대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 54, No. 5, pp. 415-420, October 2017
eISSN:2287-7355, https://doi.org/10.3744/SNAK.2017.54.5.415

LNGC 2차 방벽에 적용된 Aramid 섬유의 Weibull 통계 분석을 이용한 피로특성 평가

박진형[1] · 오동진[1] · 김민규[2] · 김명현[1,†]
부산대학교 조선해양공학과[1]
(주)한국카본[2]

Estimation of Fatigue Characteristics Using Weibull Statistical Analysis with Aramid Fiber on LNGC Secondary Barrier

Jin Hyeong Park[1] · Dong Jin Oh[1] · Min Gyu Kim[2] · Myung Hyun Kim[1,†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University[1]
HANKUK CARBON CO.,LTD[2]

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Insulation systems in Liquefied Natural Gas Carriers (LNGC) are vulnerable to sloshing impact and fatigue loads because of waves. If gas leaks into the primary barrier, the Flexible Secondary Barrier (FSB) prevents the leakage of gas in this system. Fatigue strength of the FSB largely depends on the behavior of composite materials. In this study, a new system is applied to the FSB using aramid fiber to improve the fatigue strength of the secondary barrier, with the intention of replacing conventional E-glass fibers. The manufacturing method involved varying the ratio of the aramid fiber to the E-glass fiber for optimum design of the FSB. The fatigue tests results of the secondary barrier using aramid fiber were superior to that using E-glass fiber. The statistical analysis is performed to obtain the fatigue test results and estimate the probability of failure as well as the design guideline of LNGC secondary barriers.

Keywords : Insulation systems(단열 시스템), Secondary barrier(2차 방벽), Aramid fiber(아라미드 섬유), E-glass fiber(유리 섬유), Weibull distribution(와이블 분포)

1. 서 론

전 세계적으로 LNG 수요가 증가함에 따라 새로운 LNG 선박의 건조가 증가하고 있으며 선박의 크기도 대형화되고 있다. LNG 선박은 천연가스를 액화시켜 운송하며 -163℃로 유지되는 조건에서 부피는 600분의 1로 줄어들기 때문에 대량 운송이 가능하여 경제적인 측면에서 유리한 장점을 갖고 있다. 하지만 선박의 대형화됨에 따라 선박의 운항 중 유체 화물의 부분적재 조건(sloshing 발생)과 파고가 높은 운항 환경에서 운용되고 있기 때문에 LNG선의 화물창이 받는 유동에 의한 충격 및 피로에 의한 손상이 발생하여 LNG 누설에 의한 경제적 손실의 위험성이 증가하게 된다. 이에, LNG 선박 건조 시 설계단계에서 열 하중 및 파고에 의한 운항 조건을 고려한 화물창 안전성 평가와 이를 반영한 설계가 필수적으로 수행되어야 한다.

Fig. 1은 Gastransport & Technigas(GTT)사의 Mark-III type의 방열 화물창 시스템을 기반으로 건조된 LNG 선박의 화물창 내부의 구성을 보여주고 있다. 멤브레인 구조 화물창(Mark-III type, No. 96 type)은 -163℃에서 액화된 LNG를 운항 도중 누설 없이 저장하기 위해 1, 2차 방벽으로 구성된 이중 방벽 구조를 적용하고 있다. 특히, Gaztransprort & Technigaz(GTT)에서 특허를 보유하고 있는 Mark-III type LNG 화물창은 열 수축에 의한 변형을 줄이고자 주름부가 있는 스테인리스 스틸을 1차 방벽으로, 최종 누설을 방지하기 위해 복합재료 구성된 FSB 와 RSB를 2차 방벽으로 사용하고 있다. 또한, 열 차폐용 강화 폴리우레탄 폼(Reinforced polyurethane foam) 및 플라이우드(Plywood)로 LNG 화물창의 단열 성능을 강화하였으며, 하나의 LNGC 단열 시스템을 구성하게 된다 (Oh, et al., 2017). 이러한 모든 구조물들

Received : 19 October 2016 | Revised : 23 June 2017 | Accepted : 9 September 2017
† Corresponding author : Myung Hyun Kim, kimm@pusan.ac.kr

은 화물의 적재와 하역에 따른 열 하중과 운항 시 Hull girder bending moment를 반복해서 받기 때문에 피로 파괴의 문제에 심각하게 노출된다. 이러한 관점에서, LNG 단열시스템에 대한 극저온 환경에서의 강도 및 피로 성능 평가는 LNG 선박의 설계에 있어서 중요한 평가 항목이 된다. 특히, LNG 누설 시 최종 방벽에 해당되는 2차 방벽의 내구성 평가에 해당되는 인장 강도 및 피로 강도는 LNG 선박의 안전성 확보에 있어서 필수적인 부분임을 알 수 있다 (Oh, et al., 2017).

특히, 본 연구에서는 섬유강화재료인 Aramid 섬유는 금속재료에 비해 높은 강도(strength)와 강성(stiffness) 등의 우수한 기계적 성질을 가지고 있는 우수한 피로 특성을 갖는다 (Park, et al., 2013). 그러나 유기섬유는 피로 시험 결과가 동일 조건 하에서도 큰 편차를 보이기 때문에 많은 시편들을 시험해야만 정확한 피로수명을 예측할 수 있다 (Vorechovsky, et al., 2010). 하지만 시험 비용이나 시간적 제한 등의 이유로, 한정된 시험편만을 제한되는 경우가 많다 (Satoshi, et al., 1980). 따라서 소량의 시험편으로 정확한 내구수명 데이터를 얻기 위해 피로 시험 결과를 통계적으로 처리하여 파단 확률 또는 비파괴 확률을 수명과 관련시키려는 시도가 점차 증대되고 있다. 또한, 신뢰성 해석에 응용하기 위해 확률 분포 곡선을 이용하여 복합재료 또는 금속의 피로수명을 예측하는 연구가 많이 수행 되어왔다 (Radhakrishnan, et al., 1984). 피로수명을 추정하는 방법에는 정규분포, 대수정규분포, Weibull 분포의 통계량을 이용한 방법 등이 이용되고 있다. 피로 시험 결과를 기반으로 가중치를 이용한 probit 해석을 통하여 소 표본 시험편에 대한 통계적 해석을 정량적으로 수행 하여 확률-응력-수명(probability stress life, P-S-N) 관계를 구했다 (Santoshi, N, et al., 1980).

상기 연구들은 모두 금속과 일반 복합재를 대상으로 한 연구로서, 하이브리드 복합재료의 LNGC 2차 방벽 FSB에 대한 파단 확률 분포 함수의 신뢰성 평가 및 거동을 검토하여 해석하는 경우는 드물다.

따라서 본 연구에서는 기존의 E-glass 섬유를 적용한 FSB 대비 높은 강도와 내구성을 갖는 강화섬유인 Aramid FSB를 적용하여, E-glass 섬유와 Aramid 섬유의 위사(weft) 비율을 달리하여 LNGC 2차 방벽인 FSB에 적용하였다. 피로 시험 결과를 기반으로 통계 분석 및 파면 분석을 통해, 피로 수명을 예측함과 동시에 FSB의 피로 설계 시 신뢰성 평가를 수행하였다.

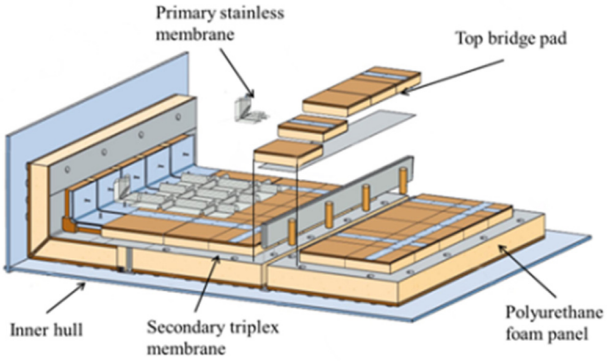

Fig. 1 Inside of LNG integrated tank on Mark-III system

2. 시험 준비

2.1 시험편 형상 및 정의

본 연구에 사용된 시험편은 Mark-III와 Mark-III Flex의 LNGC 방열시스템을 적용한 시험편으로 구성은 강화 폴리우레탄 폼(Reinforced Polyurethane foam), 2차 방벽인 RSB(Rigid Secondary Barrier)와 FSB(Flexible Secondary Barrier), 그리고 PU glue와 TBP glue로 구성된다. 극저온 내구성 평가를 위한 저온 피로 시험에 사용된 시험편 형상은 Fig. 2와 같으며, 크기는 660 mm × 360 mm × 86 mm(길이 × 폭 × 두께, Aluminum plate 두께포함)의 일정한 규격으로 제작되었다.

본 연구에서는 총 3가지 Case를 고려하여 시험을 진행하였다. Case 1과 Case 2는 E-glass FSB을 적용하였으며 Mark-III와 Mark-III Flex의 온도 차이에 의한 변위 조건을 다르게 설정하였다. Case 3은 위사와 경사가 교차되는 평직 조직이며 위사 비에 따 E-glass 섬유와 Aramid 섬유를 위사(weft) 2:1 비율로 제작하였다.

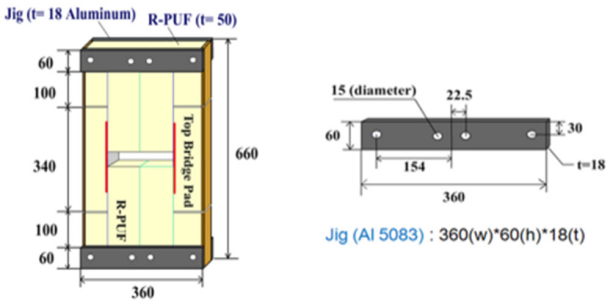

Fig. 2 Dimension of the test specimen and jig devise

2.2 피로 시험기 및 측정 장비

본 연구에 사용된 장비는 Fig. 3와 같이 최대 하중 용량 ±50 Ton(동하중) 인장 압축 유압 구조물 피로 시험기(INSTRON, The United Kingdom)를 사용하였다. 시험 과정에서 저온 챔버의 유리창을 통해 실시간으로 시험편의 상태를 확인하였다. 또한, Fig. 4와 같이 극저온 피로 시험을 위해 저온 챔버를 이용하였으며, 액화질소 가스를 냉매제로 사용하였다.

Fig. 3 Fatigue test machine (IST-8800, INSTRON)

Fig. 4 Test equipment : cryogenic chamber / temperature controller

2.3 피로 시험 조건

본 피로 시험에 사용된 Mark-III 및 Mark-III Flex의 피로 시험 변위조건은 Table 1을 통해 도출하였다. 변위 계산 시 파고에 의한 longitudinal girder of bottom structure와 극저온 환경에서의 열 수축으로 인한 thermal load의 총합으로 변위 설정을 하였다.

$$\delta_T = \alpha \times \Delta T \times L \quad (1)$$

$$\delta_L = \frac{\sigma}{E} \times L \quad (2)$$

여기서, α는 열팽창계수, ΔT는 온도차, L는 시험편길이, σ는 hull girder stress, E는 탄성계수를 의미한다.

Table 1 Fatigue test displacement condition

Test type	Mark-III	Mark-III Flex
ΔT	170℃	184℃
Hull girder stress	185 MPa	185 MPa
Thermal coefficient	2.33 × E-06	2.23 × E-06
Length	1020 mm	1020 mm
Thermal displacement	0.4 mm	0.43 mm
Hull girder displacement	1.8 mm	1.8 mm
Total displacement	2.20 mm	2.23 mm

2.4 피로 시험 방법

본 연구에서는 위에서 설명된 피로 시험기를 사용하여 Fig. 3과 같이 시험편을 지그에 장착하여 시험편의 충분한 냉각을 위해 Mark-III : -125℃, Mark-III Flex : -139℃에서 최대 수축변위를 설정하기 위해 3시간 동안 냉각을 유지하여 수축 변위가 일정해 질 때까지 온도를 유지하였다. 피로 하중의 부하 형태는 하중 비(R)=0인 정현파(Sinusoidal)로 했으며, 해당 과정은 Fig 5에 나타내었다. 냉각이 완료되면 변위 제어 설정으로 수행했으며, 시험조건은 Table 2에 나타내었다.

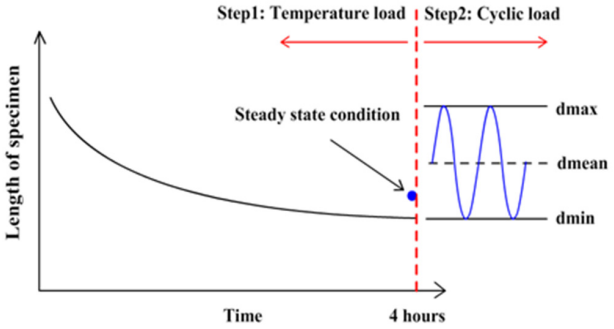

Fig. 5 Procedure of fatigue test

Table 2 Fatigue condition

Test type	Mark-III	Mark-III Flex
Displacement ratio	0	
Displacement range	2.20 mm	2.23 mm
Temperature	-125℃	-139℃
Waveform	Sinusoidal	
Frequency	3 Hz	

FSB의 파단이 발견된 시험편에 대해서는 하중 변화가 발생 시, 해당 피로 주기를 파단 시점으로 정의하였다. 또한 시험편의 대표적인 피로 관심 부위 및 손상 과정에 대한 상세한 정보는 Fig 6, 7에 나타내었다.

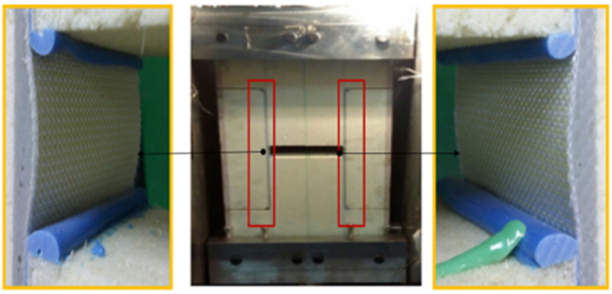

Fig. 6 Interesting section of FSB

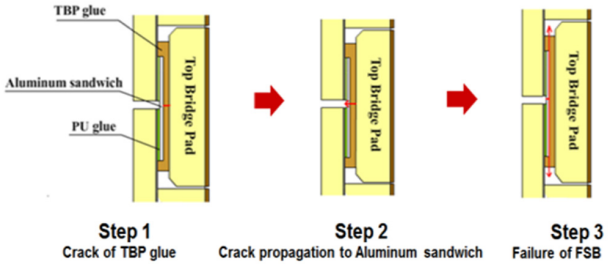

Fig. 7 Typical procedure of failure of FSB

3. 통계적 분석을 통한 피로수명

3.1 Weibull 분포 이론

피로 수명 데이터는 시험편의 치수, 경도, 표면 상태 등 여러

가지 요소들에 의해 같은 조건에 피로 시험을 진행하더라도 피로수명은 동일하지 않는 결과를 얻는다. 수명평가에 주로 사용되는 Weibull 분포는 피로수명 및 파단 확률을 나타낼 수 있다 (Libin, et al., 2017).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \tag{3}$$

여기서, β는 형상모수, x는 파단 주기, α는 척도 모수 또는 특성 수명을 의미한다. 형상모수는 분포의 형상을 결정하는 모수이다. 척도모수는 재질에 따라 변할 수 있는 내구성의 척도이며 Weibull 분포의 특성 수명이라 불린다 (Vorechovsky, et al., 2010).

$$F_f(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{4}$$

$$1 - F_f(x) = e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \tag{5}$$

$$F_s(x) = 1 - F_f(x) \tag{6}$$

$$R_x = 1 - P_x \tag{7}$$

여기서, $F_f(x)$는 파단확률, $F_s(x)$는 생존확률 또는 신뢰성 (R_x)을 의미한다.

LNGC 2차 방벽 FSB의 파단 확률은 P_1, P_{10}, $P_{63.2}$, P_{90}로 기준을 설정하였으며 각각의 파단 확률에 해당되는 파단 주기를 N_{Px}로 FSB의 파단 확률(x%)에 해당되는 피로 주기를 식(8)을 이용하여 나타내었다 (Effertz, et al., 2016).

$$N_{P_x} = \alpha \times \left((-\ln(R_x))^{\frac{1}{\beta}}\right) \tag{8}$$

최소제곱은 누적분포함수의 추정 값이 필요하며, 본 연구에서는 시험편의 개수가 소표본이므로 메디안 랭크(Median rank)법을 이용하여 계산하였다 (Effertz, et al., 2016).

$$MR = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \tag{9}$$

여기서, n은 각 피로 시험에 해당되는 시편 수, i번째 고장 발생 주기를 의미한다.

3.2 확률분포의 적합도 검정 및 평가

확률분포를 추정하여 사용 할 경우, 먼저 적합도 검정을 통해 추정된 확률분포가 타당한가를 통계적으로 검사하여야 한다 (Maha, et al., 2002).

본 연구에서는 적합도 검정방법으로 Anderson-Darling 검정 (A-D Test)을 이용하였다. A-D Test를 통해 추정된 확률분포의 적합성 판단 및 동일한 수명 자료를 다수의 분포에 적용시켰을 때 AD 값이 가장 작은 값을 갖는 분포가 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. A-D Test 로 확률분포 합수를 검정한 후에 모수 추정방법에 따른 각각의 분포들의 피로수명예측 정확도 평가를 위해 식 (10)을 이용한 잔차제곱합(Sum of Squared Error, SSE)을 이용하였다. Table 3은 확률 분포의 적합 분포를 판단하기 위해 A-D Test 결과를 나타내었다.

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (F_{i,\,\text{실험값}} - F_{i,\,\text{예측값}})^2 \tag{10}$$

Table 3 Results of A-D value test for optimum distribution

Test type	Mark-III E-glass FSB	Mark-III Flex E-glass FSB	Mark-III Flex Aramid(weft, 2:1) FSB
Weibull distribution	2.98	2.92	2.15
Lognomal distribution	2.99	2.97	2.15
Exponential distribution	3.27	3.78	2.92
Normal distribution	2.99	2.95	2.19

Table 3에서 신뢰수준 95%에서 정규분포, 대수정규분포, 지수분포, Weibull분포 모두 적합한 것으로 나타났다. A-D값 비교에서는 대수정규분포의 적합성이 Mark-III Flex Aramid(weft 2:1) FSB에서만 상대적으로 다소 떨어지는 것을 보였으며, 소수점 둘째자리에 근소한 차이를 보였다. 따라서 다양한 분포 함수 중 Weubull분포 함수를 가장 적합한 확률분포로 선정하였다.

4. 피로 시험 결과

본 연구에서는 기존의 E-glass 섬유를 적용한 FSB 대비 높은 강도와 내구성을 갖는 강화섬유인 Aramid FSB를 적용한 LNG 2차 방벽의 극저온 피로 강도 평가를 수행하였다. 시험편의 파단 수명을 평가하기 위해 시험편의 최대 수축량을 고려하여 3시간 동안 냉각 후 피로 시험을 진행하였다. Fig. 8는 극저온 피로 시험 시 변위 제어를 설정하여 하중 주기를 나타내었으며, 하중 그래프가 감소되는 시점을 파단으로 정의하였다. 대표적인 FSB의 파단 위치 및 파단면을 Fig. 9에 나타내었다.

시험편의 대표적인 파단은 FSB의 중앙면, 경계면, TBP glue에서 발생하였다. TBP glue의 파단은 FSB의 초기균열에 의한 노치를 발생시켜 FSB의 파단을 발생시켰다. FSB 중앙면에서의 파단은, 상대적으로 강도가 높은 Aramid 섬유는 파단이 발생하지 않고 E-glass 섬유만 파단되었다. 피로하중 방향과 평행인 1축 (0°), 수직방향인 2축 (90°)을 기준으로 FSB 파단 분석한 결과, 하중 방향과 수직인 2축 (90°) 방향에서 E-glass 섬유는 파단이 발생했으며, 평행인 1축 (0°)에서는 파단이 발생하지 않았다.

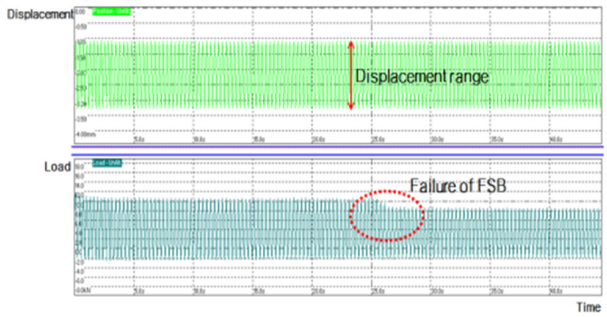

Fig. 8 Displacement versus load curve(after fatigue test)

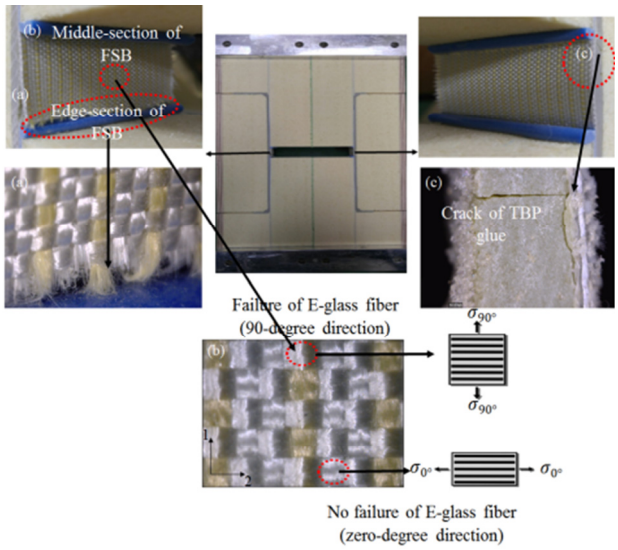

Fig. 9 Typical failure of FSB at cryogenic temperature

Table 4 Probability failure of FSB

Failure probability (%)	Mark-III E-glass FSB	Mark-III Flex E-glass FSB	Mark-III Flex Aramid (weft, 2:1) FSB
P1	4,628	9,219	13,838
P10	11,304	11,367	29,667
P63,2	26,585	13,893	61,576
P90	36,504	15,025	80,725

상기 결과를 통해 하중 방향에 따른 강도 차이의 특성을 나타내는 이방성재료임을 확인하였다.

LNG 2차 방벽 설계 기준을 결정하는데 필요한 피로 수명주기의 변동성을 최소화하기 위해서, 확률론적 접근 방법인 Weibull 분포를 이용하여 FSB의 피로수명을 예측하였다. 극저온 피로 시험 결과를 기반으로 척도 모수와 형상 모수를 도출하여 Fig. 10에 나타내었으며, 수치 값은 Table 5에 나타내었다. Weibul 분포함수를 비교 분석한 결과, Aramid(weft, 2:1) FSB를 적용한 2차 방벽은 기존의 E-glass FSB 대비 높은 피로 내구성을 갖는 결과를 확인하였다.

LNG 2차 방벽 FSB의 파단 확률은 Weibull 누적분포함수 Fig. 11에 나타내었다. 해당 결과를 통해 파단 확률을 Table 4에 나타내었다. 식(11)을 통해 Weibull 파단확률(P63,2)은 Mark-III

Table 5 Weibull parameter after fatigue test

Weibull distribution parameter	Mark-III E-glass FSB	Mark-III Flex E-glass FSB	Mark-III Flex Aramid (weft, 2:1) FSB
Shape parameter	2.6	11.2	3.0
Scale parameter	26,585	13,893	61,576

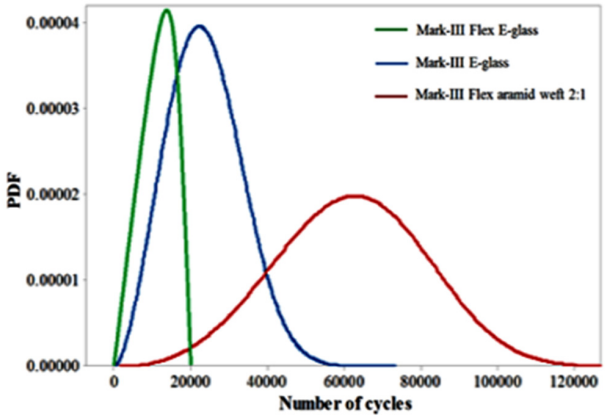

Fig. 10 Weibull distribution Function of Each Specimen

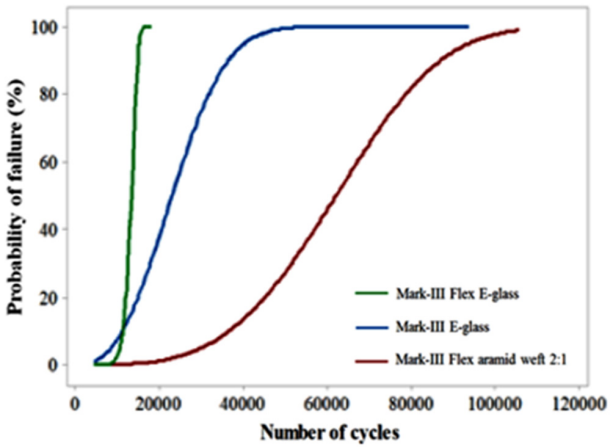

Fig. 11 Cumulative distribution function of each specimen

E-glass FSB는 26,585 cycle, Mark-III Flex E-glass FSB는 13,893 cycle, Mark-III Flex Aramid(weft, 2:1) FSB는 61,576 cycle임을 확인하였다. 상기 결과를 통해 Aramid 섬유를 적용한 FSB는 LNG 2차 방벽의 강도를 높이는 재료임을 입증하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 LNG 2차 방벽의 내구성을 높이기 위해 섬유강화재료인 Aramid 섬유를 적용하였다. E-glass 섬유와 Aramid 섬유의 위사 비(2:1)를 적용하여 극저온 피로 강도 평가 수행을 진행하였다. 극저온 피로 시험 결과를 바탕으로 파단 확률 및 파면 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- Mark-III(-125℃), Mark-III Flex(-139℃) 조건에서 E-glass 섬유를 적용한 FSB 피로 수명 차이는 해당 온도 차이에 의한 변위 값의 차이로 판단된다.
- 누적 분포 함수를 이용한 FSB의 파단 확률(P90)에서 Aramid(weft, 2:1) FSB은 80,725 cycles, E-glass FSB는 15,025 cycles을 나타내었다. 상기 결과를 통해 Aramid 섬유는 피로 강도를 높이는 재료임을 증명하였다.
- FSB 중앙면에서 파단 분석한 결과, 피로하중 방향과 평행인 1축(0°), 수직 방향인 2축(90°)에서의 E-glass 섬유는 이방성 재료의 특성을 나타내었다. LNG 2차 방벽 설계 시, 하중 방향을 고려한 설계가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013)

References

Effertz, P.S. Infante, V. Quintino, L. Suhuddin, U. Hankec, S. & Dos santos, J.F., 2016. Fatigue life assessment of friction spot welded 7050-T76 aluminium alloy using Weibull distribution. *International Journal of Fatigue*. 87, pp.381-390.

Libin, Z. Meijuan, S. Fengrui, L. & Jianyu, Z., 2017. A probabilistic model for strength analysis of composite double-lap single-bolt joints. *Journal of Composite Structures,* 161, pp.419-427.

Maha, A. Richard, B. & Abdul, Z., 2002. Three-parameter vs. two-parameter Weibull distribution for pultruded composite material properties. *Journal of Composite Structures,* 58, pp.497-503.

Oh, D.G. Lee, J.M. Chun, M.S & Kim, M.H., 2017. Reliability evaluation of a LNGC insulation system with a metallic secondary barrier. *Journal of Composite Structures,* 171, pp.43-52.

Park, S.C. Kang, S.S. Kim, G.Y. & Choi, J.H., 2013. Evaluation of tensile strengths and fracture toughness of plain weave composites. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering,* 37(8), pp.862-868.

Radhakrishnan, K., 1984. Fatigue and reliability evaluation of unnotched carbon epoxy laminates. *Journal of Composite Materials,* 18(1), pp.21~31.

Satoshi, N., 1980. Statistical analysis to fatigue test data. *Journal of the Society of Materials Science,* 29(316), pp.24-29.

Vorechovsky, M., 2010. Incorporation of statistical length scale into Weibull strength theory for composites. *Journal of Composite Structures*, 92(9), pp.2027-2034.

박 진 형 | 오 동 진 | 김 민 규 | 김 명 현