Overload 효과를 고려한 Al 5083-O 용접부 피로 수명 예측

강태우* · 박정열* · 이재성* · 김명현*,†

*부산대학교 조선해양공학과

Fatigue Life Prediction of Al 5083-O Weldment Considering the Overload Effect

Tae-Woo Kang*, Jeong-Yeol Park*, Jae-Sung Lee*, and Myung-Hyun Kim*,†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received July 4, 2018 ; Revised July 23, 2018 ; Accepted August 9, 2018)

Abstract

In general, fatigue tests are conducted with a constant amplitude load to estimate the fatigue crack growth characteristics. However, vessels have variable amplitude loads because various forces are applied to them. So it is essential to consider variable amplitude loads and a constant amplitude load together. The existing data shows that fatigue crack propagation is retarded when the single or multiple tensile overloads are applied and they affect fatigue life. But there are no results of overload effect on weld metal (WM) and heat effect zone (HAZ) about Al 5083-O.

This study investigates the fatigue crack growth rate characteristics of welded Al 5083-O considering the overload effects. The specimen of WM and HAZ are fabricated according to ASTM E647 and E8. Based on the results, it be successfully the fatigue retardation by the overload is investigated based on the Wheeler Model, and the fatigue life of structure can be successfully predicted from the test results.

Key Words : Overload effect, Fatigue crack growth, Plastic zone, Wheeler model, Prediction of fatigue life

1. 서 론

최근 환경 문제와 셰일 가스 생산량의 증가로 인해 전 세계적으로 액화 천연 가스 (Liquefied Natural Gas)의 수요가 증가하였으며, 향후 아시아를 중심으로 더욱 증가할 것 이라고 보고 있다^{1,2)}. 액화 천연 가스는 선박을 이용해 주로 운송되는데, 이때 Fig. 1처럼 저장탱크의 종류가 다양하다³⁾. 각 탱크의 공통점은 극저온 강재를 사용한다는 것인데, 특히 독립 형식의 경우 알루미늄 강재가 많이 사용된다.

LNG 선박은 운항을 위해 여러 특징을 고려할 필요가 있다. 특히 대형 구조물인 선박은 용접을 통해 저장탱크를 포함한 선박의 대부분이 접합되므로 용접시 형성되는 용접부와 열영향부의 특징도 고려돼야 한다. 또한 불규칙한 하중을 받는 해양 환경에 노출되어 있어

균일한 힘을 받는 경우는 드물다고 볼 수 있다. 더불어 액화로 발생하는 팽창과 수축의 하중변화도 고려하기 위해, 일반적으로 진행되는 균일 반복 하중과 함께 변동 반복 하중도 고려할 필요가 있다.

이에 따라, 변동 반복 하중에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다⁴⁻⁷⁾. 변동 반복 하중의 종류 중 하나인 단일 변동 반복 하중을 Fig. 2에 나타냈다⁴⁾. 단일 변동

Type	Membrane		Independent	
	GTT MARK	GTT NO96-2	MOSS	IHI SPB
Figure
Material	SUS 304L	Invar alloy	Al alloy (Al 5083)	Al alloy or 9% Ni
Thickness	1.2mm	0.7~1.5mm	50mm	30

Fig. 1 Cargo tanks of LNG carriers³⁾

Fig. 2 Evolution of crack length (a) with cycle number (N)⁴⁾

반복 하중은 인장 후 압축, 압축 후 인장, 단일 인장, 단일 압축의 하중 형태가 있는데, 인장 및 압축 하중 순서에 따라 피로 균열 진전 속도에 영향을 미친다. 특히, 단일 인장 과대하중이 작용하였을 때 균열 진전 지연 현상이 가장 크게 나타난다. 반대로 단일 압축 과대하중이 작용하게 되면 기존의 균열 진전 속도보다 빨라지는 가속현상이 나타난다.

현재까지는 한가지 재료에 대한 단일 인장 과대 하중의 영향이 일반적으로 연구되었다⁵⁻⁸⁾. 하지만 앞서 언급한 LNG 선박의 특성을 고려하였을 때, 모재(Base Metal)뿐만 아니라, 용접시 발생하는 열영향부(Heat Affect Zone)와 용접부(Weld Metal)에 대한 과대 하중 작용을 고려할 필요가 있다. 또한 균열 지연 현상이 실제 구조물의 수명에 미치는 영향도 고려해야 한다.

본 연구에서는 LNG 탱크 제작시 사용되는 Al 5083-O 합금강에 대한 모재부와 용접부, 열영향부의 단일 인장 과대하중 영향을 피로 균열 전파 실험을 통해 평가하였으며, 실험 결과를 토대로 실제 구조물에 적용되었을 때 수명에 어떤 영향을 미치는지 예측해 보았다.

2. 단일 인장 과대 하중 작용에 의한 균열 지연

단일 인장 과대 하중이 작용되었을 때, 피로 균열 진전에 영향을 미치는 매커니즘은 크게 두 가지로, 항복역 및 균열 닫힘 모델로 가정할 수 있다⁹⁾. 항복역 모델은 균열 선단 전방부의 항복역을 기준으로 피로 균열 진전을 해석하며 해당 되는 모델은 Willenborg¹⁰⁾ 모델 및 Wheeler¹¹⁾ 모델이 있다. 반면, 균열 닫힘 모델은 균열 선단을 포함한 후방부의 균열면 변위 거동을 기준으로 피로 균열 진전을 해석하며 Elber¹²⁾ 모델이 대표적이다. Willenborg 모델은 과대하중에 의한 소성역의 영향으로 유효응력 강도계수가 균열선단 부분에서 저하

된다는 주장이고, Elber 모델은 과대하중에 의한 압축 잔류 응력이 균열닫힘을 일으킨다는 주장이다¹¹⁾.

특정 시스템을 통해 과대하중에 의한 소성역 크기 변화를 측정한 연구 결과가 있다^{7,8)}. 따라서 본 연구에서는 여러 모델 중 Wheeler 모델을 기반으로 소성역의 크기에 의해 균열 지연 현상이 발생하였다고 보았다. Wheeler 모델이란 균열 반복 하중 작용에 의해 생긴 소성역이 과대 하중 작용에 의해 생긴 소성역 내부에 있을 때 균열 지연 현상이 발생한다는 주장이며 관계식은 다음과 같다⁹⁾.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{OL} = C_p \left(\frac{da}{dN}\right)_{CA} = C_p f(\Delta K) \quad (1)$$

$$C_p = \begin{cases} \left[\frac{r_{yi}}{a_p - a_i}\right]^p & r_{yi} < a_p - a_i \\ 1 & r_{yi} > a_p - a_i \end{cases} \quad (2)$$

$$r_y = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_{max}}{2\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (3)$$

$$r_p = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_{max}^{OL}}{2\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (4)$$

OL : Overload

CA : Constant Amplitude

여기서 C_p 는 지연 계수(retardation parameter)이며 과대 하중에 의한 항복역(overload yield zone) r_p 와 현시점의 부하하중에 의한 항복역(current-load yield zone) r_y , 과대하중이 부여되었을 때 균열길이와 소성역의 합(sum of crack length and plastic zone of OL) a_p 와 i 번째 사이클에서의 균열길이는(crack length at the i th cycle) a_i 이다. p 는 형상 계수(shaping parameter), K_{max} 와 K_{max}^{OL} 는 정상하중의 최대응력확대계수와 과대하중의 최대응력확대계수이며, σ_{ys} 는 항복강도(yield strength)이다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 균일하중에 의해 생성된 소성역 r_y 가 과대하중에 의해 생긴 소성역 r_p 내부에 있을 때 균열 지연현상이 발생하게 되며, r_p 를 벗어났을 때 다시 균열이 진전하게 된다.

Wheeler 모델 적용시 소성역을 구하는 방법에 있어 조금씩 차이가 있다^{13,14)}. 제시된 3가지의 소성역 계산 과정을 비교해보면 Plane stress의 계수, 응력확대계수, 항복응력 부분에서 조금씩 변화가 있었다. 특히 응력확대계수를 적용할 시, Irwin¹³⁾의 경우 K 를, Jono Masahiro⁹⁾는 K_{max} 를, Antune's¹⁴⁾는 ΔK 를 각각 이

Fig. 3 Crack tip plastic zone under overloading

용하였다.

$$r_y = \frac{1}{\sqrt{2}\pi} \left(\frac{K_{max}}{2\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5)$$

$$r_y = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (6)$$

$$r_y = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (7)$$

$$\alpha = \begin{cases} \pi & \text{Plane stress} \\ 3\pi & \text{Plane strain} \end{cases}$$

따라서 본 논문에서는 3가지 방법을 모두 고려하여 최종 실험 결과를 가졌다.

3. 실험 방법

3.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료인 Al 5083-O에 대한 화학적 성분은 Table 1에 나타내었다. 인장시험편의 경우 ASTM E-8에 의해서 제작되었으며, ASTM E647에 의해 제작된 피로 균열 전파 시험 시험편은 Fig. 4와 같다^{15,16)}.

3.2 용접부 형태 및 조건

용접은 MIG 용접을 실시하였으며, 고입열 조건을 고려하기 위해 용접전류는 전면 500A로, 후면 550A로

Table 1 Chemical composition of the Al 5083-O (wt.%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Cr-EQ
0.07	0.20	0.02	0.6	4.8	0.07	0.01	0.02	0.22

Fig. 4 Fatigue crack growth rate specimen

Table 2 Welding condition (MIG)

	Front	Back
Current [A]	500	550
Voltage [V]	30	30
Welding speed [cm/min]	36	36

Fig. 5 Dimension of groove gape

용접하였다^{17,18)}. 세부 조건은 아래의 Table 2에, 용접 이음매 형상은 Fig. 5에 나타냈으며, 열영향부 시험편은 용융선으로부터 3mm 떨어진 부분에서 시험편을 가공하였다.

3.3 피로 균열 전파 시험

균열 반복 최대 하중은 하중 제어 Al 5083-O 재료에 대해 피로 균열 전파 실험을 진행하였을 때 Region 2 영역에 해당되는 지점인 11MPa로 선택하였으며, 과대 하중의 뚜렷한 효과를 관찰하기 위해 Fig. 6과 같이 단일 인장 과대 하중으로, 최대하중의 2배를 부여하였다⁶⁾. 또한 소성역의 영향을 충분히 고려하기 위해 과대 하중 부여 시점은 균열이 27mm 진전되었을 때, 최종 균열 길이는 50mm로 설정하였다. 응력비는 0.1이며, 구체적인 실험 조건은 Table 3과 같다.

Fig. 6 Applied stress

Table 3 Test condition

Control mode	Load control
Loading pattern / frequency	Sinusoidal wave / 10Hz
Max load [kN] / stress ratio	22 / 0.1
SOL condition	$\sigma_{SOL} = 2.0 \sigma_{max}$

Table 4 Tensile test results at BM and WM

Mat.	E (GPa)	0.2% YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
BM	61	166	326	23
WM	61	157	307	20

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 인장 실험 결과

인장 실험 결과의 평균을 아래 Table 4에 나타내었다. 항복강도는 모재부가 166MPa, 용접부가 157MPa로 본 재료는 언더 매칭인 것을 확인할 수 있다.

4.2 피로 균열 전파 실험 결과

모재 시험편에 과대 하중을 부여해본 결과, 균열 진전 현상이 지연되는 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 용접부와 열영향부 또한 균열 지연 현상이 발생하였는데, 모재는 약 45%, 용접부 약 64% 수명이 증가하였다. 열영향부는 약 63% 증가하여, 수명 변화가 가장 많은 용접부와 가장 적은 모재를 비교하였다. 과대하중과 균일 하중의 수명 비교는 Table 5에 나타내었다.

Fig. 8은 앞서 언급한 각각의 소성역 계산 방법을 통해 모재부의 실험결과와 Wheeler 모델을 적용하여 균열 전파 특성을 나타낸 것이다. 3가지 방법 모두 기울기가 다른 것을 확인할 수 있는데, Irwin¹³⁾의 방법

Fig. 7 a-N curve at BM

Table 5 Number of cycles of BM and WM

Mat.	Number of cycles at CA	Number of cycles at OL
BM	3.91×10^4	7.11×10^4
WM	2.80×10^4	7.70×10^5
HAZ	2.60×10^4	7.44×10^5

Fig. 8 FCGR by wheeler model at BM

이 실험 결과와 기울기가 가장 유사한 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 Wheeler 모델을 적용한 모재와 용접부의 결과를 각각 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 형상 계수 p값은 모재는 1.86, 용접부 2이며, 각 소성역을 계산해본 결과, 모재 11.33mm, 용접부 12.37mm로 과대 하중에 의해 생성된 소성역이 용접부에서 1.04mm 큰 것을 확인할 수 있었다.

4.3 피로 수명 예측

실험 데이터를 기반으로 모재와 용접부의 피로 수명 예측에 대한 사례연구를 실시하였다. 대상 Plate는 두께 65mm, 폭 2248mm이며, 응력 조건은 LNG선박의

Fig. 9 FCGR result of the overload effect and Wheeler prediction at BM

Fig. 10 FCGR result of the overload effect and wheeler prediction at WM

Fig. 11 External surface crack

MOSS타입 탱크에 부여되는 하중에 따라, Table 6에 나타난 바와 같이 막응력 68.8MPa, 굽힘 응력 14.53MPa로 적용하였다^{19,20)}. 초기 균열은 임의로 설정하여 Fig. 11과 같이 표면 결함이며, 균열길이는 각각 Table 7과 Table 8로 나타내었다. 수명 예측을 위해 Newman and Raju^{21,22)} 식을 적용하여 균열 깊이가 50mm 되는 시점을 최종 균열 길이로 설정하였다.

Table 6 Stress type for the assessment of fatigue life

Type	Primary stress [MPa]
Membrane	68.6
Bending	14.53

Table 7 Crack size of base metal

Load	a [mm]		2C [mm]	
	Initial	Final	Initial	Final
Constant	20	49.97	60	140.88
Overload	20	49.97	60	144.42

Table 8 Crack size of weld metal

Load	a [mm]		2C [mm]	
	Initial	Final	Initial	Final
Constant	20	49.95	60	157.41
Overload	20	49.91	60	158.62

Table 9 Prediction number of cycles of BM and WM

Mat.	Number of cycles at CA	Number of cycles at OL
BM	2.19×10^4	6.07×10^4
WM	0.96×10^4	3.99×10^4

Fig. 12와 Fig. 13은 모재와 용접부의 피로수명을 하중 조건에 따라 예측한 결과이다. 균일 반복 하중과 과대하중을 각각 사각형과 원으로 나타냈으며, 수명 예측 결과 모재는 균일하중일 경우 2.19×10^4 의 수명이 과대하중으로 인해 6.07×10^4 로 약 63% 증가하였고, 용접부는 0.96×10^4 에서 3.99×10^4 로 약 76% 증가 하였으며 Table 9에 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 천연 액화 가스 저장 탱크 제작에 사용되는 Al 5083-O 재료에 과대하중이 작용 하는 경우, 피로균열 지연에 대한 실험 및 이를 바탕으로 피로 수명을 평가하여 다음의 결론을 얻었다.

1) Al 5083-O 의 경우 용접시 모재의 물성치가 용접부의 물성치보다 높은 Under matching 재료인 것으로 나타났다.

2) 모재와 용접부, 열영향부 각 영역의 과대하중을 부여하였을 때 모재, 열영향부, 용접부 순으로 균열이 지연되는 현상을 확인하였다.

3) 과대하중에 의해 발생한 소성역을 비교해본 결과 Irwin의 방법으로 소성역을 나타냈을 때 가장 비슷한

Fig. 12 Fatigue life prediction of plate at BM square (constant amplitude, circle) overload

Fig. 13 Fatigue life prediction of plate at WM square (constant amplitude, circle) overload

결과를 얻었으며, 소성역 크기 차이가 1.04mm로 용접부가 모재대비 과대하중의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 Wheeler 모델의 형상계수 p 는 다음과 같다

BM : 1.86

WM : 2

4) 과대하중의 영향을 구조물에 적용하였을 때, 모재의 경우 약 63%, 용접부의 경우 76% 만큼 수명 증가가 예상된다.

5) 균일 하중만을 고려한 피로균열 진전 속도는 과대하중을 받는 실제 구조물의 균열진전 속도 대비 상당히 보수적 결과를 보여준다. 또한 LNG를 액화할 때 적용되는 -162°C 에서의 과대하중에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

이 논문(저서)은 2018년 교육부와 한국연구재단의 이공학 개인기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1D1A1B03035811).

ORCID: Tae-Woo Kang: <http://orcid.org/0000-0002-1072-020X>

References

1. Dong Jin Oh, Jae Myung Lee, Min Sung Chun, Myung Hyun Kim, Reliability evaluation of LNGC insulation system with a metallic secondary barrier, *Composite Structures* 171 (2017), 43-52
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.040>
2. 2017 BP Energy Outlook, British Petroleum, 2017, 2017 edition
3. Jeong Yeal Park, Jae Myung Lee, Investigation of the Mechanical Properties of a Weldment of 7% Nickel Alloy Steels, *Metals* 2016, 6(11), 285
<https://doi.org/10.3390/met6110285>
4. Miloudi Abdelkader, Zemri Mokhtar, Benguediab Modamed, Mazari Mohamed, Amrouche Abdelwahed, Crack propagation under variable amplitude loading, *Materials Research*, (2013), 1161-1168
<http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392013005000110>
5. Morteza Mehrzadi and Farid Taheri, A material sensitive modified wheeler model for predicting the retardation in fatigue response of AM60B due to an overload, *International Journal of fatigue*, 55 (2013), 220-229
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.06.022>
6. Shengci Li, Yinghui Zhang, Liang Qi, Yonglin Kang, Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior in DP780 dual phase steel, *International journal of fatigue*, 106 (2018), 49-55
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.018>
7. S. Daneshpour, M. Kocak, S. Langlade, M. Horstmann, Effect of overload on fatigue crack retardation of aerospace Al-alloy laser welds using crack-tip plasticity analysis, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009), 1603-1612
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.04.005>
8. S. Danshpour, J. Dyck, V. Ventzke, N. Huber, Crack retardation mechanism due to overload in base material and laser welds of Al alloys, *International Journal of Fatigue*, 42 (2012), 95-103
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.07.010>
9. Jono masahiro, *fatigue crack*, (2004), 131-133
10. Willenborg, J., Engle, R., and Wood, H.A., A crack retardation model using an effective stress concept, *Technical Memorandum* 71-1 FBR, Air force Flight Dynamics Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, (1971)
11. O.E. Wheeler, Spectrum loading and crack growth, *Journal of Basic Engineering*, 94(1), 181-186
<https://doi.org/10.1115/1.3425362>

12. Elber, W. The significance of crack closure, *ASTM STP 486*, (1971), 230-242
<https://doi.org/10.1520/STP26680S>
13. G.R. Irwin, Linear fracture mechanics, Fracture transition and Frature control, *Engineering Fracture Mechanic*, 1, (1968), 241-257
[https://doi.org/10.1016/0013-7944\(68\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0013-7944(68)90001-5)
14. F.V. Abtunes, L.F.P. Borrego, J.D. Costa, J.M. Ferreira, A numerical study of fatigue crack closure induced by plasticity, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 27 (2004), 825-835
<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2004.00738.x>
15. ASTM E8. Standard test methods for tension testing of metallic materials. In *Annual Book of ASTM standards*, ASTM International
16. ASTM E 647. Standard test methods for Measurement of fatigue crack growth rates. In *Annual Book of ASTM standards*, ASTM International
17. Park Sang Hyeon, Lee Hee Keun, Kim Jin Young, Chung Ha Taek, Park Young Whan, Kang Chung Yun, Effect of welding condition on microstructure of weld metal and mechanical properties in Plasma-MIG hybrid welding for Al 5083 alloy, *Journal of Welding and Joining*, 33(1) (2015), 61-71
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.1.61>
18. Choi Young Bae, Kang Mun Jin, Kim Dong Cheol, Hwang In Sung, High current arc welding technology of aluminum alloy, *Journal of KWJS*, 31(1) (2013), 21-25
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.1.21>
19. Cho Dong Pil, A study on structural integrity according to the defect type for high heat input weld, In PNU, Thesis of master course, (2012)
20. Tae Yeop Kim, Development and validation of engineering critical assessment (ECA) program for welded joints, In PNU, Thesis of master course, (2017)
21. Newman, J.C and Raju, I.S. Stress intensity factor equation for cracks in three-dimensional finite bodies. *Fracture Mechanic: Proc. of 14th symposium*. Vol. 1: Theory and Analysis. STP 791. Philadelphia: ASTM, (1983), 238-265
22. Raju, I.S and Newman, J.C. Stress intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite thickness plates, *Engineering Fracture Mechanics*, 11 (1979), 817-829
[https://doi.org/10.1016/0013-7944\(79\)90139-5](https://doi.org/10.1016/0013-7944(79)90139-5)