

LNG 운반선에 적용된 독립형 탱크의 균열 진전 해석에 관한 연구

김범일* · 모하메드 샤피쿨**

* 한국선급 선박해양기술팀 수석연구원, ** 한국선급 선박해양기술팀 선임연구원

Crack Propagation Analysis for IMO Type-B Independent Tank with Liquefied Natural Gas Carrier

Beom-il Kim* · Islam MD Shafiqul**

* Principal Researcher, Ship & Offshore Technology Team, Korean Register, Busan 49112, Korea

** Deputy Senior Researcher, Ship & Offshore Technology Team, Korean Register, Busan 49112, Korea

요 약 : LNG 운반선은 선체와 화물창이 일체형인 멤브레인 타입을 적용한 대형선을 중심으로 건조되어 왔으나, 최근 친환경 연료인 LNG의 수요 증가 및 LNG bunkering 인프라 확대, 중소형 운반선에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 중소형 LNG 운반선에 IMO B 형식 탱크를 적용하고 설계의 안정성 및 적합성을 검증하는 것을 목표로 하였고, B 형식 탱크를 적용하는 경우 필수적으로 수반되는 파괴역학 기반의 균열 진전 해석 및 가스 누출을 대비하여 설치되는 부분 2차 방벽의 크기의 결정을 위한 내용을 소개하였다. LNG 운반선 적용에 적용되는 국제 규정인 IGC 코드를 이용하여 설계 수명동안 균열 진전 해석에 적용될 응력 분포를 산정하는 방법을 제시하였고, Paris 법칙과 British Standard 7910 (BS 79110) 기반의 균열 진전 해석 프로그램을 개발하여 표면 균열 진전 해석을 수행하였다. 다음으로 2차 방벽의 크기를 결정하기 위하여, 초기 관통 균열의 크기를 가정할 수 있는 방법론을 제시하고, 균열 감지 후 회항 가능 기간인 15일 동안의 관통 균열 진전 해석을 수행하여 국제 규정에서 요구하는 B 형식 화물 탱크의 안정성 및 적합성을 검증하였다. 더 정확한 피로 균열 진전 해석을 위하여 코드 기반에 더하여 직접 해석을 통한 해석 절차 개발 및 검증이 필요할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 중소형 LNG 운반선, IMO B 형식 탱크, 피로 균열 진전 해석, Paris 법칙, British Standard 7910 (BS 7910)

Abstract : Membrane-type hull and cargo holds have been designed and built for large ship. However, there is a growing interest in applying the same technology to small and medium-sized Liquefied natural gas(LNG) carriers to meet the recent increase in demand for LNG as an ecofriendly fuel and for expanding LNG bunkering infrastructure. The purpose of this study is to apply the IMO Type-B tank to small and medium-sized LNG carriers and verify the safety and suitability of the design. Fatigue crack propagation analysis was performed to install a partial second drip tray installed at the lower part of the LNG cargo tank by calculating the amount of leaked gas in the support structure supporting the cargo tank. First, a program for fatigue crack propagation analysis was developed, in which Paris' law and British Standard 7910 (BS 79110) were applied based on the International Code for the Construction of Equipment and Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, an international standard for LNG carriers. In addition, a surface crack propagation analysis was performed. Next, a methodology for assuming the initial through-crack size was developed to determine the size of the partial second barrier. The analysis was performed for 15 days, which is a possible return time after cracks are detected. Finally, the safety and suitability of the IMO Type-B for LNG cargo tanks required by international regulations were verified. For the accurate analysis of fatigue crack propagation, it is necessary to develop and verify the analysis procedure based on direct analysis and international regulations.

Key Words : Small and medium-sized LNG carriers, IMO Type-B tank, Fatigue crack propagation analysis, Paris' law, British Standard 7910 (BS 7910)

† bikim@krs.co.kr, 070-8799-8584

1. 서론

IMO B 형식 탱크는 선체와 화물 탱크가 독립적으로 설계되어 탱크 내부에 저장된 액체 화물의 운동에 의해 발생하는 화물 내부 충격 하중에 대한 탱크 내부의 구조적 안전성 확보가 가능하고 선박의 연료 탱크에 적용 가능한 것과 같은 설계 유연성을 갖는 장점이 있다. 다만, 가스 누출을 대비하여 규정에서 요구하는 일정 기간 동안의 LNG 유출량을 계산하여 탱크 내부 구조에 부분 2차 방벽(Partial 2nd Drip Tray)을 필수적으로 설치해야 한다. 국제 해사 기구(IMO)에

서 규정하는 독립형 탱크는 A 형식, B 형식, C 형식으로 정의된다. A 형식은 일반 액체 탱크 규정에 따르며, 액상 화물의 유출 가능성이 있다고 가정되면 만일의 대량 유출에 대비하여 완전 2차 방벽이 요구되고 주로 LPG 운반선에 적용된다. B 형식은 광범위한 구조 해석에 의해 탱크의 구조적 안정성을 확인해야 하며, 균열(Crack) 발생을 가정하여 파괴 역학 기반의 피로 균열 진전 해석을 통해 누출량을 산정하고, 이를 적재할 수 있을 만큼의 부분 2차 방벽을 요구한다. C 형식은 압력 용기로 안전성과 신뢰성이 확보되어 있어 누출의 우려가 없으므로 2차 방벽이 불필요하다.

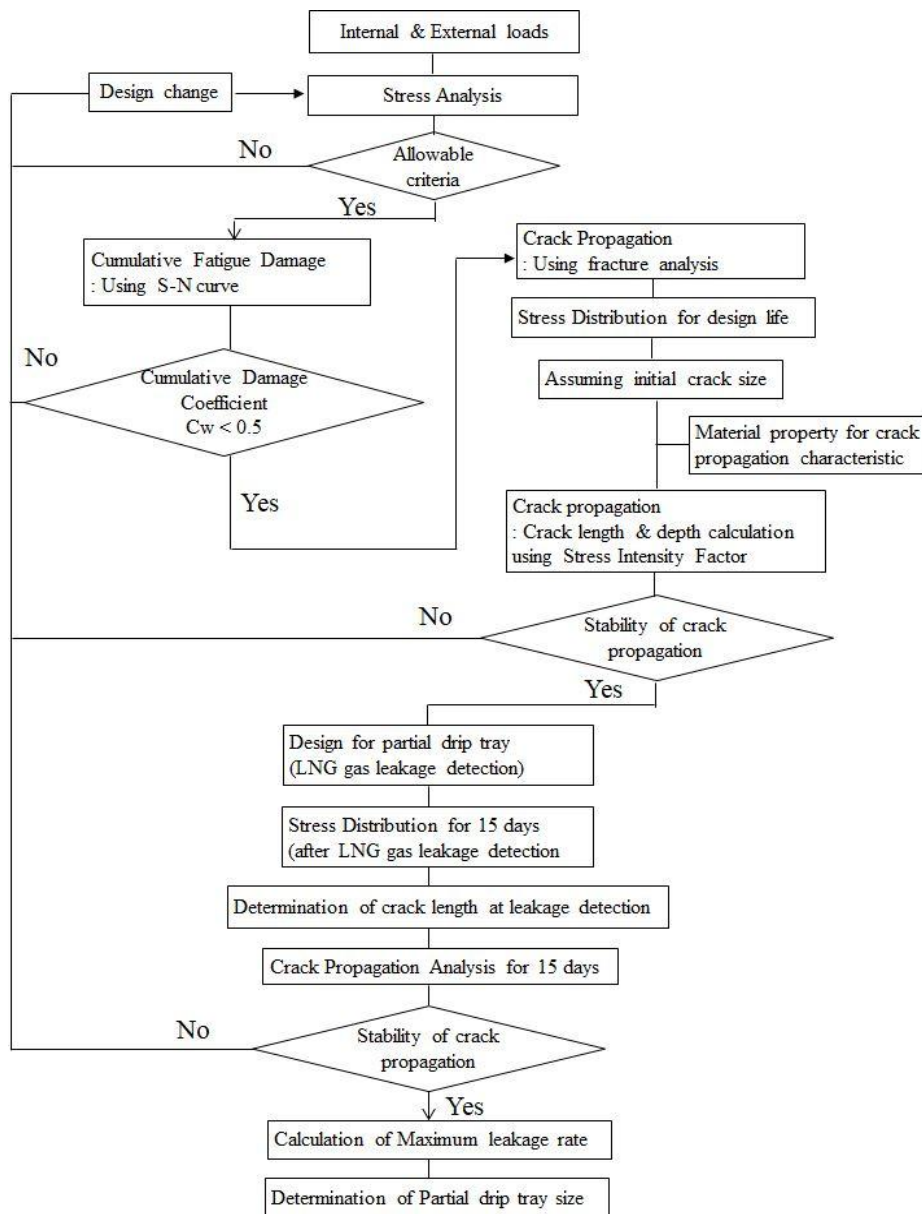


Fig. 1. Design Procedure of Type B tank system.

Moss 타입으로 잘 알려진 B 형식의 경우 기존의 원형 구조는 구조적으로 안정성이 매우 뛰어났으나, 공간 활용에 불리하고 갑판 상부 돌출부로 인하여 배의 시야 확보에 불리하다. 이를 극복하기 위하여 LNG 화물 탱크가 선체 안에 들어가면서 형상 및 크기의 제약을 극복했으나 화물창 응력 해석, 피로 균열 진전 해석 및 열응력 해석등을 통하여 화물창 내에서 취성 파괴가 일어나지 않도록 검증이 요구되며, 화물 탱크의 부분적인 파단으로 인하여 누출된 LNG 가스를 저장할 수 있는 부분 2차 방벽이 필수적으로 설치되어야 한다(Noh et al., 1993a; 1993b). B 형식 탱크를 적용한 LNG 운반선의 구조 안정성 평가를 위하여 Fig. 1과 같이 누적 피로 손상도 계산과 균열 진전 해석이 필수적으로 요구된다(IMO, 2016). 하지만 B 형식 탱크의 경우, 피로 강도 평가 및 균열 진전 해석에 대한 기존의 연구 사례는 찾아보기 극히 드물다. Kim(1999)은 Moss 타입에 대한 균열진전해석과 부분 2차 방벽의 계산 과정에 대하여 개념적인 절차를 간략히 소개하였으며, 비교적 최근에 Park et al.(2016)는 B 형식 탱크 상부 Rolling chock에 대하여 시간영역에서의 피로 해석을 시도하였다.

본 연구에서는 일반적인 모든 선박에 적용되는 구조 취약부에 대한 누적 피로 손상도 계산 과정은 제외하고, 독립형 탱크에 특별히 요구되는 피로 균열 진전 해석에 관련된 내용과 부분 2차 방벽의 크기를 결정하는 과정을 소개하였다. 먼저 국제 협약(IGC CODE)(IMO, 2016)의 산식을 이용하여 탱크에 작용하는 정하중 및 동하중을 생성하고 구조 해석을 수행하여 설계 수명 동안 발생할 수 있는 가장 큰 응력 범위를 계산하였다. 다음으로 화물창 내부의 초기 균열을 가정하고 균열 진전 해석에 적용될 응력 분포를 재산정하여, 선박의 설계 수명 동안 화물 탱크 내의 구조 취약 부재에서 두께 방향으로 균열이 관통되지 않음을 확인하였다.

다음으로 예상되지 않은 관통 균열에 의한 LNG 가스 유출에 대비하여 부분 2차 방벽 설계를 위한 계산을 수행하였다. 이때, 가스 누설 감지시의 균열 치수의 결정이 필수적으로 요구되며, 국제 협약에서 요구하는 15일 동안의 유출량을 추정하여 부분 2차 방벽의 용량을 결정한다. 이 해석을 위한 초기 관통 균열의 크기는 BS 7910(BSI Standards Publication, 2018)의 FAD(Failure assessment diagram) 기법을 적용하는 방법을 제시하였으며, 관통 균열 진전 해석을 수행하고 유출량 계산을 수행하여 최종적으로 부분 2차 방벽의 크기를 결정하여 LNG 화물 탱크의 안전성 및 적합성을 검증하였다.

2. 적용 응력 계산

피로 균열 성장 관점에서 주 관심 하중은 설계 수명 동안 반복적으로 작용하는 하중 이력이며, 독립형 탱크도 일반

선박에서와 마찬가지로 파랑 하중이 주요한 인자이다. 장기 파랑 하중에 대한 응력 분포는 피로 파괴와 직접적으로 연관되며, 일반적으로 설계 단계에서 실제 환경 하중을 정확히 고려하기 위해서는 직접 운동 해석(Direct load analysis), 통계 해석(Stochastic analysis)을 통하여 장기 응력 분포(Longterm stress distribution)를 추정한다.

본 연구에서는 이 과정의 간략화를 위하여 국제 규정(IGC CODE)(IMO, 2016)의 방법을 적용하였고, Fig. 2와 같이 와이بل 분포를 이용한 단순화된 하중 이력을 사용하는 방법을 적용하였다. 국제 규정에서는 표면 균열 진전 해석을 수행하여 수명동안 균열이 구조 부재를 관통하지 않고 화물이 유출되지 않음을 입증해야한다. 그럼에도 불구하고 균열이 감지된다면, 항구로 회항할 수 있는 15일 동안 취성 파괴가 일어나지 않음을 증명해야 하며, 관통 균열 진전 해석을 수행하여 유출되는 화물을 담을 수 있는 부분 2차 방벽을 요구 하고 있다. 또한 두 해석 모두 선박의 설계 수명동안 발생할 수 있는 가장 큰 응력 수준을 이용하는 방법을 제시하고 있다.

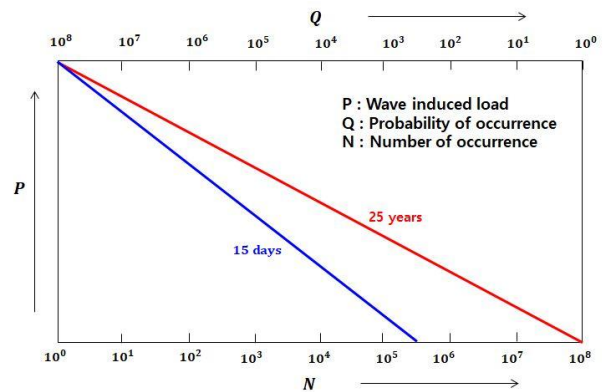


Fig. 2. Simplified load distribution.

LNG 화물 탱크에 작용하는 관성력은 식(1), (2), (3), (4)에 나타난 것과 같이 국제 규정에서 제시하는 통계 처리된 산식 기반의 가속도를 이용하여 계산할 수 있다. 이 식들은 가장 가혹한 해상 환경 조건인 북대서양(North Atlantic)에서 선박의 운동에 의한 성분별 가속도 식이다(IMO, 2016). 수직 방향 가속도는 정적 중량으로 인한 성분을 포함하지 않으며, 횡방향 가속도와 종 방향 가속도는 각각 횡요(Rolling)와 종요(Pitching)에 의한 정적 하중에 의한 성분을 포함한다. 피로 하중에 대한 응력 이력을 계산하기 위하여 탱크 내부에 발생하는 슬래밍과 같은 충격 하중은 고려되지 않는다.

$$\text{수직 방향 가속도 } (a_z) \tag{1}$$

$$= \pm a_0 \sqrt{1 + \left(5.3 - \frac{45}{L}\right)^2 \left(\frac{x}{L} + 0.05\right)^2 \left(\frac{0.6}{C_B}\right)^{1.5} + \left(\frac{0.6gk^{1.5}}{B}\right)^2}$$

횡방향 가속도(a_y)

$$= \pm a_0 \sqrt{0.6 + 2.5 \left(\frac{x}{L} + 0.05\right)^2 + K \left(1 + 0.6k \frac{z}{B}\right)^2}$$

길이 방향 가속도(a_x)

$$= \pm a_0 \sqrt{0.06 + A^2 - 0.25A}$$

$$a_0 = 0.2 \frac{V}{\sqrt{L}} + \frac{34 - 600/L}{L}$$

여기서,

$$A = \left(0.7 - \frac{L}{1200} + 5 \frac{y_t}{L}\right) \left(\frac{0.6}{C_b}\right)$$

여기서 L 은 선박 길이, C_b 는 방형 계수, B 는 선박의 너비, V 는 선박의 항해 속도, k 는 일반적으로 1.0이 적용되나 특정한 하중조건이나 선체의 형태인 경우 횡미터센터높이를 선박의 너비로 나눈 값에 13배를 적용할 수 있다 (13GM/B). 또한 식에서 x, y, z 는 각각 선박의 중앙으로부터 탱크의 중심 위치까지의 종(Longitudinal), 횡(Transverse), 높이(Vertical) 방향 거리를 나타내며, y_t 는 흘수선에서 화물창의 무게 중심까지의 거리이다.

Table 1. Loading condition for fatigue analysis

No.	Loading condition	Dominant load parameter	Dynamic loads	
			External	Internal
1	Full and ballast loading condition	(a) Longitudinal acceleration	Static	$+P_{ax}$
2			Static	$-P_{ax}$
3		(b) Transverse acceleration	Static	$+P_{ay}$
4			Static	$-P_{ay}$
5		(c) Vertical acceleration	Static	$+P_{az}$
6			Static	$-P_{az}$
7		(d) Vertical bending moment	Crest	Static
8			Trough	Static

작용 방향을 고려한 최종 하중 조건을 Table 1에 나타내었다. 각각의 하중 인자의 최대값은 독립적으로 발생한다고 가정하였으며, 선체와 독립적으로 운동하는 독립형 탱크의 관성력을 고려하기 위하여, 피로 응력 계산을 위한 주요한 하중 인자는 화물 탱크의 (a)종, (b)횡, (c)높이 방향의 최대 가속도로 산정하였으며, (d)최대 파랑 중 선체 수직 굽힘 모멘트를 추가하였다. 여기서 External의 Crest는 선체 중앙부에서 양의 최대 파고, Trough는 음의 최대 파고를 의미하며, Internal의 (+)는 우현 방향, (-)는 좌현 방향을 나타내며

(2) P_{ax}, P_{ay}, P_{az} 는 x, y, z 방향의 가속도가 고려된 압력을 의미한다. 독립형 탱크는 선체에 용접되지 않고 별도의 지지부(Support structure)를 통하여 지지된다. 지지부와 탱크 사이에는 목재(Wood)를 설치하여 열 수축시 자유롭게 슬라이딩(Sliding)함과 동시에 전도를 통한 열전달을 최소화 하도록 설계된다. 즉, 탱크 자체가 지지 목재(Support wood)에 얹혀지는 구조이므로 물리적으로 목재에 인장 반력이 발생할 수 없다. 또한, 반력의 분포는 선체의 전체 거동(Global behavior) 및 주변 구조의 강성에 따라 특정 지지부에 반력이 집중된다. 따라서 실제와 가까운 반력 분포를 얻기 위해서는 목재 주변에 갭 요소(GAP element) 또는 접촉 요소(Contact element)를 사용해야 하며, 본 연구에서는 Nastran GAP Element(MSC Software Corporation, 2012)를 사용하여 인장력은 고려되지 않고 마찰을 고려한 압축력이 작용될 수 있도록 비선형 정적 해석을 수행하였다. Table 2에 대상 선박의 주요 요목을 나타내었다.

(3)

(4)

(5)

Table 2. Main dimensions

Length between perpendiculars	165.6m
Rule Length	160.0m
Breadth	28.4m
Depth	18.2m
Scantling Draught	8.4m
Block Coefficient	0.701
Maximum service speed	18.2Knots

Fig. 3은 피로 해석에 사용된 모델이다. 길이 방향으로 세 개의 탱크를 연결하여 그림과 같이 양 끝단에 단순 지지 경계 조건을 부여하고, 탱크의 가속도를 고려한 관성력(내압)과 외압을 가한다. 또한 설계 수명 동안 수직 굽힘 모멘트의 최대값을 가하기 위하여 모델 양 끝단에 길이 방향으로 축하중을 가하였다.

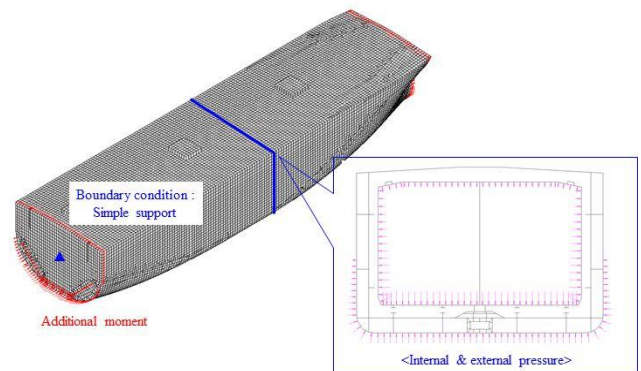


Fig. 3. Fatigue mesh for crack propagation analysis.

해석 수행 결과, 수직 지지구조(Vertical support structure)와 종동요 방지 지지 구조(Anti. pitching support structure) 주변의 종통 보강재(Bottom longitudinal connection)등에서 고응력이 식별되었다. 이러한 구조 불연속 부위는 항복 강도에도 취약한 부위이며, 일반적으로 국부 상세 해석을 통하여 피로 해석 이전에 구조 안전성을 검증한다.

본 연구에서는 피로 균열 진전 해석 대상 부위를 Fig. 4와 같이 수직 지지구조, 종동요 방지 지지구조 및 횡동요 방지 지지 구조(Anti rolling support structure)와 같은 LNG 화물 탱크와 선체의 연결 부재를 선택하였으며, 일반 종통 보강재 연결부(Typical bottom longitudinal connections) 중 스크리닝을 통하여 가장 큰 응력이 발생하는 부위를 피로 균열 진전 해석 대상 부위에 추가하였다.

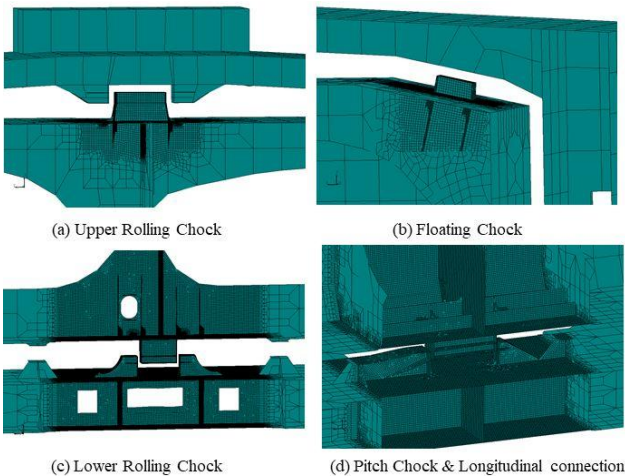


Fig. 4. Fatigue mesh for crack propagation analysis.

3. 균열 진전 해석

완전한 2차 방벽이 요구되는 멤브레인 타입과 달리 B 형식 탱크는 탱크의 하부에 부분 2차 방벽이 요구된다. 단 설계 단계에서 엄격한 구조 해석과 파괴역학 기반의 피로 균열 전파해석을 수행하여 재료의 취성 파괴가 발생되지 않음을 증명하는 과정이 요구된다. 이러한 설계 개념은 항공, 원자로 등에 주로 적용되었으며, 손상 허용 설계(Damage tolerance design) 및 파단 전 누설(Leakage before failure theory)의 개념을 LNG 탱크의 설계에 반영한 것이며, Fig. 5와 같은 3단계의 엄격한 검증 과정이 요구된다.

Step 1 : 탱크 구조에 피로 균열이 발생되지 않음을 증명해야 한다. 즉, 선박의 정기 검사 간격, 검사 방법, 또는 검지 가능한 균열 크기를 고려하여 그 초기 균열이 탱크 또는 구

조 부재의 강도 저하를 가져오는 크기로 진전되지 않음을 증명해야 한다.

Step 2 : 피로 균열이 발생하더라도 설계 수명 동안 탱크 벽을 관통하지 않음을 증명해야 한다.

Step 3 : 만약 피로 균열이 탱크벽을 관통하더라도 취성 파괴로 이어지지 않고, 일정 기간 동안(15일) 국부적인 균열로 남아 있다는 것을 증명하고, 피로 균열량을 추정하고 가스 누출량을 계산해야 한다.

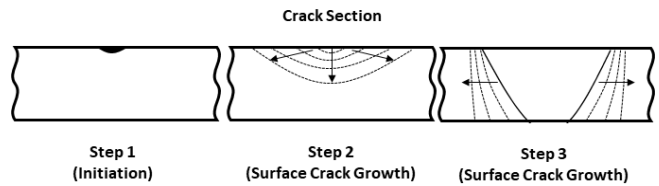


Fig. 5. Crack propagation analysis steps.

앞의 3단계의 검증 과정을 통하여 규정에서 제시하는 응력 분포 및 해석 방법 이외에 초기 균열과 같은 가정 값이 필수적으로 요구되므로 합리적인 방법을 적용하는 것이 중요하다.

3.1 표면 균열 진전 해석

표면 균열 진전 해석을 수행하기 위하여 초기 균열 크기의 가정이 필요하다. 대부분의 선급에서 균열에 대한 초기치를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 한국 선급의 피로 균열 지침서(Korean Register, 2021)를 적용하여 필렛 용접부(Fillet weld)에 대한 균열 길이 5 mm, 균열 깊이 1.0 mm를 적용하였다.

다음으로 균열 진전 해석에 적용될 장기 응력 분포를 결정해야 하며 이는 선박의 설계 수명 동안의 확률 수준(10^{-8})을 기반으로 하는 장기 분포로 결정될 수 있다. 장기 응력 범위는 식(6)의 수정된 와이불 확률 분포(Weibull distribution) 매개 변수를 사용하여 결정할 수 있다. 연구에 적용된 단순화된 선형 관계는 다음과 같이 가정하였다.

$$\log_{10} N_i = 8 \times \left(1.0 \times \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma_0} \right) \quad (6)$$

총 응력스펙트럼은 Fig. 6과 같이 균열 전파 수명에 대한 응력 시퀀스의 영향을 제거하기 위하여 20개의 그룹으로 나누었다. $\Delta \sigma_0$ 는 선박 수명동안 가장 가능성이 높은 최대 응력 범위이며 $\Delta \sigma_i$ 는 임의의 응력 범위, N_i 는 임의의 응력 범위에 해당되는 발현 빈도수이다. 피로 해석을 통하여 계산된 최대 응력 범위(Max. stress range)를 이용하여 피로 균열

전과 해석을 위한 응력 분포(Stress distribution)로 사용할 수 있다. 또한 용접잔류응력은 항복 강도와 같다고 가정하여 계산하였다.

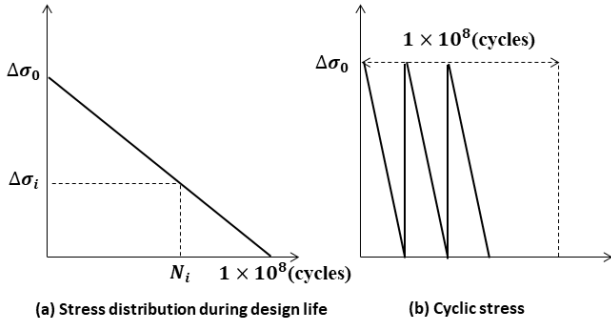


Fig. 6. Stress distribution crack propagation analysis.

초기 균열의 가정 이후 반복 하중이 발생하면서 증가되는 균열 길이와 깊이는 식(6)과 같이 피로 균열의 성장률을 나타내는 균열 성장 방정식인 Paris' 산식에 의해 주어진다. 응력 확대 계수(Stress intensity factor)는 균열 선단 주변의 하중을 특성화 하며 균열 성장률은 실험적으로 하중 주기에서 나타나는 응력 확대 계수 범위(ΔK)의 함수로 나타낼 수 있다.

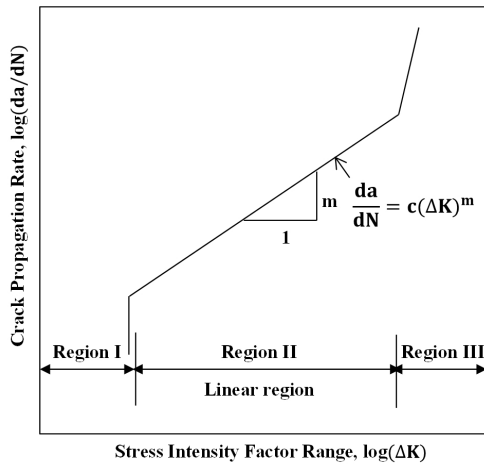


Fig. 7. Relation between fatigue crack propagation and stress intensity factor.

응력 확대 계수와 진전 속도는 Fig. 7과 같은 관계이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Region II에서 안정적으로 균열이 진전하며, 선형 관계로 표현될 수 있기 때문에, 산식을 통하여 균열 진전속도를 추정할 수 있다. 본 연구에서 균열 진전 해석의 대상 재질은 9% 니켈강이며, C는 5.14×10^{-12} , m은 3.0이 적용되었다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (7)$$

a : Crack length

N : Number of cycles

ΔK : Stress intensity factor range ($K_{max} - K_{min}$)

C,m = Material property for crack propagation

각각의 조건에 적용되는 다양한 응력 확대 계수를 계산하는 과정은 BS 7910에 자세히 서술되어 있지만, 기본적으로 복잡한 관계식은 식(8)과 같이 Newman-Raju식으로 간단히 표현될 수 있다(Newman and Raju, 1981).

$$\Delta K = (\Delta \sigma_m + H \Delta \sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F \quad (8)$$

Δσ_m : Membrane stress range

Δσ_b : Bending stress range

H, F : Shape parameters

식(8)을 식(7)에 대입하고 균열 선단의 응력과 균열 길이를 이용하여 응력 확대 계수 범위를 계산하고, 응력 범위에 대응하는 반복수를 대입하여 길이를 계산할 수 있다. 이 과정을 반복적으로 수행하여 설계 수명동안의 피로 균열 성장 수명을 예측할 수 있다. 일반적으로 균열 진전 해석을 수행하기 위하여 산업계에서는 TWI software에서 제공하는 CrackWise라는 상용 프로그램이 널리 사용하고 있다. 이 프로그램은 BS 7910을 기본으로 결점(Flaw)의 평가를 수행하는 프로그램이며, 본 연구에서는 BS 7910의 내용 중 연구에 필요한 부분만 적용하여 anaconda python 3.6을 이용하여 프로그램을 개발하였다. 해석 결과의 입출력이 용이하도록 csv 파일로 해석 결과를 출력하였다.

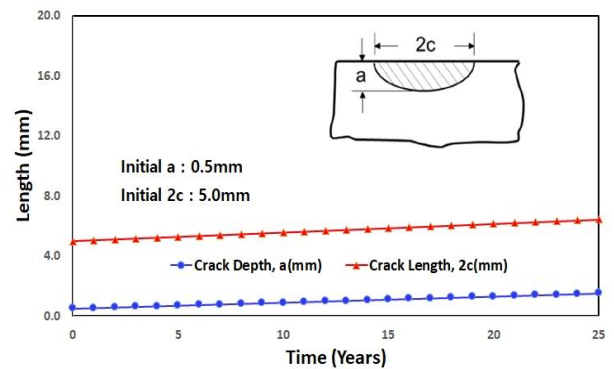


Fig. 8 Fatigue crack growth at the bottom longitudinal.

Fig. 8은 결과 파일의 예제이다. 초기 표면 균열깊이와 길이를 각각 0.5 mm, 5.0 mm의 반타원 표면 균열로 가정하고 Fig. 4의 각각의 구조 취약 부위에서 식(6)의 최대 응력 범위 ($\Delta\sigma_0$)를 계산하여 장기 응력 분포를 추정한다. 다음으로 식(7)을 이용하여 설계 수명 동안의 최종 균열 진전량을 계산한다. 표면 균열 해석 단계에서는 모든 해석 대상 구조 부재에서 설계 수명 동안 피로 균열이 두께 방향으로 관통되지 않음을 확인하였다.

3.2 관통 균열 해석

다음 단계로 누설 경보 장치를 통하여 균열이 발생함을 감지하고 가스가 유출되기 시작한 후, 15일 동안의 가스 유출량을 계산한다. 이 단계에서는 LNG 탱크와 같은 저장 용기에서 취성 파괴가 발생되기 전에 내용물의 누설이 있다는 점을 적용하는 파단 전 누설의 개념이 적용된다. 즉, LNG 유출에 대비하여 계속적으로 손상 여부를 모니터링하고 만약 국부적인 손상이 발생하였다면, 손상을 처리할 조치를 취할 수 있을 때까지 구조물의 급격한 취성 파괴가 일어나지 않도록 하는 개념이다. 앞절에서 구조 부재에 관통 균열이 발생되지 않음을 증명하였지만, B 형식 탱크에 요구되는 부분 2차 방벽의 설계를 위하여 가상의 관통 균열을 생성하여야 한다. 관통 균열은 표면 균열이 계속 증가하여 두께 방향으로 균열이 완전히 관통함을 의미한다. 본 연구에서는 국제 규정에서 요구하는 15일 동안의 화물 유출량 계산을 위한 초기 균열을 가정을 위하여 BS 7910의 FAD 기법을 응용하였다.

Fig. 9는 FAD를 나타내며, x축의 L_r (Load ratio)과 y축의 K_r (Fracture ratio)의 관계를 나타낸다. L_r 은 항복 응력(Yield stress)와 작용 응력(Actual stress)의 비를, K_r 은 응력 확대 계수(Actual stress intensity factor)와 파괴 인성(Fracture toughness)의 비를 나타낸다. L_r 과 K_r 이 1보다 작은 Acceptable 구간에서는 균열이 안정적으로 성장하고, 그 이외의 Unacceptable 구간에서는 균열이 매우 빠르게 증가되는 구간이다.

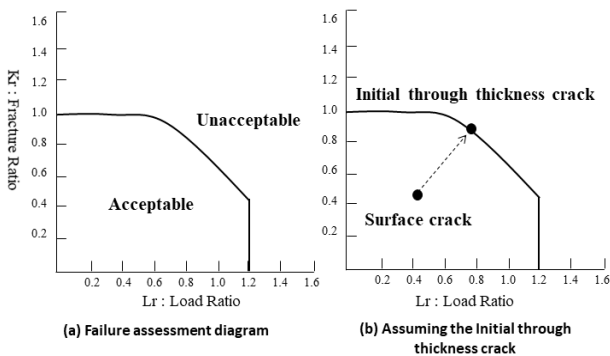


Fig. 9. Relation between fracture ratio and load ratio.

화물 유출량 계산의 보수적인 계산을 위하여 초기 관통 균열 상태를 Unacceptable 영역에서 계산하도록 하였다. 즉 앞의 3.1절에서 계산된 설계 수명 동안 진전된 표면 균열에 계속적으로 반복 하중을 가하여 균열이 두께 방향으로 관통되고 Unacceptable 구간에 접어드는 구간을 수치적으로 계산하였고, 이에 해당되는 피로 균열 크기를 유출량 계산을 위한 초기 관통 균열이라 가정하였다.

3.3 가스 유출량 계산

균열 개구로부터의 유량은 개구 크기에 매우 의존적일 것이며, 개구 크기는 균열 길이와 작용 응력으로 표현될 수 있을 것이다. 이때 균열 개구의 응력이 압축 상태이면 균열이 단혀서 누설이 일어나지 않는다고 가정할 수 있다. 따라서 Fig. 10과 같이 반복 응력, 균열 개구량과 누설 유량과의 관계를 나타낼 수 있다. 15일 동안의 설계 누설 유량은 T_n 과 T_{n+1} 사이클과 같이 인장 응력 상태에서 균열 개구를 계산하였다.

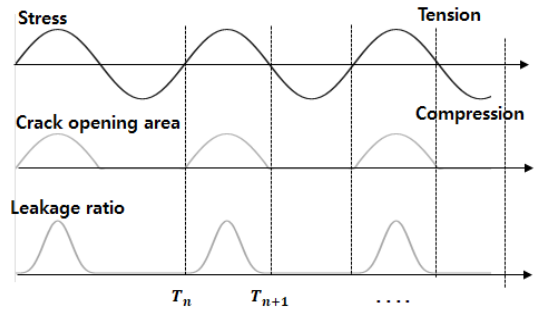


Fig. 10. Duty cycle of leakage.

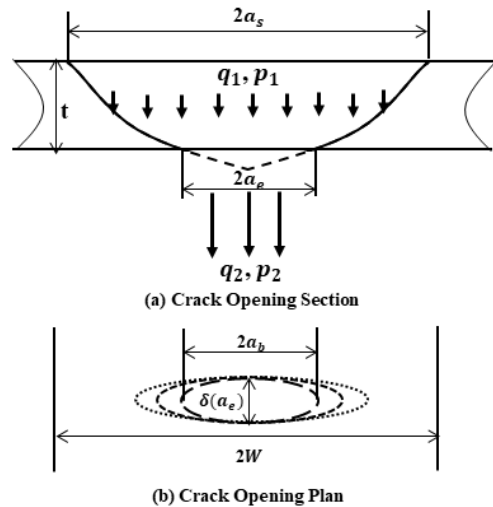


Fig. 11. COD model of a through-thickness crack.

탱크 표면의 초기 결함이 Fig. 11의 (a)와 같이 화물창을 관통한 균열로 성장했을 때, 한국 선급 피로 및 균열 진전 평가 지침서(Korean Register, 2021)에 따라 개구 변위(Crack opening displacement, COD)는 (b)와 같은 모델을 고려하여 아래의 식(9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\delta(a_b) = 4\sigma a_b(1 - \nu^2)/E \cdot V(\eta) \quad (9)$$

여기서 δ 는 균열 개구 변위, a_b 는 균열 길이의 1/2, σ 는 작용 응력이다. 또한 ν , E 는 포아송 비와 탄성 계수이며 $V(\eta)$ 은 형상 계수를 나타낸다.

마지막으로 화물 누설율은 계산된 균열의 면적과 LNG 화물 탱크의 내외부 압력등을 이용하여 계산할 수 있다. Fig. 11의 (a)에서 화물 탱크 안과 바깥의 평균 유속을 q_1 , q_2 라 하고 압력을 p_1 , p_2 라 하면 베르누이 방정식으로부터 식(10)과 같이 표현이 가능하고, 연속 조건을 적용하면 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{q_2^2 - q_1^2}{2} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (10)$$

$$\rho q_1 A_1 = \rho q_2 A_2 \quad (11)$$

식(11)을 식(10)에 대입하여 정리하면 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (12)$$

식(12)에서 압력과 관련된 항을 분리시키면, 나머지는 식(13)과 같이 상수로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{\frac{A_2}{A_1}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (13)$$

식(13)은 오리피스의 실험식이라 부르며, 무차원이고 실험적으로 구하는 유량 계수라 정의된다. 본 연구에서는 문헌을 통하여 유량 계수(=오리피스 계수, 0.1)를 적용하였다. 탱크 지지부의 일부는 누적 피로 손상도 계산 단계에서 국부적인 보강이 필요한 경우가 있고, 막응력(Membrane stress)이 항상 음인 경우는 균열이 항상 닫혀 있기 때문에 이러한 구

조 부내는 계산에서 제외하였다.

남은 해석 대상 부재 중 피로 강도에 가장 취약한 부위로 판별된 수직 지지부 주위 종방향 보강재 연결부에 대하여 관통 균열 진전 해석을 수행하였고, 15일 동안의 화물 유출량을 계산 결과를 Fig. 12와 Table 3에 나타내었다. 그림과 같이 화물 누설량 (Q)를 15일 동안 적분하여 부분 2차 방벽의 크기를 결정할 수 있고, LNG화물 탱크와 선체 사이의 공간에 2차 방벽을 설계할 수 있었다.

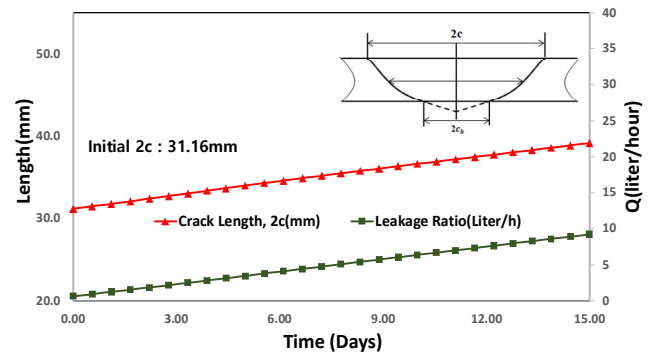


Fig. 12. Crack length and Leakage ratio calculation.

Table 3. Summary of cumulative leakage

Time (Days)	Q(liter/hour)	Cumulative leakage (liters)
3	2.421	174.31
6	4.082	468.22
9	5.997	899.28
12	7.572	1444.46
15	9.227	2108.81

4. 결론

본 연구에서는 LNG의 수요 증가에 따른 중소형 LNG 가스 운반선의 수요 증가가 예상됨에 따라, 화물 탱크의 공간 활용성 측면에서 유리한 B 형식 탱크를 중소형 LNG 운반선에 적용하는 절차와 기술을 개발하였고, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- LNG 가스 운반선에 대한 안전 규정 및 피로 강도 평가를 수행할 수 있는 하중 조건을 개발하였다.
- 부분 2차 방벽 설계를 위한 피로 균열 진전 해석 절차를 개발하고 해석을 수행하였다.
- BS 7910의 FAD 기법을 이용하여 가상의 관통 균열을 발생시키는 방법을 제시하였으며, 일정 기간 동안의 가스 유

출량을 계산하여 부분 2차 방벽의 크기를 결정하였다.

- 개발된 절차에 따라 B 형식 탱크에 필수적으로 요구되는 부분 2차 방벽의 크기를 결정할 수 있고, 국제 규정의 요구조건을 만족시킬 수 있는 프로그램을 개발하였다.

향후 증가할 B 형식 화물 탱크가 적용된 중소형 운반선의 수요에 선제적으로 대응할 수 있는 기초 연구였으며, 화물창 탱크의 구조 건전성을 높이기 위하여, 추후 정확한 피로 해석 절차 개발과 FE 해석 기반 및 실제 응력 분포를 적용한 피로 균열 진전 해석 절차의 개발이 필요할 것으로 보인다.

analysis on the upper rolling chock of IMO type B tank, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 53, No. 5, pp. 380-387.

Received : 2021. 03. 11.

Revised : 2021. 04. 26. (1st)

: 2021. 05. 11. (2nd)

Accepted : 2021. 06. 28.

References

- [1] BSI Standards Publication(2018), BS 7910- British Standard Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures
- [2] IMO(2016), International Maritime Organization, Maritime Safety Committee, International code of safety for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk (IGC code).
- [3] Kim, J. H.(1999), A Study on the Prediction of Fatigue Life by use of Probability Density Function, Journal of the Korean Society of Marine Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 453-461.
- [4] Korean Register(2021), Guidelines on Assessment of Fatigue and Crack Propagation.
- [5] MSC Software Corporation(2012), MSC Nastran 2012 User's Guide
- [6] Newman, J. C. and I. S. Raju(1981), An empirical stress intensity factor equation for the surface crack, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, pp. 185-192.
- [7] Noh, I. S., Y. W. Nam, and H. S. Lee(1993a), Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (1st report) - Fatigue Strength Analysis Based on the S-N Approach, Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 30, No. 2, pp. 132-140.
- [8] Noh, I. S., Y. W. Nam, and H. S. Lee(1993b), Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (2nd report) - Fatigue Crack Propagation Analysis Based on the LBF Theory, Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 30, No. 4, pp. 74-82.
- [9] Park, M. J., J. S. Park, S. I. Won, B. K. Choi, K. W. Park, Y. M. Paik, and Y. I. Kim(2016), Time domain fatigue