

LNG 저장탱크용 멤브레인 개발을 위한 유한요소해석

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

The FEM Analysis of Membrane for LNG Storage Tank

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

Abstract

Analytical and experimental studies have been performed to investigate the strength of the membrane and the reaction force at the anchor point. Using nonlinear FEM code and experiments, the stress analysis of the corrugated membrane related the cryogenic liquid pressure and thermal loading is performed to ensure the stability and fatigue strength of the membrane. This paper reports on the FEM results of membrane.

Key Words : LNG Storage Tank, Membrane, FEM, Thermal Stress Analysis

1. 서론

우리나라에서 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 청정 무공해 에너지라는 장점으로 인해 1986년 도입 이래, 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162°C 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 obt@kogas.re.kr

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 벽체 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 취하게 되어, 상대적으로 평판부의 변형이 작도록 고안하였다.

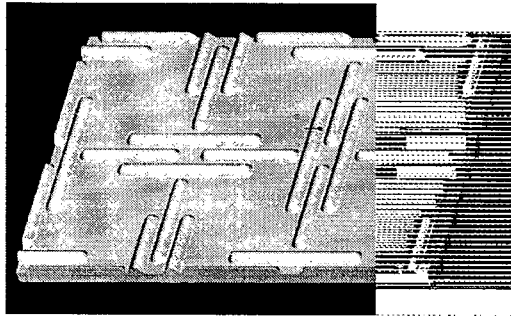


Fig.1 KOGAS wall membrane.

2.3 코너 멤브레인 형상 및 기본구조

코너 피스 멤브레인의 형상은 Fig.2-1과 같이 3개의 평행한 주름으로 이루어져 벽체 멤브레인과 바닥 멤브레인의 주름을 연결하며, 상하 끝단에는 벽체 멤브레인 및 바닥 멤브레인과 연결되기 위한 Lap Joint 용접부위로서 Joggling 되어 있다. 코너 멤브레인 유니트가 벽체 멤브레인과 바닥 멤브레인과 연결되는 구조는 Fig.2-2와 같다.

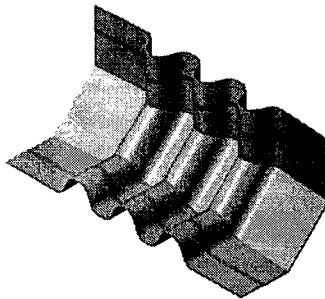


Fig.2-1 KOGAS corner membrane.

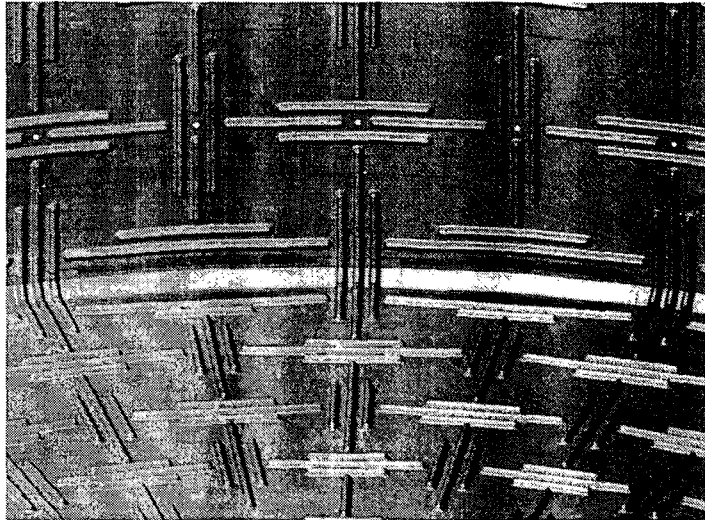


Fig.2-2 Assembly drawing of wall, corner & bottom Membrane.

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. 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 쉘요소(Shell element)를 기본으로 사용하였다.

3.1 벽체 멤브레인의 유한요소 해석

사용된 STS304의 물성값(Material Properties)은 응력-변형률 선도로 입력되었으며, 따라서 해석은 재료의 비선형성을 고려한 Non-linear Analysis를 수행하였다. Fig.3은 멤브레인 유니트의 해석 수행 결과로서, Fig.3-1은 변형률(Strain) 분포를 보여주며, Fig.3-2는 응력(Stress) 분포를 나타낸다. 각 면은 대칭조건을 부여하였고, 열적특성을 고려하여 고정점은 1개의 절점(Node)을 고정시켰다. 위의 방법을 각 모델에 대해 반복적으로 사용하여, 최종적인 주름 형상과 주름간격 등을 정하였으며, 상온으로부터 -162°C 즉, $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$ 조건을 적용하여 응력은 약 300MPa, 변형률은 $3\text{E}-03$ 정도의 최적모델을 설계하였다.

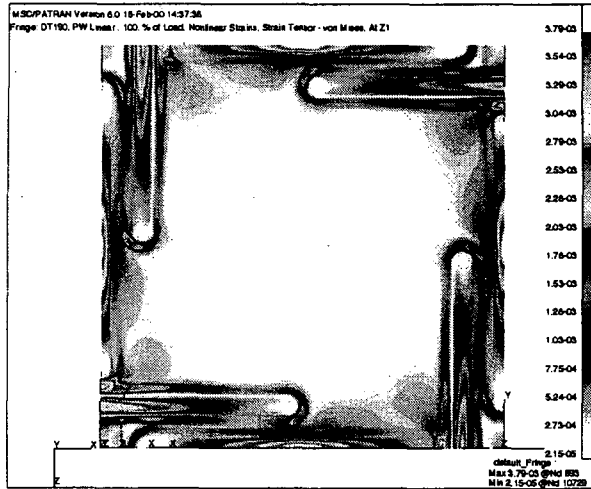


Fig.3-1 The strain contour plot of wall membrane.

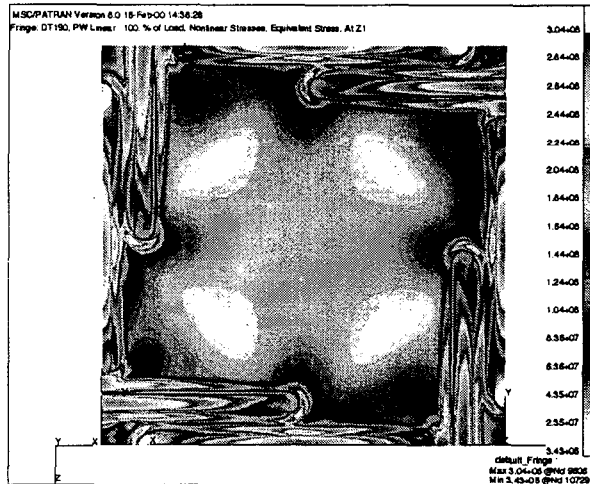


Fig.3-2 The stress contour plot of wall membrane.

다음 단계로 위의 과정을 통해 설계된 벽체 멤브레인이 실제로 적용되어 LNG의 방출과 충전
을 반복하는 과정을 해석하였다. 멤브레인 유닛 중간부분에 LNG와 NG의 경계면이 존재하고,
이를 유한요소 모델의 경계조건으로 부여하여 해석을 실행한 결과는 Fig.4와 같다. Fig.4-1은
LNG와 NG의 경계면이 존재하는 벽체 멤브레인의 변형을 분포를, 그리고 Fig.4-2는 응력 분포
를 나타낸다.

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

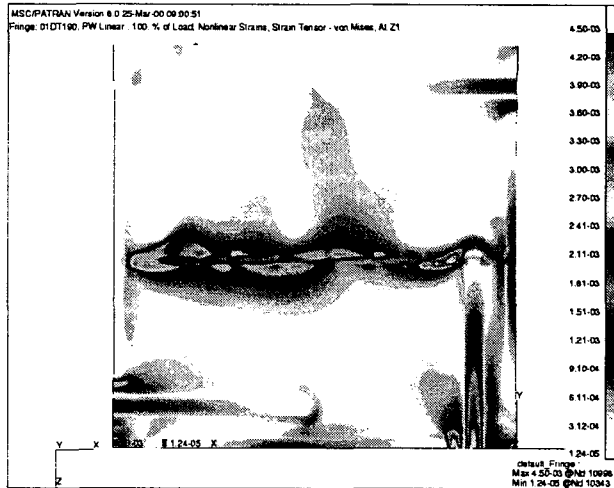


Fig.4-1 The strain contour plot of wall membrane located between NG and LNG.

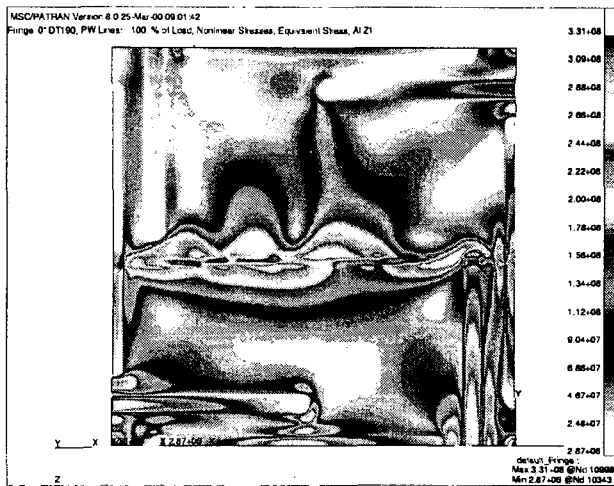


Fig.4-2 The stress contour plot of wall membrane located between NG and LNG.

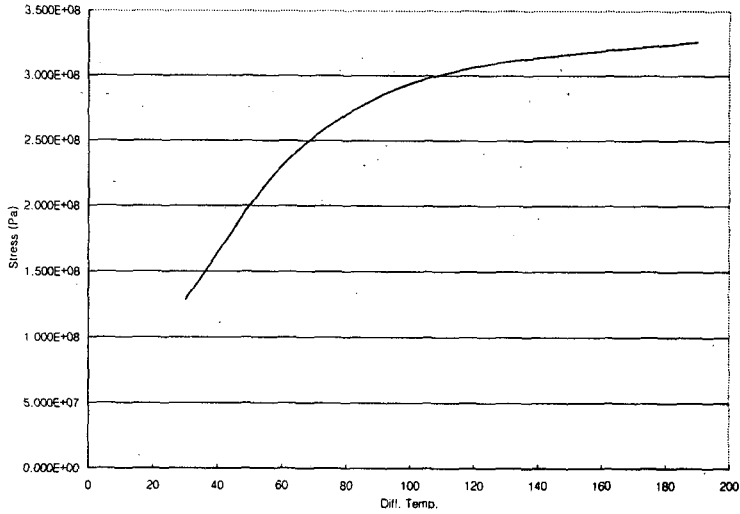


Fig.6-1 The result of stress according to temperature change at corner membrane.

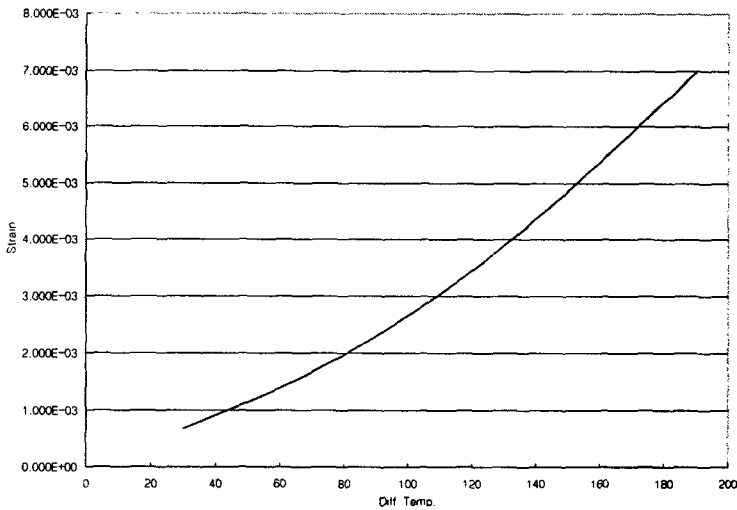


Fig.6-2 The result of strain according to temperature change at corner membrane.

해석결과 코너 멤브레인의 취약부는 예상과 같이 바닥에서 벽체로 연결되는 3중 주름부분으로 이 부분에서 최대 응력과 최대 변형률이 발생한다. 재료 자체의 탄성과 주름의 특성으로 열수축을 흡수한다고 해도 발생하는 응력과 변형률의 크기로 볼 때, 추가적인 피로 실험을 통해 안전성을 판단해야 하는 부분으로 사료되어 실험을 실시하였으며, 실험결과 우수한 피로수명을 보였다. 본 해석은 실제 제작에 앞서 코너 멤브레인의 최적 형태를 찾아내는 과정에 중점을 두고 실행되었으므로 좀 더 현실적인 해석을 위해 Pilot LNG저장탱크의 전체 바닥 멤브레인과 연결되는 코너 멤브레인, 그리고 벽체 멤브레인 일부를 모델링한 유한요소 모델을 사용하였다. Fig.7은 바닥과 연결된 일부분의 유한요소모델을 소개하고 있다.

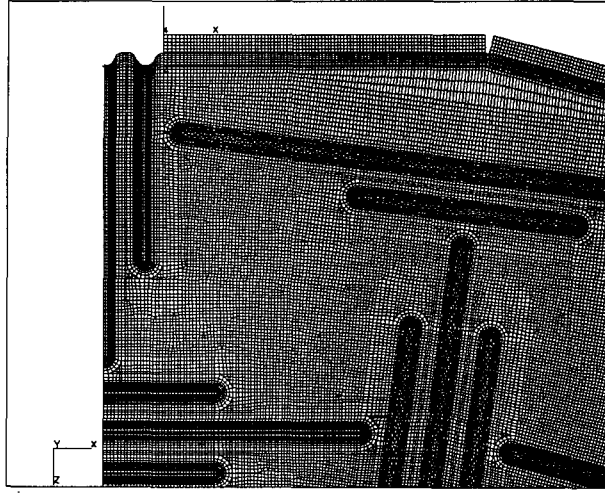


Fig.7 FE Model of corner & bottom membrane used in Pilot LNG storage tank.

본 해석은 앞서 설명된 바와 같이 실제 Pilot LNG저장탱크의 코너 및 바닥 멤브레인을 해석한 것으로, 코너 멤브레인의 실제 적용시 거동과 바닥 멤브레인의 고정점 설정을 목적으로 수행되었다. 해석 결과는 Fig.8, 9에 나타내었는데 각각 응력 분포와 변형을 분포를 보여준다. 선행된 해석을 통해 도출된 최적 코너 멤브레인 형태에 경계조건의 한계성을 벗어났다는 것에 의미가 있는 해석이지만, 아직도 코너 멤브레인에서 고변형률이 발생하고 있다.

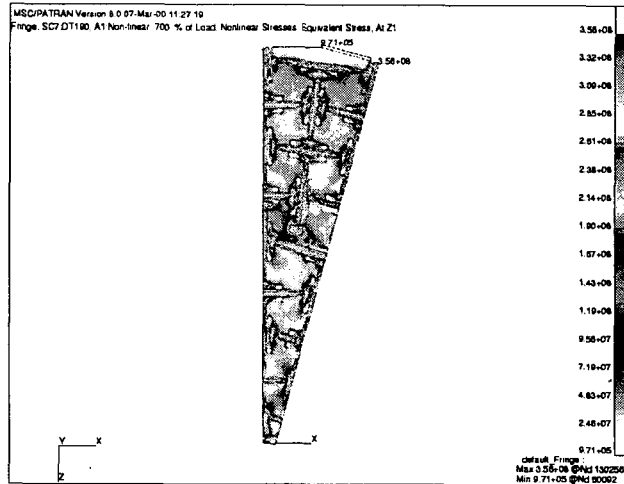


Fig.8 Stress contour plot of corner & bottom membrane.

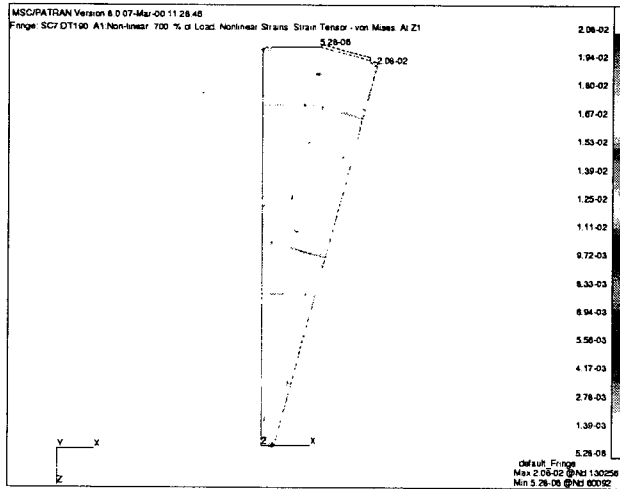


Fig.9 Strain contour plot of corner & bottom membrane.

코너 멤브레인 및 바닥 멤브레인은 정상운전조건에서 항상 LNG가 차 있는 상태로 유지되므로 이 부분에 대한 극악 조건은 최초 사용을 위한 Cool-down 과정이다. Cool-down 과정은 탱크의 수명연한 동안 수십회 반복하게 되는데 해석결과 코너 멤브레인에서 고변형률이 발생하므로 이 부분에 대한 피로실험이 필요하였으며, 실제 실험을 수행한 결과, 우수한 피로수명을 나타내었다.

4. 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 요소 (벽체, 코너 및 바닥 멤브레인)을 최적 설계하였으며, 이러한 설계 형상을 바탕으로 실제 금형 가공에 의해 제작한 각 멤브레인 유니트에 대해 온도 및 압력 하중을 부하하여, RPIS기준에 의해, 변형거동과 불안전 붕괴에 대한 안전성을 확인하였다. 또한 소성 가공에 의한 재질 변화가 피로강도에 미치는 영향은 소형 시험편을 직접 제작하여 실험을 수행한 결과, 가공이 피로강도에 미치는 영향은 거의 없음을 확인할 수 있었다.

따라서, 유한요소해석을 통해 최적화된 KOGAS 멤브레인은 실제 제작 및 실험을 통해, 기준에 만족하는 결과를 얻었으며, 이를 적용한 Pilot LNG 저장탱크가 시공중에 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.
- (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) 김청균, 윤인수, 홍성호 “액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소 해석”대한기계학회 논문집 제18권 제10호, pp.2797~2804.
- (5) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage".