대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 A pp. 907~912 KSME 01S145

LNG 저장탱크용 벽체 멤브레인 개발

오병택* · 홍성호* · 윤인수* · 김영균* · 서흥석*

The Development of Wall Membrane for LNG Storage Tank

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

Key Words: LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Membrane(멤브레인), FEM(유한요소해석), Thermal Stress Analysis(열응력해석), Fatigue Test(피로시험)

Abstract

KOGAS had developed the Ring-knot membrane for LNG storage tank. But we found that some modifications were needed in using the Ring-knot membrane for the commercial LNG storage tanks. So, both analytical and experimental studies have been performed to investigate the strength of the new membrane and the reaction force at the anchor point. Using nonlinear FEM code and experiments, the stress analysis of the new corrugated membrane shapes subject to the cryogenic liquid pressure and thermal loading are performed to ensure the stability and fatigue strength of the new membrane. This paper reports on the results of investigations into this new type of membrane.

1. 서 론

우리나라에서 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 청정 무공해 에너지라는 장점으로 인해 1986년 도입이래, 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162℃ 상태에서 액화하여 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있다. 수요 증가에 따라 국내에서는 저장기지의 건설 및 확충이 이루어지고 있으며 이에 따른 독자적인 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화 필요성이 증대되고 있다. LNG저장탱크는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나뉘어진다. 멤브레인은 LNG저장탱크의 핵심기술로서 특수 기하학적 주름을 가지고 있는, 두께 1.2~2mm의 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열변형 및 압력을 주름부에서의 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 구조로서, LNG저장탱크 및 LNG선박에서 사용하고 있다. LNG에 의한 액하중은 LNG선박의 경우는 선체에서, LNG저장탱크의 경우는 단열재 및 외부 콘크리트 구조물에 의해 지지하게 된다. 멤브레인의 거동을 살펴보면, 평판부에서는 열변형이 거의 발생하지 않고 주름부에서 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]~[3] 고유의 형상을 갖는 모델에 대한 특허권을 보유하고 있으며, 국내에서는 유일하게 한국가스공사[4]에서 멤브레인 설계 및 해석 기술을 갖고 있으며 1997년, 프랑스 국제특허를 획득하였다. 현재에도 새로운 모델에 대한 설계 및 해석과 실험을 통한 안전성 확보 작업이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 현재까지 실행된 기술개발 성과 중 멤브레인의 설계와 해석 및 실험에 의한 멤브레인 안전성을 확인하는데 중점을 두었다.

* 한국가스공사 연구개발원

2. KOGAS 멤브레인 설계

2.1 멤브레인 기본설계 개념

멤브레인은 내압성이 크게 요구되지는 않지만,

액밀성과 기밀성을 유지하기 위해 특수 기하학적 주름을 가진 금속 박판으로, 온도 및 액압력 변화에 따른 하중을 흡수하는 구조로서, 특히 변형거동의 안전성을 보여야하며, 충분한 정적강도와 피로수명을 가져야 한다. 이러한 요구조건에 적합하도록 KOGAS 멤브레인이 개발되었는데, 기본설계 단계에서는 유한요소해석 방법이 주로 사용되었다.

2.2 멤브레인 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 유니트 중심을 기준으로 회전거동하는 형태를 취하게되어, 상대적으로 평판부의 변형이 작도록 고안 하였다.

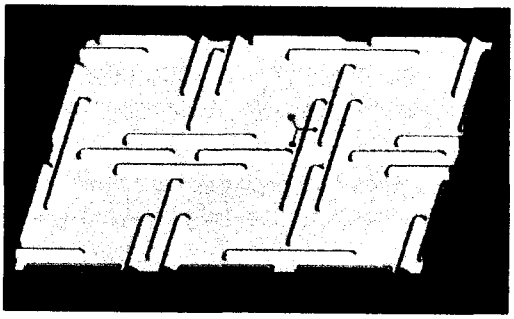

Fig.1 KOGAS wall membrane.

2.3 멤브레인 재료

멤브레인형 LNG 저장탱크에 주로 사용되는 STS304를 사용하였으며 화학적 조성은 Table. 1과 같다.

Table1 Chemical composition of STS304 (wt.%)

Material	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 개발단계에서는 최적의 주름형상과 주름간의 거리(Pitch), 고정점(Anchor point)에서의 반력을 최소화하는 주름 배치 등을 해결하기 위해 유한요소해석 방법이 주로 사용되었다. 해석은 MSC/PATRAN8.0과 MSC/NASTRAN70.7이 사용되었으며, 유한요소의 크기는 대략 4mm의 사각형 요소(Element)를 기본으로 사용하였다.

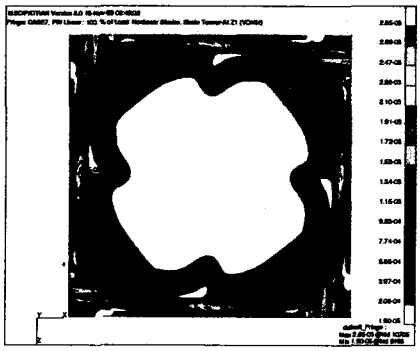

Fig.2 The strain contour plot of wall membrane.

사용된 STS304의 물성값(Material Properties)은 응력-변형률 선도로 입력되었으며, 따라서 해석은 재료의 비선형성을 고려한 Non-linear Analysis를 수행하였다. 그림.2는 멤브레인 유니트의 해석 수행 결과로서, 변형률(Strain) 분포를 보여주며, 각 면은 대칭조건을 부여하였고, 열적 특성을 고려하여 고정점은 1개의 절점(Node)을 고정시켰다. 위의 방법을 각 모델에 대해 반복적으로 사용하여, 최종적인 주름 형상과 주름간격 등을 정하였으며, 상온으로부터 -162℃ 즉, Δ T=190℃ 조건을 적용하여 응력은 약 300MPa, 변형률은 2E-03 정도의 최적모델을 설계하였다.

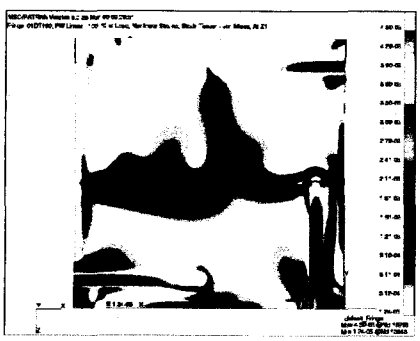

Fig.3 The strain contour plot of wall membrane located between NG and LNG.

위의 과정을 통해 설계된 벽체 멤브레인이 실제로 적용되어 LNG의 방출과 충전을 반복하는 과정을 해석하였다. 멤브레인 유니트 중간부분에 LNG와 NG의 경계면이 존재하고, 이를 유한요소 모델의 경계조건으로 부여하여 해석을 실행한 결과는 그림.3과 같다.

가혹한 조건을 부여하기 위해 벽체 단열재쪽으로 변위를 자유롭게 풀어준 상태에서 해석을 수행하였고, 각 고정점에서의 반력은 Table.2에 정리한 바와 같다.

Table2 The reaction force of each anchor point. (N)

Node ID	1st-Dir.	2nd-Dir.	3rd-Dir.
4364	-82.1	156.3	-40.5
10998	-924.3	-550.2	-584.0
534	231.8	-531.4	-451.7
6861	45.4	56.7	170.5

위의 결과로부터 멤브레인 유니트의 열수축에 의한 고정점에서의 반력은 양호하며, 현재 KOGAS 멤브레인의 고정점 크기로도 충분하다고 사료된다.

4. 멤브레인의 안전성 검토

LNG탱크는 비교적 특수한 구조를 가지고 있으며 재해에 따른 처리기준 및 안전성 평가법이 명확하지 않다. 그러므로, ASME 규정을 기본으로 일본 가스 협회에서 제정한 LNG저장탱크저조지침(RPIS)[5]을 기준으로 멤브레인의 안전성을 검토하였다.

4.1 변형거동의 안전성

4.1.1 정적하중에 대한 안전성

정적하중의 안전성을 파악하기 위하여 실제로 예측되는 열변형(ΔT=190℃)에 상당하는 기계 변형(4.8mm)을 적용하여 멤브레인 주름부의 변형 거동 특성을 파악 하였다. 즉 예측되는 변형량을 INSTRON 장비를 사용하여 기계적 변형으로 부하하였다. 실험결과 FEM해석에서 예측한 부위인 서로 직교하는 주름이 만나는 부위의 주름 상부와 하부에서 최대 변형률이 발생하였다. 주름 상부에는 압축변형이, 하부에서는 인장 변형을 보였으며 변형량 증가에 따라 각 부분 모두 안정적인 변형 거동 특성을 나타내었다.

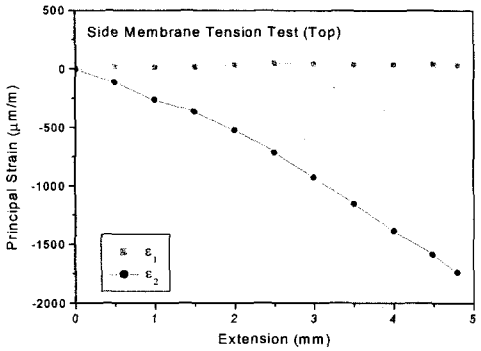

Fig.4 The behavior about the top of corrugation.

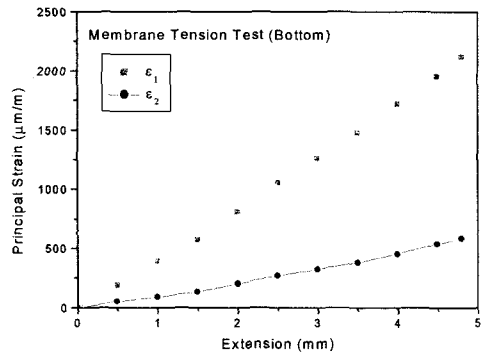

Fig.5 The behavior about the bottom of corrugation.

4.1.2 불안전 붕괴에 대한 안전성 확인

멤브레인의 주름부는 액압에 의한 압력하중이 부하되며 이에 대한 안전성을 확인하여야 한다. 압력하중에 대한 안전성 확인 실험은 140,000m^3 용량 탱크에서 예측되는 압력에 대하여 확인 실험을 실시하였다.

가장 가혹한 조건인 온도변형과 압력변형이 동시에 최대로 부하되는 조건에 대한 안전성 확인을 위하여 압력 부하 실험전 멤브레인에 대하여 4.8mm의 인장변형을 부하한 상태에서 압력을 가하였다. 이에 대한 실험 결과는 그림.6에 나타내었는데, 인장으로 변형된 주름이 압력을 가함으로써, 원래 주름의 형태로 복원되는 KOGAS 멤브레인의 특성을 보여준다. 결과와 같이 압력

변형의 증가에 따라 선형적인 변형률 거동이 이루어져 멤브레인 주름부의 변형거동의 안전성을 확인할 수 있었다.

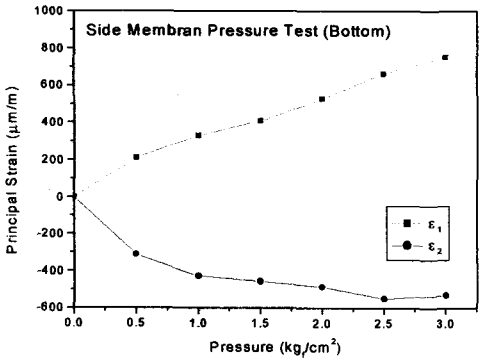

Fig.6 The behavior of corrugation under tensile and pressure loads

4.2 멤브레인 진행성 변형 거동 확인

멤브레인은 탱크의 운전시, LNG의 방출과 충전에 따른 온도 및 압력 변화에 의한 피로 사이클이 작용하며 이때 주름부에서는 피로사이클 증가에 따른 변형량이 연속적으로 증가하지 않아야 한다.

이를 확인하는 방법으로 발생응력이 이론적 해석에 의한 요구조건인 허용강도의 3배 (14×3 = 42 kg_f/mm^2)를 초과하지 말아야 한다는 규정에 따랐다. 만약 이를 만족하지 못할 때에는 10 사이클에 대한 온도 및 압력 하중의 부하 및 제하 실험을 실시하여 연속적 변형이 발생하지 않음을 확인하여야 한다. 따라서, 벽체 및 코너 멤브레인에서 최대 변형률이 발생되는 부위의 주름 상부 및 하부에서 ΔT=190℃로 예측되는 열수축 변형량 4.8mm와 최대 액압에 의해 예측되는 압력 2.5kg_f/cm^2를 부하하여 측정된 주변형률값을 다음 식에 대입하여 최대 응력값을 구하였고, 이 값이 3S(42kg_f/mm^2)를 초과하는지 여부를 확인하였다.

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}\quad(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}\quad(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1)$$

여기서, E=19,300 kgf/mm^2,

α=14×10-6이며, RPIS에 제시된 값을 사용한다.

Table.3의 결과에 나타나있듯이, 이론 해석에 의하면, 벽체 멤브레인 주름 하부에서 열변형과 압력 변형의 합변형 상태에서 3S를 초과하는 것으로 나타났다.

Table3 The calculation of progressive deformation.

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

따라서, 다음 단계로 주름 하부에 대한 10 사이클, 연속 변형량 측정 실험을 실시하였는데, 그 결과는 그림.7과 같다.

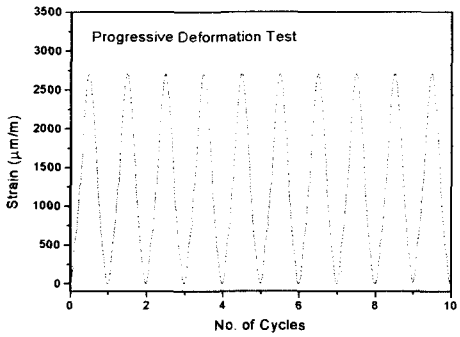

Fig.7 Progressive deformation test.

그림에 나타난 것처럼 연속적인 변형량 증가는 없는 것으로 확인되었다.

4.3 피로수명 확인

멤브레인에 요구되는 피로수명은 LNG탱크 운전시 탱크 내부 액위 변화에 의해 발생하는 온도 및 압력 부하의 반복 사이클에 대한 피로수명이며, LNG저장탱크용 멤브레인은 이에 대한 안전성 검토가 Table.4와 같이 요구된다. RPIS에서는 누적계수 (Miner Coefficient)에 의한 피로강도를 확인하는 방법을 적용하고 있다. 누적계수를 구하는 방법은 각각의 하중으로 인한 변형률의 조합 평가법과 실제 반복하중 부하에 의한 파단 사이클 평가법이 있다.

Table4 The criteria of fatigue strength.

반복하중		스트레인	사이클 수
액압	ΔP=2.15 kg/cm^{2}G	$\Delta\varepsilon_1$	n_1 = 2,600
열 하중	ΔT=90 ℃	$\Delta\varepsilon_2$	n_2 = 2,600
열 하중	ΔT=190 ℃	$\Delta\varepsilon_3$	n_3 = 25

4.3.1 변형률 조합에 의한 피로수명 계산

변형률의 조합에 의해 구한 스트레인을 설계 피로곡선(Design Fatigue Curve)에 적용하여 누적계수를 구한 후 이 값으로 안전성을 평가할 수 있다. ASME의 최적곡선(Best Fit Curve)은 STS304의 피로시험에 대한 결과를 기준으로, ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section Ⅷ div.2에 따라 변형률 진폭의 경우에는 안전계수 2를, 파단 사이클에 대해서는 안전계수 20을 고려하여 설계 피로곡선을 구할 수 있다.

RPIS에서 정의하는 변형률은 일축 상태에 대한 응력이지만 멤브레인과 같은 다축응력(Multi-Axial Stress)상태에서 설계 피로곡선을 이용하기 위해서는 상당스트레인 (Equivalent strain)을 사용한다. 상당 스트레인은 주변형률 ε_1과 ε_2를 먼저 구한 후에 비압축성 재질이라는 조건 하에서 ε_3를 구할 수 있다.

$$\hat{\varepsilon}=\frac{1}{3}\sqrt{2[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2]}$$

$$\varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3=0$$

위와 같은 방법으로 구한 상당 스트레인을 설계 피로곡선에 적용하여 피로 수명 및 누적계수를 구하였다.

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

M=1, Failure

M<1, No Failure

Table 5 The result of fatigue test.

위치	ε_1	ε_2	ε_3	ε eq	Design Curve	누적 계수
주름 상부	29	-1739	1710	**1991**	>1,000,000	0.00
주름 하부	2123	586	-2709	**2851**	84,000	0.03

위의 Table.5의 결과에서 알 수 있듯이, 누적계수는 1보다 작아 새로 개발된 KOGAS 멤브레인은 LNG저장탱크 운전시 발생하는 피로하중에 대해 상당한 안전성을 확보한 것으로 사료된다.

4.3.2 가공도의 영향

RPIS에서 사용된 피로수명 곡선은 STS304 재료에 대한 것이고, 멤브레인과 같이 금형가공을 통해 일부가 상변태되는 멤브레인 주름부에 대해서는 별도로 피로수명에 대한 안전성 평가가 필요하다. 멤브레인 주름부에서 피로시험편을 채취하여 상온 및 저온 환경에 대한 피로시험을 실시하였다. 모든 시험편에서 피로 하중 부하에 대한 파단이 주름 최상부에서 발생하였으며 충분한 피로수명을 가지고 있는 것으로 나타나, 기존의 ASME 최적곡선을 이용한 피로수명 계산이 가능할 것으로 사료된다.

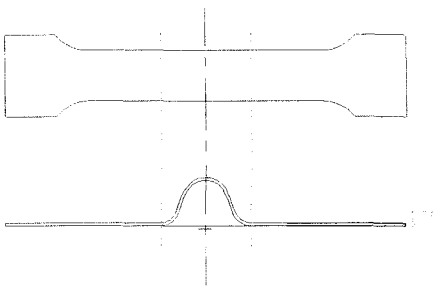

Fig.8 The profile of specimen for the fatigue test.

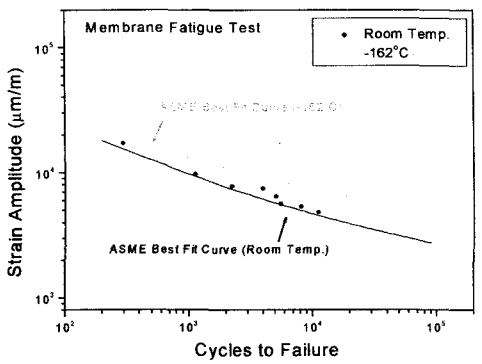

Fig.9 The result about the fatigue test of membrane corrugation

위의 그림.9를 보면 ASME 최적곡선과 실험결

과가 잘 일치하는 것으로 나타난다.

5. 결론

멤브레인을 개발, 설계하여 대용량 상용 LNG 저장탱크에 적용하기 위해 필요한 기본적인 평가를 이론 및 실험에 의해 수행하였다. 먼저 이론적으로는 유한요소해석을 통해 온도 및 압력 부하에 안정적인 변형 특성을 나타내는 멤브레인 패널을 최적 설계하였으며, 이러한 설계 형상을 바탕으로 실제 금형 가공에 의해 제작한 멤브레인 유니트에 대해 온도 및 압력 하중을 부하하여, RPIS기준에 의해, 변형거동과 불안전 붕괴에 대한 안전성을 확인하였다. 또한 가공에 의한 재질 변화가 피로강도에 미치는 영향은 소형 시험편을 직접 제작하여 실험을 수행한 결과, 가공이 피로강도에 미치는 영향은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

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.

(2) Masanori Kawahara, 1984, "Fatigue Strength and Safety Assessment of Membane 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) 김청균, 윤인수, 홍성호 "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소 해석"대한기계학회논문집 제18권 제10호, pp.2797~2804.

(5) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage".