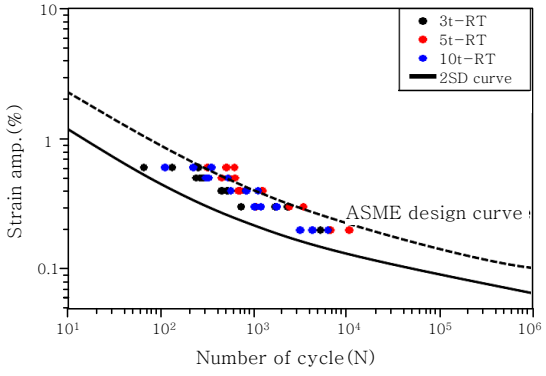

Fig. 8 Low cycle fatigue design curve for 304L stainless steel weldment

Table 3 Coefficient of LCF design curve

Parameters	σ'f	ε'f	b	c
Room temp.	661.9	0.0033	-0.1169	-0.5532

나타난 바와 같이, 모재 기준 피로 설계 선도보다 용접부의 피로 설계 선도가 낮게 나타남을 확인하였으며, 이는 용접부에 발생하는 초기 결함과 기하학적 불연속부(용접부 비드)에 의한 용접 toe부의 응력 집중 때문임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 304L stainless steel의 용접부에 대하여 저주기 피로 거동과 특성을 조사하여 기존의 ASME에서 제시하고 있는 모재에 대한 저주기 피로 설계 선도와 비교 및 용접부에 대한 저주기 피로 설계 선도를 제시하였다. 용접부에 대한 저주기 피로 시험 결과 얻어진 연구 성과를 아래와 같이 정리하였다.

1) 304L stainless steel의 용접부에 있어서 두께에 의한 저주기 피로 성능의 차이는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

2) 반복 응력-변형률 관계에서 변형률 비가 -1, 0, 0.5로 각각 달리하였을 때에도 선도의 차이가 나타나지 않았다. 이에 따라, 저주기 피로 시험에서 반복 응력-변형률 관계는 변형률 비의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

3) 각각의 두께에 대한 천이 피로 수명은 5mm의 두께에서 2,649 cycle로 가장 높게 형성되었으며, 3mm에서 674 cycle로 가장 낮게 나타났다.

4) 본 연구에서는 304L stainless steel 용접부의 저주기 피로 설계 선도를 제시하였고, 이를 바탕으로 LNG 저장 탱크 등 저온용 구조물에 대해 보다 합리적인 피로 설계가 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문(저서)은 부산대학교 기본연구지원사업(2년) 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Zhongmin Wnag and Alan Krupnick, A Retrospective Review of shale Gas Development in the United States, *Resources for the future*, 13-12 (2013)
2. Young Hyun Ryu, Hong Rueol Kim, Gyu Baek Cho, Hong Suk Kim and Jeong Gil Nam, A Study on the Installation of SCR System for Generator Diesel Engine of Existing Ship, *Journal of KSME*, 39-4 (2015), 412-417 (in Korean)
3. Hale Saglam, Ulrikke Brandt and Britta Wodecki, LNG carrier, *Marine Structural Engineering*, 2012, Assignment 1
4. Jeong Hyeon Kim, Sung Woong Choi, Doo Hwan Park and Jae Myung Lee, Cryogenic Charpy Impact Test based on GTAW Method of AISI 304 Stainless Steel for LNG Pipeline, *J. of Welding and Joining,* 32-3 (2014), 89-94 (in Korean)
5. Yoshinori Ono, Tetsumi Yuri, Hideshi Sumiyoshi Etsuo Takeuchi, Saburo Matsuoka and Toshio Ogata, High-Cycle Fatigue Properties at Cryogenic Temperatures in INCONEL 718 Nickel-based Superalloy, *Materials Transactions*, 45-2 (2004), 342-345
6. Tetsumi Yuri, Toshio Ogata, Masahiro Saito and Yoshiaki Hirayama, Effect of welding structure on high-cycle and low-cycle fatigue properties for MIG welded A5083 aluminum alloys at cryogenic temperatures, *Cryogenics*, 41 (2001), 475-483
7. Jae Hoon Kim, Kyue Taek Shim, Young Kyun Kim and Byoung Wook Ahn: Fatigue Crack Growth Characteristics of 9% Ni Steel Welded Joint for LNG Storage Tank at Low Temperature, *Journal of KWJS*, 28-5 (2010), 45-50 (in Korean)
8. Young Kyun Kim, Jae Hoon Kim and Kyu Taek Shim: Mechanical Characteristics of 9% Ni Steel Welded Joint for LNG Storage Tank at Cryogenic, International *Journal of Modern Physics*, 6 (2012), 355-360
9. Dong Jin Oh, Jae Myung Lee, Byeong Jae Noh, Ryuichi Ando, Toshiyuki matsumoto and Myung Hyun Kim: Investigation of fatigue performance of low temperature alloys for liquefied natural gas storage, *Institute of Mechanical Engineers*, 229(7) (2015), 1300-1314
10. ASTM: Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing, ASTM E606/E606M (2012)