



LNG 저장탱크용 멤브레인의 피로수명 예측에 관한 연구

†윤인수 · 김정규*

한국가스공사 연구개발원, *한양대학교 기계공학부
(2005년 5월 2일 접수, 2005년 6월 13일 채택)

A Study for Prediction of Fatigue Life in Membranes of LNG Storage Tanks

†I.S. Yoon · J.K. Kim*

Kogas R&D Center, *Hanyang University
(Received 2 May 2005, Accepted 13 June 2005)

요 약

LNG 저장탱크에 사용되는 멤브레인은 전체적으로는 선형거동을 하나, 국부적으로는 탄소성거동을 하며, 굽힘과 인장의 복합적인 응력을 받는 구조이다. 즉, 멤브레인 평가는 복합적인 하중을 부과하기가 어려워 소재의 피로특성만으로 평가할 수가 없으며, 실제 대형구조 멤브레인 실 모델을 이용하여 평가해야 하는데 이는 상당한 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 멤브레인의 피로특성을 파악하여 LNG 저장탱크에 활용하기 위한 멤브레인 피로수명 예측식을 제안하고자 한다.

Abstract – The membrane for LNG storage tank behaves linearly in macroscopic view, but behaves elasto-plastically in some local areas, and has the structure undergoing both tension and bending. That is, the membrane is not able to be evaluated with the fatigue characteristics of the material, and it is so difficult to evaluate the membrane with a real big model because of the difficulty of imposing complex loads. Therefore, a prediction formula for the fatigue life of the membrane is proposed to use for the design of LNG storage tank.

Key words : LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Membrane(멤브레인), Fatigue Life(피로수명), 저주기 피로(Low Cycle Fatigue)

I. 서 론

LNG저장탱크는 내조 · 벽체 · Roof로 구성된 원통형 구조물로서 일반적인 구조물과는 달리 내부에 LNG를 -162°C 의 액체 상태로 저장해야 하므로 액체 압력(자중)은 물론 극저온 온도에 따른 영향에 대하여 충분한 안전성을 요구하는 특수 구조물이다. LNG와 직접 접촉하는 내조는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나뉘어 지고, 각각의 형식에 따라 단열 방식과 내조 설계 방법이 달라지며, 고유의 설계기술이 필요하다.

멤브레인 형식의 저장탱크는 원통형의 상온 구조물을 내벽에 단열시스템을 설치하여 내부에 LNG를 저장하는 구조를 갖는다[1-3]. 그런데, 단열재는 기밀성이

없어 단열재 내부에 별도의 기밀을 유지할 수 있는 밀봉벽이 필요하게 된다. 이러한 밀봉벽을 가리켜 멤브레인이라 칭한다.

멤브레인은 저온으로 인한 온도변화에 대한 열 수축과 다량의 LNG를 보관함에 따라 발생하는 자중에 의한 압력을 견뎌야 한다.

이러한 멤브레인으로는 금속소재를 일반적으로 사용하게 되는데, 온도에 의한 열 변형이 거의 없는 인바(in-bar)강을 용접하여 사용하는 방법과 저온 인성 및 내부식성이 강한 오스테나이트계열의 스테인리스강에 주름을 부여하여 열 수축과 압력에 의한 하중에 견디도록 하는 방법이 사용되고 있다.

주름을 갖는 멤브레인의 소재로는 STS304를 일반적으로 사용하고 있으며, 소재에 대한 피로특성에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다.

그러나 멤브레인은 주름진 형상으로 인하여 매우

†주저자:isyoon@kogas.re.kr

복잡한 하중이 멤브레인 소재에 작용하기 때문에, 평균응력을 고려한 멤브레인 소재의 피로특성 데이터를 멤브레인의 평가에 사용하기에는 현실적으로 어려움이 있다.

따라서 현장에 적용하기 위해서는 실제의 멤브레인을 시험하여 피로특성을 파악하여 사용하는 방법을 사용하고 있다. 실제 멤브레인의 시험은 그 형상이 매우 크고, 두께방향으로 비대칭성을 가지고 있어 매우 어려우며, 고 비용을 지불해야 한다. 또한, 멤브레인의 주름의 크기가 변할 때마다 그 피로특성은 전혀 다른 거동을 함으로 멤브레인의 피로특성을 평가하는 데에는 상당히 어려움을 겪어오고 있으며, 이로 인해 실제 저장탱크에 적용하는 멤브레인의 경우 직접적인 피로시험에 의존하여 수명설계를 실시하고 있다.

따라서 본 논문에서는 멤브레인의 형상을 통하여 피로수명을 평가하는 예측식을 제안하고자 한다.

II. 멤브레인 소재의 저사이클 피로특성

앞에서 설명한 바와 같이 LNG 저장 탱크에 있어서 멤브레인에 작용하는 힘은 액체의 온도가 상온에서 111K까지 이르기까지 온도가 반복적으로 작용함에 따른 열 수축에 의한 것과 사용량에 따른 액체 정압의 차이로 인한 것이 있다. 이것은 저장탱크에 LNG를 저장하거나, 방출하는 과정에 의하여 발생되며, 일반적으로 주당 1~3회의 저 사이클로 수행되며, 멤브레인에 있어서는 대 변형 거동을 하게 된다. 즉, 저 사이클 피로가 설계에 고려된다.

따라서 저 사이클 피로시험에 의한 강도평가가 대단히 중요하다.

먼저, 인장시험에서 얻어진 기계적 특성을 이용하여 박판 소재에 대한 온도변화에 따른 저 사이클 피로 특성을 먼저 검토하고자 한다.

변형률진폭(ϵ_a)과 파단반복수(N_f)의 관계를 나타내는 ϵ_a-N_f 곡선은 많은 연구자들에 의하여 보고되고 있으나, 이의 대표적인 연구자는 Coffin과 Mason이다. 또한 ϵ_a-N_f 곡선에 대한 관계식도 많이 보고 되고 있지만, 일반적인 관계식은 다음과 같다.

즉 변형률진폭(ϵ_a)은 식 (1)과 같이 탄성변형률진폭(ϵ_{ea})과 소성변형률 진폭(ϵ_{pa})의 합으로 나타낸다.

$$\epsilon_a = \epsilon_{ea} + \epsilon_{pa} \quad (1)$$

식 (1)에서 각각의 변형률과 파단수명($2N_f$)과의 관계는 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

여기서, $2N_f$: reversals to failure (1 rev. = 1/2 cycle)

σ_f' : 피로강도계수

ϵ_f' : 피로연성계수

b, c : 피로강도지수 및 피로연성지수

따라서 식 (5.9)의 $\sigma_f', \epsilon_f', b$ 및 c 의 값을 알면, 저 사이클 피로 특성을 예측할 수 있으며, 이들의 값은 다음과 같이 평가되고 있다[4].

· 피로강도계수

$$\sigma_f' \approx \sigma_f = \sigma_B + 345[\text{MPa}]$$

· 피로연성계수

$$\epsilon_f' \approx \epsilon_f = \ln \frac{1}{1-R.A.}$$

R.A.: 단면수축률

· 피로강도지수 $b = -0.05 \sim -0.12$

· 피로연성지수 Manson : $c \approx -0.6$

Coffin : $c \approx -0.5$

한편 Manson은 공통구배법에 의한 저 사이클 피로 곡선으로서 식 (3)과 같이 근사적으로 제안하였으며, Manson의 공통 구배법을 수정하여 식 (4)를 제안하였다[5].

$$\epsilon_a = 1.75 \frac{\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + 0.5 \epsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (3)$$

$$\epsilon_a = 3.5 \frac{\sigma_B}{E} N_f^{-0.12} + 0.5 \epsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (4)$$

Manson의 공통 구배법과 수정한 식을 이용하여 멤브레인용 소재의 스트레인-수명의 관계를 실험데이터와 비교하였다. 비교를 위해 사용된 소재는 포항제철에서 생산한 두께 2 mm의 STS304 스테인리스강 판으로 기계적 성질은 Table 1과 같다[6].

Manson의 식을 실험식과 비교하기 위하여 4점 굽힘 시험으로 응력비(R)를 -1로 하여 STS 304 소재의 스트레인-수명 반복수명의 데이터를 획득하였으며, 결과를

Table 1. Mechanical properties of STS 304 steel (produced by POSCO).

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	경도 (HV)
STS 304	279.5	637.5	56	158

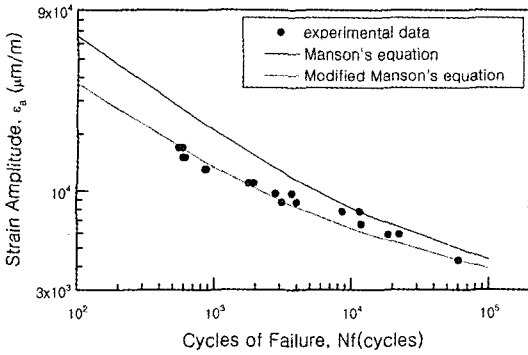


Fig. 1. Comparison of the equation and experiment.

Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보면, Manson의 수정된 제안식이 피로수명 평가에 더 적합한 것을 알 수 있었다.

III. 멤브레인의 저사이클 피로특성

멤브레인은 좌우 대칭이며, 상하 비대칭인 구조를 갖는다. 즉, 멤브레인에 가해지는 응력특성은 멤브레인 소재의 평가에 사용된 방법인 평판의 굽힘 거동에 따른 응력특성과는 다른 특성을 갖는다. 다시 말해, 형상으로 인하여 굴곡부에서는 심한 응력집중현상이 발생하며, 상하간에는 비대칭으로 응력이 작용하는 특성을 갖는다. 따라서 멤브레인 소재의 평가에 사용된 제안식을 평가하였다.

멤브레인의 평가를 위해 사용된 시험편과 시험하는 모습을 Fig. 2에 나타내었다. 시험은 정현파, 변위제어, 0.5 Hz로 수행하였다. 스트레인의 측정은 3축 로켓트형 스트레인게이지(KYOWA사, 모델명: KFG-1-120-

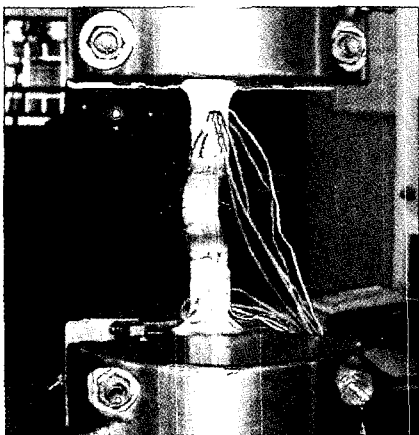


Fig. 2. Membrane fatigue test.

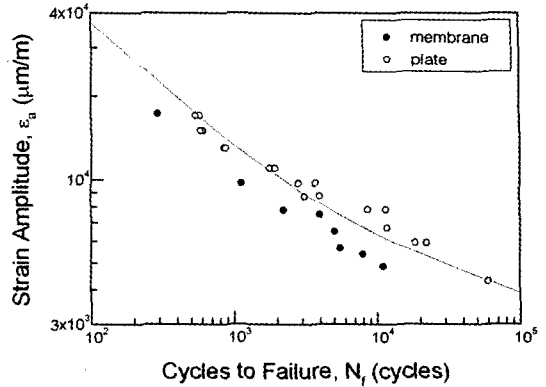


Fig. 3. Fatigue result comparison of the membrane and raw material.

D17-16)를 응력 최대점에 부착하여 다이내믹 스트레인 메타(HBM사, 모델명: MGC-Plus)로 데이터를 획득하였다.

시험결과를 원 소재의 데이터 및 예측식과 비교하기 위하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 원 소재에 대한 실험은 4점 굽힘시험으로 2 mm 두께의 멤브레인 소재에 대한 결과로 응력비 -1, 정현파, 0.5 Hz의 반복속도로 변위제어로 수행한 결과이다. 또한, 멤브레인은 앞에서 설명한 바와 같이 멤브레인의 변형거동을 고려하여 응력비를 0으로 하여 인장-인장시험으로 수행하였다.

Fig. 3에서 보면, 멤브레인의 수명이 응력비를 0으로 했음에도 응력비 -1인 원 소재의 수명보다 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 멤브레인의 형상에 따른 응력집중현상과 관계되는 것으로 판단된다. 따라서 멤브레인의 형상을 고려한 예측식의 수정이 필요하다.

멤브레인의 주름에 의한 영향을 검토하여 보면, 멤브레인의 최대응력 발생지점이 하중 발생지점과 상이한 것에서 발생하는 부분과 원 소재를 소성 가공함으로써 발생하는 부분으로 나눌 수 있다. 즉, 멤브레인의 주름에 의한 파라메타는 탄성보정계수와 소성보정계수의 합으로 나타낼 수 있다. 이를 Manson의 수정식에 대입하면 식 (5)와 같다.

$$\epsilon_a = 3.5 \left(\frac{\sigma_B}{E} - \epsilon_{es} \right) N_f^{-0.12} + 0.5 (\epsilon_f^{0.6} - \epsilon_{ps}) N_f^{-0.6} \quad (5)$$

여기서, ϵ_{es} 는 최대응력의 발생부가 하중을 가하는 부분과 동일선상에 있지 않기에 발생하는 보정계수이며, ϵ_{ps} 는 최대응력이 발생하는 부분의 소성가공에 따른 형상변형에 기인하는 보정계수이다.

ϵ_{es} 는 최대응력이 발생하는 부분(멤브레인 주름 최상

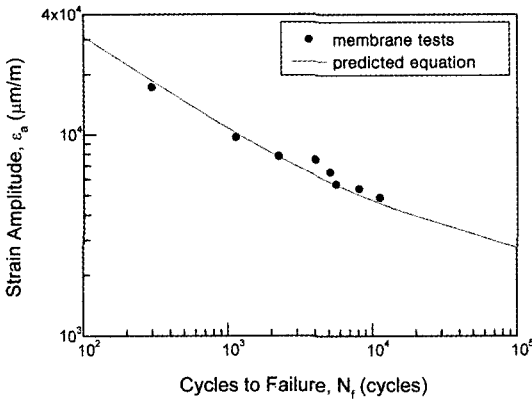


Fig. 4. Comparison of predicted equation and experimental data.

부)과 하중 작용점 간의 거동을 외팔보의 거동으로 가정하여 스트레인량을 보정하면, $\epsilon_{ps} = 1.5 \frac{\delta \cdot t}{H^2}$ 로 표현된

다. 여기서, t 는 멤브레인 두께, H 는 멤브레인의 높이이다. 또한, ϵ_{ps} 는 최대응력부의 형상이 원의 형상을 가지고 있으므로 소성변형량과 곡률과의 관계식을 이용하여 $\epsilon_{ps} = \alpha \left(1 + \frac{5}{2\rho}\right)$ 로 표현될 수 있다. 여기서, δ 는 실

험 변위량, t 는 멤브레인 두께이며, α 는 온도에 의한 인자로 본 논문에서는 고려하지 않았다.

본 시험에서 사용된 멤브레인의 치수는 높이가 40.5 mm, 두께가 2 mm, 곡률이 18.75 mm를 사용하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 실험 데이터와 예측식이 잘 일치함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 LNG 저장탱크의 설계 및 실제 운전 에 따른 안전성 평가시 가장 중요하게 사용되는 멤브레인의 피로수명 평가를 위하여 기존의 소재의 피로시험 결과를 이용하는 평가방법을 수정한 식을 제안 하였다. 이러한 식을 이용한 멤브레인 수명 평가시, 더 정확한 평가를 할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] API Standard 620 Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, (2002)
- [2] Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service BS7777", (1993)
- [3] Japan Gas Association Committee, Recommend Practice for LNG Inground Storage Tank", (2002)
- [4] Coffin, L.F., Jr., "A Study of Effects of Cyclic Thermal Stress on a Ductile Metal", Trans. of the ASME, Vol. 76, 931-950, (1954)
- [5] Manson, S. S., In Fatigue - An Interdisciplinary Approach, Syracuse University Press, N. Y., pp. 133-178, (1964)
- [6] Tsutomu M., Hironori N., Ubagai K. Ono H., "Fatigue Strength of Membrane Tank Component Parts", 川崎産重工期報 (in Kawasaki Heavy Industry), No. 7, pp. 1, (1980)
- [7] 김정규 등, "LNG 저장탱크용 멤브레인 재료의 저온 피로 특성에 관한 연구", 한국가스공사 연구보고서, (1998)
- [8] 홍성호 등, "LNG 저장탱크용 Membrane 개발 및 응력해석", 한국가스공사 연구보고서, (1995)