

LNG저장탱크용 코너 멤브레인 개발

김영균* · 홍성호* · 윤인수* · 오병택* · 서흥석*

The Development of Corner Membrane for LNG Storage Tank

Y.K. Kim, S.H. Hong, I.S. Yoon, B.T. Oh, H.S. Seo

Key Words: LNG Storage Tank (LNG저장탱크), Membrane (멤브레인), FEM(유한요소법), Experimental Stress Analysis (실험 응력 해석), Fatigue Test (피로시험), Miner's Law (마이너 수)

Abstract

Both analytical and experimental studies are presented to investigate the strength of the membrane which is designed by Kogas and will be used as a sealing for a LNG tank. Kogas has already developed the Ring-Knot type membrane, but new type had yet to be developed. This paper reports on the results of investigations into this new type of membrane. Various theoretical analyses using FEM and experiments are conducted on the basis of RPIS, and it is found that the RPIS is fully satisfied.

1. 서론

우리나라에서 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 청정 무공해 에너지라는 장점으로 도입 이래, 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162℃ 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 액화중은 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 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, 현재에도 새로운 모델에 대한 설계 및 해석과 실험을 통한 안전성 확보 작업이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 현재까지 실행된 기술개발 성과 중 코너 멤브레인을 비롯한 LNG저장탱크의 바닥 구조의 설계와 해석 및 실험에 의한 코너 및 바닥 멤브레인 안전성을 확인하는데 중점을 두었다.

2. KOGAS 코너 멤브레인 설계

2.1 코너 멤브레인 기본 설계 개념

LNG저장탱크의 코너 및 바닥 멤브레인의 기

* 한국가스공사 연구개발원

본 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, 응력집중이 예상되는 코너 멤브레인의 후면에는 단열재를 통하여 콘크리트에 직접고정하는 방법을 채택하였다. 코너 멤브레인도 모든 멤브레인의 역할이 액밀성과 기밀성 유지에 있듯이, 그 기본기능은 같으며, 탱크 내부의 LNG를 완전히 비우지 않는 한, 최소 액위 1m를 유지해야하는 운전조건 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.

2.2 코너 및 바닥 멤브레인의 형상 및 기본구조

KOGAS 코너 멤브레인은 Fig.1에 나타나 있듯이, 멤브레인을 관통하는 3개의 주름으로 형성되어 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결시키는 구조를 가지며, 코너 멤브레인 사이는 특수한 장비로 외부 콘크리트에 고정된다.

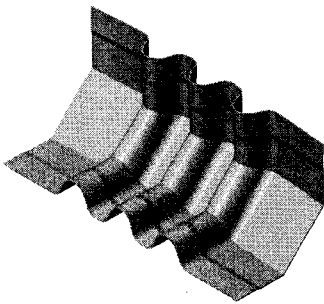


Fig.1 KOGAS Corner Membrane

Fig.2는 코너 멤브레인을 이용하여 벽체 및 바닥 멤브레인을 연결시킨 3차원 모델을 보여준다.

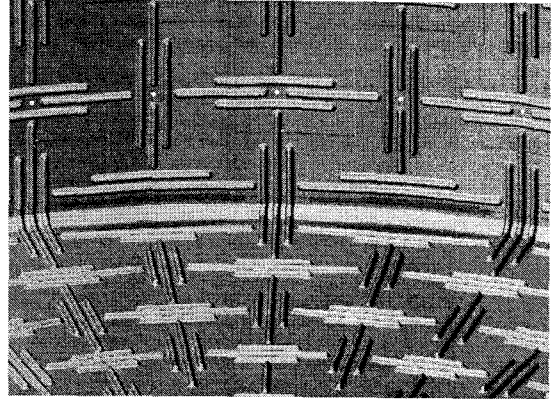


Fig.2 Configuration of Membrane structure

2.3 멤브레인 재료

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

Table 1 Chemical compositions of materials (wt.%)

재 료	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
STS304	0.05	1.2	0.021	0.008	0.41	18.02	8.6

3. 유한요소 해석에 의한 최적설계

멤브레인의 개발 단계에서는 코너 멤브레인의 최적 형태와 바닥 멤브레인의 최적 배치 형태를 찾기 위해 유한요소해석 방법이 주로 사용되었으며, 사용 프로그램은 MSC/PATRAN 8.0 및 MAC/NASTRAN 70.7이 사용되었다. 코너 멤브레인의 경우 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결시키는 부위이므로 경계면에 대칭조건을 부여할 수 없는 특징이 있어, 코너 멤브레인에 바닥과 벽체 멤브레인을 연결한 모델을 사용하여 최적의 코너 멤브레인 형태를 찾아내는 방법을 사용하였다. Fig.3은 해석결과를 나타내는 결과이며, 온도 변화에 따른 발생 응력과 변형률은 Fig.4,5에 그래프로 나타내었다. 해석결과 코너 멤브레인의 취약부는 예상과 같이 바닥에서 벽체로 연결되는 3중 주름부분으로 이 부분에서 최대 응력과 변형률이 발생한다. 재료 자체의 탄성과

주름의 특성으로 열수축을 흡수한다고 해도 발생하는 응력과 변형률의 크기로 볼 때, 추가적인 피로 실험을 통해 안전성을 판단해야 하는 부분으로 사료된다.

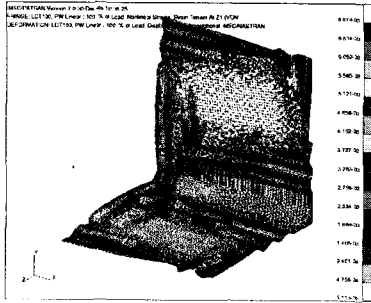


Fig.3 Optimization of Corner Membrane

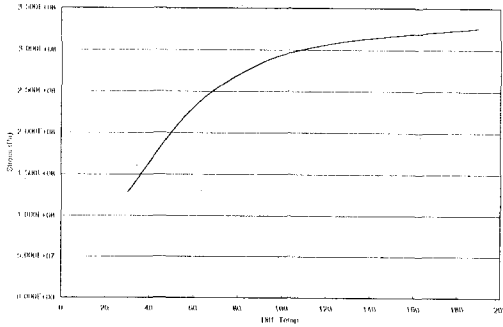


Fig.4 Relationship between stress and temperature

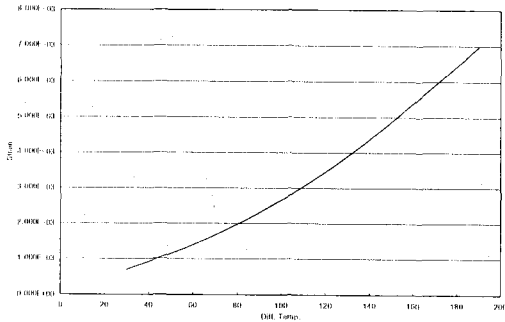


Fig.5 Relationship between strain and temperature

본 해석은 같은 경계조건을 부여하여 코너 멤브레인의 최적 형태를 찾아내는 과정에 중점을 두고 실행되었다. 좀 더 현실적인 해석을 위해 Pilot LNG저장탱크의 전체 바닥 멤브레인 과 연결되는 코너 멤브레인 그리고, 벽체 멤브레인 일부를 모델링한 유한요소 모델을 사용하였다.

Fig.6은 바닥과 연결된 일부분의 유한요소모델을 소개하고 있다.

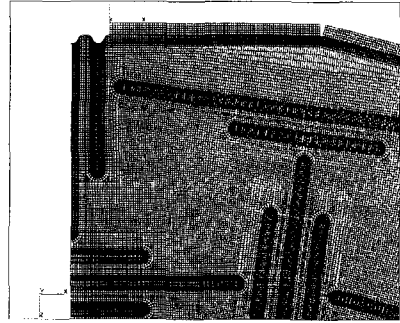


Fig.6 Finite element model of Corner and Bottom Membrane

해석 결과는 Fig.7,8에 나타내었는데 각각 응력 분포와 변형률 분포를 보여준다. 선행된 해석을 통해 도출된 최적 코너 멤브레인 형태에 경계조건을 벗어났다는 것에 의미가 있는 해석이지만, 아직도 코너 멤브레인에서 고변형률이 발생하고 있다.

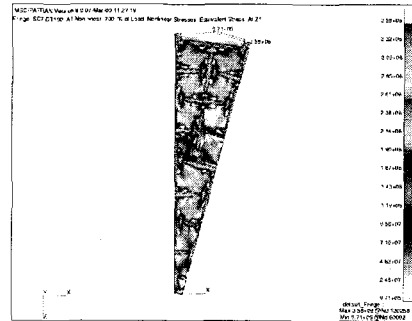


Fig.7 Stress distribution of Corner and Bottom Membrane

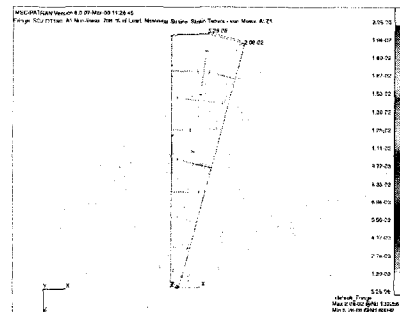


Fig.8 Strain distribution of Corner and Bottom Membrane

위의 해석 내용은 LNG저장탱크의 정상상태 운전조건에서는 크게 문제되지 않으나, 탱크의 최초 사용을 위한 Cool-down 과정의 최적화와 직접 피로실험을 통한 코너 멤브레인의 안전성 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4. 멤브레인의 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.

4.1 변형거동의 안전성

4.1.1 정적하중에 대한 안전성

정적하중의 안전성을 파악하기 위하여 실제 발생 예측되는 열변형에($\Delta T = 190^{\circ}C$) 상당하는 기계 변형율(4.8mm) 부하 하여 멤브레인 주름부의 변형 거동 특성을 파악하였다. 즉 예측되는 변형량을 INSTRON 장비를 사용하여 기계적 변형으로 부하 하였다. RPIS 평가 법에서는 여러 가지 조건을 고려한 FEM 해석과는 다르게 Fig.1과 같은 코너 멤브레인 유니트에 대하여 변형 부하에 따른 거동 측정으로 한정하고 있다. 이에 의한 시험결과 최대 변형 지점에서는 주름 상부에는 주변형이 압축변형거동이 하부에서는 인장 변형 거동의 특성을 보였으며 또한 Fig.8,9에서와 같이 변형량 증가에 따라 각 부분 모두 안정적인 변형 거동 특성을 나타내었다.

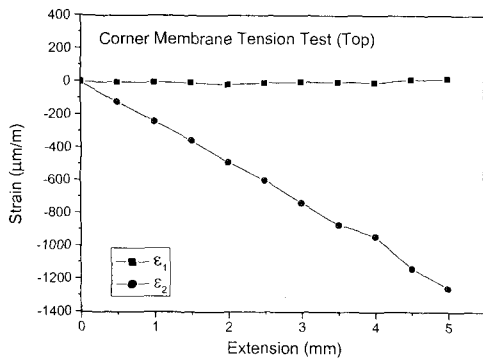


Fig.8 Relationship between measured strain at top corrugation under tensile elongation

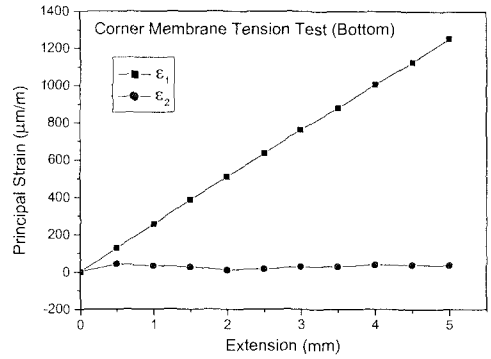


Fig.8 Relationship between measured strain at bottom corrugation under tensile elongation

4.1.2 불안전 붕괴에 대한 안전성 확인

멤브레인의 주름부는 액압에 의한 압력하중이 부하 되며 이에 대한 안전성을 확인하여야 한다. 압력하중에 대한 안전성 확인 시험은 140,000m³ 용량 탱크에서 예측되는 압력에 대하여 확인 시험을 실시하였다. 가장 가혹한 조건인 온도변형과 압력변형이 동시에 최대 부하 되는 조건에 대한 확인을 위하여 압력 부하 시험전 멤브레인에 대하여 4.8mm의 인장변형을 부하한 상태에서 압력을 부하 하였다. 이에 대한 실험 결과는 Fig. 10과 같다. 측정결과와 같이 각 압력의 승압에 따라 변형 거동이 안정적으로 증가하여 안정성을 확인할 수 있다.

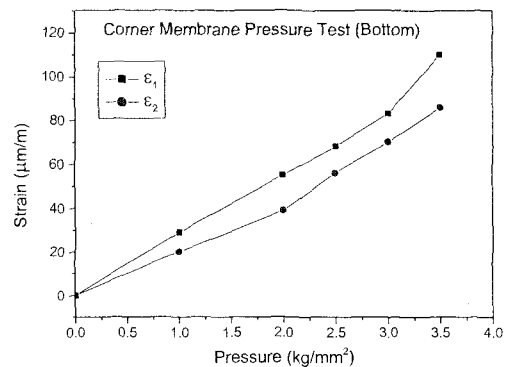


Fig.10 Fig.8 Relationship between measured strain at bottom corrugation under pressure load

4.2 멤브레인 진행성 변형 거동 확인

코너 멤브레인은 탱크의 운전 에 따른 LNG의 방출과 유입에 따른 온도 및 압력 변화에 의한 피로 사이클이 작용하며 이때 주름부에서는 피로 사이클 증가에 따른 변형량이 연속적으로 증가하지 않아야 한다. 이를 확인하는 방법은 수식에 의한 이론적 해석에 의한 요구조건인 허용강도의 3배 ($14 \times 3 = 42 \text{ kgf/mm}^2$)가 넘지 않아야 한다. 만약 이를 만족하지 못할 때에는 10 사이클에 대한 온도 및 압력 하중의 연속적인 부하 및 재하 시험을 실시하여 연속적 변형이 발생하지 않음을 확인하여야 한다. 사이드 및 코너 멤브레인에서 최대 변형률이 발생하는 부위의 주름 최상부 및 주름과 평면이 만나는 부위에서 $\Delta T=190^\circ\text{C}$ 에서 예측되는 열수축 변형량인 4.8mm와 액위에 의하여 발생하는 최대 압력 발생값 예측 값인 2.5 kgf/cm^2 에서 측정된 주변형률값을 다음 식을 통해 계산하여 최대 응력값을 구하였고 이 값을 3S값(42 kgf/mm^2) 초과 여부를 확인하였다.

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

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

여기서 $E=19,300 \text{ kgf/mm}^2$ 와 선팽창계수 $\alpha = 14 \times 10^{-6}$ 이며 RPIS에 제시된 값을 사용한다.

Table 2 Confirmation of no progressive deformation

위치	변형	σ_1	σ_2	σ_{Max}	결과
주름상부	ϵ_{Temp}	-26.52	-7.63	26.5	<3S
	ϵ_{Pre}	1.81	1.66	1.81	<3S
	ϵ_{Total}	-24.71	-5.97	24.71	<3S
평면부	ϵ_{Temp}	26.75	8.78	26.75	<3S
	ϵ_{Pre}	1.86	1.81	1.86	<3S
	ϵ_{Total}	28.60	10.59	28.60	<3S

Table 2의 결과에서와 같이 이론 해석에 의한 코너 멤브레인 주름 상부 및 주름 하부에서 열변형과 압력 변형의 합변형이 3S를 초과하지 않는 것으로 나타나 주름부에서 연속적 변형이 발생하지 않는 것을 확인 하였다.

4.3 피로수명 확인

멤브레인에 요구되는 피로수명은 LNG 탱크 운전 에 따른 탱크 내부 액위 변화에 따라 발생하는 온도 및 압력 변화에 의해 부하 하는 반복 사이클에 대한 피로수명 확인이 필요하며 Table 3와 같이 정해져 있다.[5] 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 3 Typical loads on Membrane of LNG storage Tank

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

변형률의 조합에 의해 구한 누적계수는 Desing Fatigue Curve에서 구한 수명을 적용하여 누적계수를 구할 수 있다. ASME의 Best Fit Curve는 SUS 304의 피로시험에 대한 결과를 도시한 결과이며 이 결과를 기준으로 ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII div.2에 따라 변형률 진폭의 경우에는 안전계수 2 를 파단 사이클에 대해서는 안전계수 20을 고려하여 Design Fatigue Curve를 구할 수 있다. RPIS에서 정의하는 스트레인은 일축 방향에 대한 스트레스이나 멤브레인과의 같은 다축응력 (Multi-Axial Stress)하에서와 같은 상태에서 Design Fatigue Curve를 이용하기 위해서는 상당스트레인 (Equivalent strain)을 이용하여 Curve에 적용한다. 상당 스트레인은 주변형률 ϵ_1 과 ϵ_2 를 먼저 구한후에 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 스트레인 (Equivalent strain)을 Design Fatigue Curve에 적용하여 피로 수명 및 누적계수를 구하였다.

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

M>1 Failure

M<1 No Failure

Table 4 Miner's Number in Corner Membrane

위치	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{eq}	Design Curve	누적 계수
주름 상부	-1256	17	1239	1440	75,000	0.00
주름 하부	1254	37	-1291	1469	47,000	0.00

4. 결론

대용량 LNG 저장탱크에 적합한 코너 멤브레인을 개발하여 실용화에 필요한 기본적인 평가를 이론 및 실험에 의해 수행하였다. 먼저 이론적인 해석은 FEM 해석을 통해 온도 및 압력 부하에 안정적인 변형거동 특성을 나타내는 코너 멤브레인을 최적 설계하였으며 이러한 설계 형상을 바탕으로 실제 프레스 가공에 의해 제작한 멤브레인 유니트에 대하여 RPIS를 기준으로 성능확인 시험을 실시하여 변형거동과 불안전 붕괴에 대한 안전성을 확인하였다.

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 "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소 해석" 대한기계학회 논문집 제18권 제10호, pp.2797~2804.
- (6) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage Tank".