

Kogas 멤브레인 성능평가에 관한 연구

김영균*, 홍성호, 윤인수, 오병택, 서홍석
(한국가스공사 연구개발원)

The Study of Kogas Membrane Performance Test for LNG Storage Tank

Y.K. Kim, S.H. Hong, I.S. Yoon, B.T. Oh, H.S. Seo
Kogas R&D Center

Abstract

LNG demand has been rapidly increasing in Korea for a variety of reasons including stable supply, non-polluting, and high combustion efficiency characteristics. As a result the construction and expansion of LNG storage facilities have been continuing at a vigorous pace. One of the most important structural core elements of the LNG storage tank is the membrane, consisting of stainless steel. The membrane to be applied inside of LNG storage tank is provided with corrugations to absorb thermal contraction and expansion caused by LNG temperature. From the viewpoint of strength design, however, it is essential to confirm that the membrane undergoes a stable deformation and has a sufficient fatigue strength. Experimental studies are presented to investigate the deformation and strength of the membrane which is designed by Kogas. All experiments are conducted on the basis of RPIS and we found the results are fully satisfied with the RPIS.

Key Words: LNG Storage Tank, Membrane, Experimental Stress Analysis, Fatigue Miner's Law, RPIS

1. 서론

우리나라에서 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 청정 무공해 에너지라는 장점으로 도입이래, 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162°C 상태에서 액화하여 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있다. 수요 증가에 따른 저장기지의 건설 및 확충이 이루어지고 있어 독자적인 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화 필요성이 증대되고 있다. LNG저장탱크는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나뉘어진다. 멤브레인은 주름을 가지고 있는, 두께 1.2~2mm의 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열변형을 주름부에서 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 구조로서, LNG저장탱크 및 LNG선박에서 사용하고 있다. LNG에 의한 액화증은 LNG선박의 경우는 선체에서, LNG탱크의 경우는 단열재 및 외부 콘크리트 구조물에 의해 지지하게 된다. 멤브레인의 거동을 살펴보면, 평판 부에서는 열변형이 거의 발생하지 않고 주름 부에서 항복강도를 초과하는 고변형률이 발생하도록 디자인한 것으로, 기밀성, 저온 인성 및 열전도성의 특성이 요구된다. 또한, 저장탱크 내의 LNG 방출과 충전으로

* kyk@kogas.re.kr

인한 압력과 온도의 반복적인 부하에 대해 충분한 피로수명강도가 요구된다. 멤브레인은 각 회사별로⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 고유의 형상을 갖는 모델에 대한 특허권을 보유하고 있으며, 한국가스공사⁽⁵⁾에서는 1997년, 프랑스 국제특허를 획득하였으며, 현재에는 새로운 모델에 대한 해석과 실험을 통한 개발을 완료하여 Pilot LNG 저장탱크에 적용하여 안전성을 확보하는 작업이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 현재까지 실행된 기술개발 성과 중 벽체 및 코너 멤브레인을 실험에 의한 안전성을 확인하는데 중점을 두었다.

2. KOGAS 멤브레인 설계

2.1 멤브레인 기본 설계 개념

멤브레인은 내압성이 크게 요구되지는 않지만, 액밀성과 기밀성을 가져야 하는 금속 박판으로, 온도 및 액압력 변화에 따른 하중을 흡수하는 구조로서, 특히 변형거동의 안전성을 보여야 하며, 충분한 정적강도와 피로수명을 가져야 한다. 이러한 요구조건에 적합하도록 KOGAS 멤브레인이 개발되었는데, 이 단계에서는 유한요소해석 방법이 주로 사용되었다.

2.2 멤브레인의 형상 및 기본구조

멤브레인 기본 구조는 4개의 직선주름이 1쌍을 이루어 각 쌍이 직교하는 형태를 갖는다. 직교하는 수직주름은 수평주름 중앙의 상하로 위치하게 되며, 이는 수평주름의 원활한 변형을 유도하게 된다. 따라서, 전체적인 변형 거동은 멤브레인 유니트의 중심을 기준으로 회전거동하는 형태를 취하게 되어, 상대적으로 평판부의 변형은 작아진다.

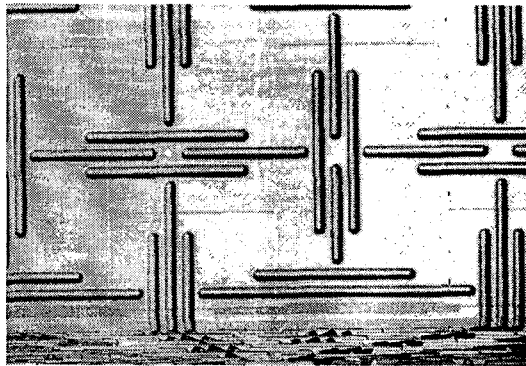


Fig.1 Configuration of Membrane structure

바닥 멤브레인의 기본 구조는 크게 방사형과 격자형의 두 가지 형태로 나뉜다. 방사형은 중앙에서부터 벽체쪽으로 방사형을 이루며, 이는 탱크의 원형 바닥을 고려할 때, 멤브레인 유니트끼리 비교적 우수한 대칭성을 유지한다는 장점이 있지만, 제작 멤브레인의 종류가 많아진다는 단점이 있고, 격자형은 중앙에서부터 벽체쪽으로 일정거리까지 벽체 멤브레인과 같은 형태를 이루다가 코너 멤브레인과 연결 형태로 벽체 멤브레인을 그대로 바닥에 활용한다는 장점이 있는 반면, 바닥과 코너 멤브레인을 연결하는 특수한 멤브레인을 고안해야 한다는 단점이 있다. KOGAS LNG저장탱크 멤브레인의 경우에는 여러 가지 경우를 고려하여, 방사형으로 결정되었으며, 응력 집중이 예상되는 코너 멤브레인의 후면에는 단열재를 통하여 콘크리트에 직접고정하는 방법을 채택하였다. 코너 멤브레인은 모든 멤브레인의 역할이 액밀성과 기밀성 유지에 있듯이, 그 기본 기능은 같으며, 탱크 내부의 LNG를 완전히 비우지 않는 한, 최소 액위 1m를 유지해야하는 운전 조건 규정에 의해 정상운전시, 항상 최저온도를 유지하게 된다. 따라서, 코너 및 바닥 멤브레인은 LNG의 방출과 충전에 따른 액압력의 반복하중에 안전성을 보여야 하며, 충분한 정적강도와

피로수명을 가져야 한다. 이러한 요구조건에 적합하도록 멤브레인을 개발하였다. KOGAS 코너 멤브레인은 멤브레인을 관통하는 3개의 주름으로 형성되어 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결시키는 구조를 가지며, 코너 멤브레인 사이는 특수한 장비로 외부 콘크리트에 고정된다. 벽체와 바닥 그리고 코너 멤브레인의 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 멤브레인 재료

멤브레인형 LNG저장탱크에 주로 사용되는 STS304 판재를 사용하였으며, 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%)

재료	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
STS304	0.05	1.1	0.022	0.004	0.45	18.3	8.2

3. 멤브레인 안전성 검토

LNG탱크는 비교적 특수한 구조형식을 가지고 있으며 재해에 따른 처리기준 및 안전성 평가법도 명확하지 않다. 그러므로 ASME의 코드를 기본으로 일본 가스 협회에서 제정한 LNG저장탱크 저조지침⁽⁶⁾을 기준으로 멤브레인의 안전성을 검토하였다.

3.1 변형거동의 안전성

3.1.1 정적하중에 대한 안전성 평가

정적하중의 안전성을 파악 하기 위하여 실제 발생 할것으로 예측되는 열변형에($\Delta T = 190^{\circ}\text{C}$) 상당하는 기계 변형율(4.8mm) 부하하여 멤브레인 주름부의 변형 거동 특성을 파악 하였다. 즉 예측되는 변형량을 INSTRON 장비를 사용하여 기계적 변형으로 부하하였고 멤브레인 주름 각 부위에 3축 스트레인 게이지를 부착하여 각 부위에서의 스트레인 변형률을 측정 하였다. 시험결과 FEM해석에서 예측한 부위인 서로 직교하는 주름이 만나는 부위의 주름 상부와 하부에서 최대 변형률이 발생하였다. 주름 상부에는 압축 변형거동이 주름 하부에서는 인장 변형 거동 특성을 나타냈으며 이러한 변형량 증가에 따른 변형률 변화를 조사한 결과 멤브레인 주름 모든 부위에서 안정적인 변형 거동 특성을 나타내었다.

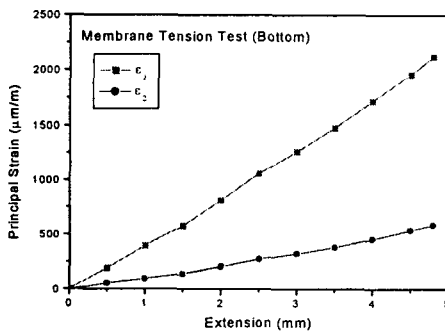


Fig.2 Relationship between measured strain bottom corrugation in Side Membrane under tensile elongation

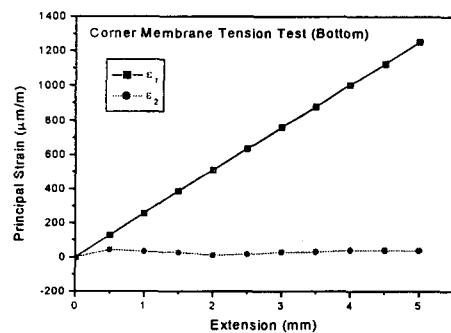


Fig.3 Relationship between measured strain bottom corrugation in corner membrane under tensile elongation

3.1.2 불안전 붕괴에 대한 안전성 확인

멤브레인의 주름부는 액압에 의한 압력하중이 부하되며 이에 대한 안전성을 확인하여야 한다. 압력하중에 대한 안전성 확인 시험은 140,000m³ 용량 탱크에서 예측되는 압력 값을 기준으로 하여 시험을 실시하였다. 실제 LNG저장탱크에서 부하되는 하중 조건중 가장 가혹한 조건인 온도 변형과 압력변형이 동시에 최대로 부하되는 조건에 대한 확인을 위하여 압력 부하 시험전 멤브레인에 대하여 4.8mm의 인장변형을 부하하여 멤브레인 열변형 거동이 발생하고 있는 상태에서 압력을 부하하여 압력 거동 특성을 조사 하였다. 이에 대한 실험 결과는 Fig.4~5와 같다. 각각의 결과에서 보듯이 압력이 증가 함에 따라 주름 각부위에서도 안정적으로 증가하는 경향을 보여 압력에 대한 변형 거동이 안정함을 알수 있다.

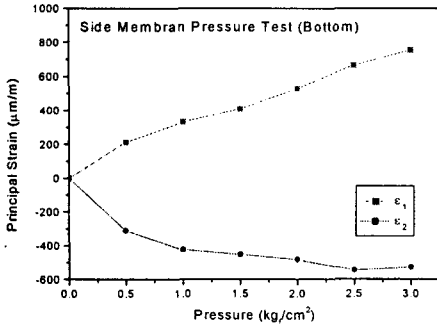


Fig.4 Relationship between measured strain bottom corrugation in Side Membrane under pressure load

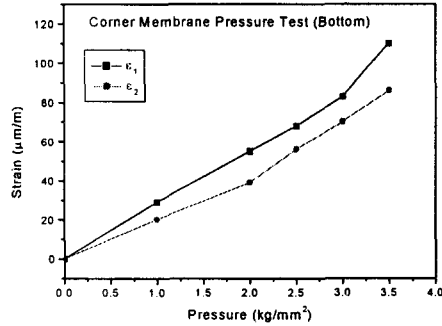


Fig.5 Relationship between measured strain bottom corrugation in corner membrane under pressure load

3.2 멤브레인 진행성 변형 거동 확인

멤브레인은 탱크의 운전에 따른 LNG의 방출과 유입에 따른 온도 및 압력 변화에 의한 피로 사이클이 작용하며 이때 주름부에서는 피로사이클 증가에 따른 변형량이 연속적으로 증가 하지 않아야 한다. 이를 확인하는 방법은 수식에 의한 이론적 해석에 의한 요구조건인 허용강도의 3배 (14×3 = 42 kgf/mm²)가 넘지 않아야 한다. 만약 이를 만족하지 못할때에는 10 사이클에 대한 온도 및 압력 하중의 연속적인 부하 및 제하 시험을 실시하여 연속적 변형이 발생하지 않음을 확인하여야 한다. 사이드 및 코너 멤브레인에서 최대 변형률이 발생하는 부위의 주름 최상부 및 주름과 평면이 만나는 부위에서 ΔT=190℃에서 예측되는 열수축 변형량인 4.8mm와 액위에 의하여 발생하는 최대 압력 발생값 예측값인 2.5kgf/cm²에서 측정된 주변형률값을 다음 식을 통해 계산하여 최대 응력값을 구하였고 이 값을 3S값(42kgf/mm²) 초과 여부를 확인하였다. 결과와 같이 압력 변형의 증가에 따라 선형적인 변형률 거동이 이루어져 멤브레인 주름부의 변형거동의 안전성을 확인 할수 있다.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu\epsilon_1)$$

여기서 E=19,300 kgf/mm² 와 선팽창계수 $\nu = 14 \times 10^{-6}$ 이며 RPIS에 제시된 값을 사용한다.

Table 2 Confirmation of no progress deformation in Side Membrane

위치	변형	σ_1	σ_2	$\sigma_{Max.}$	결과
주름 상부	$\epsilon_{Temp.}$	-36.68	-10.44	36.68	<3S
	$\epsilon_{Pre.}$	3.45	-2.59	3.03	<3S
	ϵ_{Total}	-33.23	-13.04	39.71	<3S
평면 부	$\epsilon_{Temp.}$	48.76	25.96	48.76	>3S
	$\epsilon_{Pre.}$	7.13	4.28	4.49	<3S
	ϵ_{Total}	55.89	30.24	53.25	>3S

Table 3 Confirmation of no progress deformation in Corner Membrane

위치	변형	σ_1	σ_2	$\sigma_{Max.}$	결과
주름 상부	$\epsilon_{Temp.}$	-26.52	-7.63	26.5	<3S
	$\epsilon_{Pre.}$	1.81	1.66	1.81	<3S
	ϵ_{Total}	-24.71	-5.97	24.71	<3S
평면 부	$\epsilon_{Temp.}$	26.75	8.78	26.75	<3S
	$\epsilon_{Pre.}$	1.86	1.81	1.86	<3S
	ϵ_{Total}	28.60	10.59	28.60	<3S

Table3의 계산값 에서와 같이 이론 해석에 의한 벽체 멤브레인 주름 하부에서 열변형과 압력 변형의 합변형에서 3S를 초과하는 것으로 나타났고, 이 부분에 대한 확인을 위하여 10 사이클에 대한 연속적인 변형량을 측정하여 연속적 변형이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

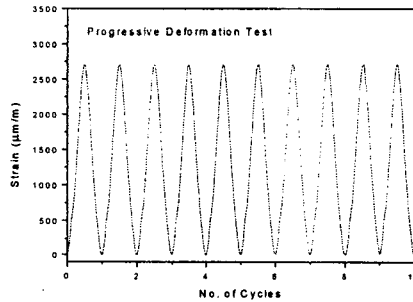


Fig.6 Progressive deformation test

3.3 피로수명 확인

멤브레인에 요구되는 피로수명은 LNG탱크 운전에 따른 탱크 내부 액위 변화에 따라 발생하는 온도 및 압력 변화에 의해 부하 하는 반복 사이클에 대한 피로수명 확인이 필요하며 Table4와 같이 정해져 있다. RPIS에서는 누적계수 (Miner Coefficient)에 의한 피로강도를 확인하는 방법을 적용하고 있다. 누적계수를 구하는 방법은 각각의 하중에서 구한 변형률의 조합에 의한 평가법과 실제 반복하중 부하에 의한 파단 사이클에 의한 평가법이 있다.

Table 4 Typical loads on Membrane of LNG storage Tank

반복하중		스트레인	사이클 수
액압	$\Delta P=2.15\text{kg}_t/\text{cm}^2\text{G}$	$\Delta \epsilon_1$	$n_1 = 2,600$
열 하중	$\Delta T=90 \text{ C}$	$\Delta \epsilon_2$	$n_2 = 2,600$
열 하중	$\Delta T=190 \text{ C}$	$\Delta \epsilon_3$	$n_3 = 25$

3.3.1 변형률 조합에 의한 피로수명 계산

변형률의 조합에 의해 구한 스트레인을 Design Fatigue Curve에 적용하여 누적계수를 구한후 이 값으로 안전성 평가를 할수 있다. ASME의 Best Fit Curve는 SUS 304의 피로시험에 대한 과를 기준으로 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII div.2에 따라 변형률 진폭의 경에는 안전계수 2 를 파단 사이클에 대해서는 안전계수 20을 고려하여 Design Fatigue Curve를 구할수 있다. RPIS에서 정의하는 스트레인은 일축 방향에 대한 스트레스이나 멤브레인과 같은 다 축응력하에서와 같은 상태에서 Design Fatigue Curve를 이용하기 위해서는 상당스트레인 (Equivalent strain)을 이용하여 Curve에 적용한다. 상당 스트레인은 주변형률 ϵ_1 과 ϵ_2 를 먼저 한후에 비압축성 재질이라는 조건 하에서 ϵ_3 를 구할수 있다.

$$\hat{\epsilon} = \frac{1}{3} \sqrt{2[(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]}$$

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

이렇게 구한 상당 스트레인을 Design Fatigue Curve에 적용하여 피로 수명 및 누적계수를 구하였다.

$$M = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

M=1 Failure

M<1 No Failure

Table 5 Miner's Number in Side Membr Table 6 Miner's Number in Corner Membrat

위치	ϵ_{eq}	Design Curve	누적 계수
주름상부	1991	1,000,000	0.00
주름하부	2851	84,000	0.03

위치	ϵ_{eq}	Design Curve	누적 계수
주름상부	1440	75,000	0.00
주름하부	1469	68,000	0.00

3.4.2 가공도의 영향

RPIS에서 사용된 피로수명 곡선은 멤브레인과 같은 가공에 의한 SUS304 스테인레스강의 일부가 상변태가 되므로 주름부에 대한 피로수명 확인이 필요하다. 멤브레인 주름부에서 피로시험편을 채취하여 상온 및 저온 환경에 대한 피로시험을 실시하였다. 모든 시험편에서 피로 하중 부하에 대한 파단이 주름 최 상부에서 발생 하였으며 충분한 피로수명을 가지고 있음을 알수 있어 기존의 ASME Best Fit Curve를 이용한 피로수명 계산이 가능함을 알수 있다.

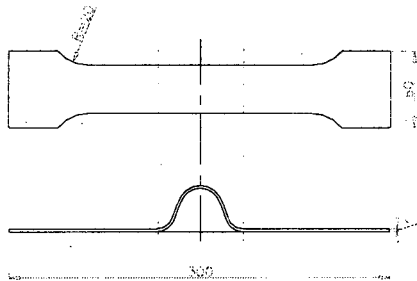


Fig. 7 The profile of specimen for the fatigue test

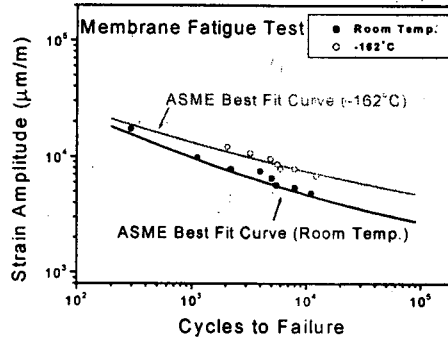


Fig.8. The result about the fatigue test of membrane corrugation

4. 결론

대용량 LNG 저장탱크에 적합한 멤브레인을 개발하여 실용화에 필요한 기본적인 평가를 이론 및 실험에 의해 수행 하였다. 먼저 이론적인 해석은 FEM 해석을 통해 온도 및 압력 부하에 안정적인 변형거동 특성을 나타내는 멤브레인 패널을 최적설계하였으며 이러한 설계 형상을 바탕으로 실제 프레스 가공에 의해 제작한 멤브레인 유니트에 대한 온도 및 압력 하중에 대해서 RPIS를 기준으로 시험을 실시하여 변형거동과 불안전 붕괴에 대한 안전성을 확인 하였다. 또한 시험편의 가공에 의한 재질 변화가 피로강도에 미치는 영향은 소형시험편을 사용하여 시험을 수행한 결과 가공이 피로강도에 미치는 영향은 거의 없음을 확인할수 있다.

참고문헌

- [1] Tsutomu Murase, Keisuke Ueda, 1980, "LNG地下式貯槽用新形式メンブレンについて", 川崎重工業技報.
- [2] Masanori Kawahara, 1984, "Fatigue Strength and Safety Assessment of Membrane Components" NKK Technical Report.
- [3] Hideyo Sakurai, 1982, "LNG地下式貯槽の構造安全性向上の研究", JHPI, Vol.20, No.2.
- [4] 龜正博正, 1996, "LNG地下式貯槽側部メンブレンの開発", 三菱重工業技報.
- [5] 김청균, 윤인수, 홍성호, "액화천연가스저장 탱크용 멤브레인의 유한요소 해석" 대한 기계학회, 논문집 제18권 제10호, pp.2797~2804.
- [6] Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage Tank".