

극저온용 재료의 피로파괴 평가법에 관한 연구

김 종호¹⁾, 김 영식²⁾

A Study on the Evaluation Method of Fatigue Fracture for the Cryogenic Service Materials

Jong-Ho Kim, Young-Sik Kim

Abstract

Today liquefied natural gas(LNG) has become an energy source of great importance as the LNG can fulfill our present needs providing a relatively pollution free source of energy.

And in the years ahead a considerable increase in the use of LNG is foreseen.

In the case of LNG, as its boiling point is -162°C at atmospheric pressure it may introduce a total risk instigated by the many variables involved in the transportation or storage.

In this respect in the stages of design and construction of LNG tanks for LNG ships or storage tanks special engineering techniques, controlled work process and quality control are necessary considering the static loads and dynamic stresses due to wave induced forces, earthquake, typhoon, etc.

1)한국해양대학교 기계공학과 박사과정 설계가공 전공

2)한국해양대학교 재료공학과 교수

The problem of material selection arises from the well known fact that the carbon steel in general use becomes increasingly less notch toughness as its temperature decreases. As a result, aluminium alloys such as A5083-O and austenitic Fe-Ni alloy such as 36% Ni steel(Invar) and austenitic stainless steel have to be utilized in construction of LNG tanks.

In considering the subject associated with the safety of LNG tanks as mentioned above, this study is mainly dealing with the investigations related to the safety of type B independent LNG tank and membrane LNG tank and is aimed at :

(1) Determination of crack propagation behaviors of aluminium alloy A5083-O considering the effect of varying stress ratios and stress concentration such as weld toe,

(2) Evaluation of fatigue strength of 36% Ni steel.

The main results obtained in this study are summarized as follows:

1. A model like $da/dN=C(\Delta K^m-\Delta K_{th}^m)$ well demonstrated the FCPR for aluminium alloy A5083-O considering the effect of varying stress ratios and ΔK_{th} (threshold value of stress intensity factor range).
2. A model calculating the stress intensity factor for surface cracks on the toe of butt welded joint was developed and the model was found to express well the the results of fatigue tests.
3. A new model explaining the crack opening displacement[COD] of aluminium alloy A5083-O under combined membrane and bending stresses was proposed.
4. The computer simulation method for the FCPR of surface cracks

and through cracks was developed assuming that the surface cracks pre-existed on the surface of the type B independent LNG tank, which would be a useful tool for assessing cracking behaviors of the tank in service and a guideline for tank inspection.

5. A statistical method was proposed in order to take into account of the effect of throat size on the C_w , which would be expected to be useful for assessing the welding standards and inspecting the welds in the construction of membrane LNG tank.
6. A model $\Delta\delta/h^2 = 0.13553 N_f^{-0.3151}$ was proposed to evaluate the C_w for seam welds and raised edge welds having a given weld height.

1. 서언

날로 심각해지는 대기오염에 대한 대책의 일환으로 깨끗한 에너지인 액화천연가스(Liquefied Natural Gas)에 대한 수요는 점차 증가되고 있고 또 이러한 LNG를 운반하거나 저장하는 설비에 대한 안전성의 확보는 당연한 과제이다.

액화천연가스(LNG)는 대기압상태에서 -162°C 의 온도를 가지고 있으므로 이 화물의 운반설비 또는 저장설비에 누설이 발생하면 화재와 폭발로 인한 엄청난 피해를 초래할 위험성이 있다. 따라서 이러한 LNG를 운반하는 선박 또는 저장설비의 설계 및 건조시에는 정적하중, 파랑에 의한 동적하중, 지진, 태풍 등을 고려하는 고도의 설계기술과 공정관리가 요구되고 있다^{1),2)}.

특히 LNG를 산지에서 수요지까지 대량으로 운반하는 주 운송수단의 하나인 LNG운반선은 지금까지 건조척수가 그다지 많지 않기 때문에 안전성을 확보하면서 동시에 경제적 운항을 하기 위해서는 고도의 설계기술과 건조기술 및 운항기술이 요구되는 분야이다.

이상의 관점에서 본 연구에서는 LNG탱크의 재료로 널리 사용되는 알루미늄합금 A5083-O와 36% Ni강을 대상으로 그 모재와 용접부에 대한 피로파괴 특성을 파괴역학적 해석과 실험적인 방법으로 규명하여 LNG탱크의 파괴안전성을 설계단

계에서 확보하기 위해서 필요한 요소기술인 표면결합의 전파거동, 관통균열의 전파거동, 피로균열의 발생수명 등에 대한 설계자료를 제시하였다.

2. 연구의 내용

제 1 장 : 대형 용접구조물인 LNG탱크의 재료로 사용되는 알루미늄합금 A5083-O와 36% Ni강의 피로파괴 거동에 대한 연구의 배경, 연구동향, 연구목적 등을 기술하였다.

제 2 장 : 독립형탱크 형식 B LNG탱크의 파괴안전성을 파괴안전설계(Fail Safe Design)³⁾ 또는 손상허용설계(Damage Tolerance Design)⁴⁾의 관점에서 평가하기 위하여 알루미늄합금 A5083-O 및 그 용접부에 대한 피로시험을 수행하였다. 피로균열의 전파거동은 주로 응력확대계수에 의해서 지배되지만 응력비 R의 영향을 고려하지 않을 수 없다. 또 응력비 R은 피로균열의 전파거동을 보다 정량적으로 엄밀하게 평가할 때 고려해야하는 균열전파하한계특성인 ΔK_{th} 에도 영향을 미친다. 이러한 관점에서 본 장에서는 응력비 R의 영향과 균열전파하한계 조건인 ΔK_{th} 을 합리적으로 고려하여 피로균열의 전파거동을 평가할 수 있는 $da/dN=C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m)$ 과 같은 형태의 모델을 개발하였다.

제 3 장 : 구조물의 표면에 존재하는 초기 결함이 예상 설계수명동안 부재를 관통하는지의 여부를 평가하기 위해서 표면균열에 대한 응력확대계수의 산정이 필요하다. 본 장에서는 독립형탱크 형식 B LNG탱크의 용접토우부와 같은 응력집중부에 존재하여 성장하는 표면균열에 대한 응력확대계수를 산정하는 모델을 개발하기 위하여 Newman-Raju의 기본해^{5)~7)}와 Pang의 해석해⁸⁾ 등을 기초로 하여 수정 모델을 제안하고 알루미늄합금 A5083-O에 대한 표면균열전파시험을 통하여 이 모델에 대한 타당성을 검토하였다. 또 이 결과를 바탕으로 독립형탱크 형식 B LNG탱크의 표면에 존재할 수 있는 임의의 결함이 예상 설계수명동안 탱크 벽을 관통하는지의 여부에 대한 해석을 수행하였다. 이를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 본 연구에서 제안한 모델을 사용하면 용접토우부와 같은 응력집중부의 표면 균열전파거동(탱크 벽 관통시의 균열형상 및 균열전파속도)을 예측할 수 있었다.
- 2) 초기 표면결합의 형상, 응력상태 및 부재의 두께 등을 고려하여 예상 설계수명 20년동안 표면균열이 전파하는 거동을 예측하는 기술을 개발하였다.
- 3) 초기 표면결합이 성장하여 관통균열이 될 때 초기 표면결합의 깊이가 부재의 수명에 미치는 영향은 그 깊이가 미치는 영향에 비해서 크다.

제 4 장 : 파단전 누설(Leak Before Break)의 개념을 독립형탱크 형식 B의 LNG 탱크, 원자로 등의 설계에 도입하기 위해서는 초기결합이 탱크 또는 용기의 벽을 관통할 때의 형상, 불안정 취성과파괴의 발생 가능성, 관통 후의 균열의 개구량 등에 대한 해석이 필요하다. 이를 위하여 본장에서는 멤브레인응력과 굽힘응력이 함께 작용하는 부재의 표면에 존재하는 결합이 부재를 관통한 후의 전파거동을 파악하기 위하여 알루미늄합금 A5083-O를 시험재료 하여 평판(멤브레인응력만 작용)과 편심판(멤브레인응력 + 굽힘응력)에서 표면균열을 전파,관통시키는 실험을 수행하였다. 이 실험결과를 근거로 멤브레인응력과 굽힘응력이 함께 작용하는 관통균열의 발생측과 관통측의 응력확대계수 산정을 위한 COD모델을 개발하였다. 또 이 모델을 사용하여 관통균열의 개구량과 개구단면적을 시간의 변화에 따라 연속적으로 계산하는 기법을 개발하였다.

제 5 장 : 멤브레인 LNG탱크의 설계사상인 안전수명설계(Safe Life Design)의 관점에서 이 탱크의 대표적인 용접부인 겹치기용접부에 대한 피로시험을 36% Ni 강을 사용하여 수행하였다. 피로시험의 결과는 선급의 규칙에 따라 선형누적손상 계수로 평가하여 용접부에 대한 건전성과 안전성을 확인하였다. 또 용접작업 표준에 대한 검토를 위하여 겹치기용접부의 목두께를 유의수준 1%로 가정하여 다양한 목두께에 대한 C_w 를 계산하였다. 이를 통하여 얻어진 결과는 이 탱크에 대한 설계도면의 검토 및 용접부의 검사 시에 활용할 수 있도록 제시하였다.

제 6 장 : 멤브레인 LNG탱크의 대표적인 용접부인 시임용접부 및 레이즈드 엣지용접부에 대한 피로강도를 평가하기 위하여 실선 용접부의 형상을 재현한 시험편을 제작하여 통계적 피로시험법에 따라 피로시험을 수행하였다. 피로시험의 결과는 C_w 로 평가하여 LNG탱크의 수명을 안전수명설계의 관점에서 선급의 규칙에

따라 검토하였다. 또 용접작업 표준에 대한 검토를 위하여 임의의 용접높이를 갖는 용접부의 피로강도를 평가할 수 있는 모델을 제안하였다.

참고문헌

- [1] (사) 한국선급 : 선급 및 강선규칙 제 7편 5장 액화가스산적운반선, (사)한국선급(1993), pp.41~42
- [2] IMO : Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IMO(1975)
- [3] Air Force Aeronautical System Division : Airplane Damage Tolernace Requirements, MIL-A-83444, Air Force Aeronautical System Division(1974)
- [4] 失川元基 : 破壊力學-理論.解析から工學的應用まで, 培風館(1988), pp.140~175
- [5] J.C.Newman, L.S.Raju : Analysis of surface cracks in finite plates under tension or bending loads, NASA Technical Paper 1578(1979), pp.10~13
- [6] J.C.Newman, L.S.Raju : An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack, Engineering Fracture Mechanics(1981), Vol. 15, No.1-2, pp.185~192
- [7] J.C.Newman, L.S.Raju : Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies, American Society for Testing and Materials(1983), pp.249~250
- [8] ILL.J.Pang : A Review of Stress Intensity Factors for Semi-elliptical Surface Crack in Plate and Fillet Welded Joint, The Welding Institute(1900), pp.5~13