

## LNG 저장탱크용 KOGAS 멤브레인 개발

오병택\* · 김영균\* · 윤인수\* · 서흥석\* · 홍성호\*  
(2001년 12월 7일 접수, 2002년 3월 18일 심사완료)

### The Development of KOGAS Membrane for LNG Storage Tank

Byoung Taek Oh, Young Kyun Kim,  
Ihn Soo Yoon, Heung Seok Seo and Seong Ho Hong

**Key Words:** LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Membrane(멤브레인), FEM(유한요소법), Analytical Stress Analysis(이론 응력해석), Experimental Stress Analysis(실험 응력해석), Fatigue Test(피로 시험), Miner's Law(마이너 수)

#### 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. Korea Gas Corp. (KOGAS) has developed the design technology of the LNG storage tank. One of the most important structural core element of the LNG storage tank is the membrane, made by 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. Analytical results have been performed to investigate the strength of the membrane and the reaction force at the anchor point. Experimental studies are performed 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.

#### 1. 서론

1986년 LNG가 도입된 이래 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책과 환경 규제에 따른 청정 무공해 에너지라는 장점으로 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162℃ 상태에서 액화하여 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있다. LNG저장탱크는 내조·벽체·지붕으로 구분할 수 있으며, 내조는 9% Ni강 형식과 멤브레인(membrane) 형식으로 나뉘어 진다. 9% Ni강 형식의 내조는 자립구조에 의해 LNG를 저장하며, 멤브레인 형식은

주름을 가지고 있는, 두께 1.2~2mm의 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열변형 및 압력에 주름부에서의 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 구조로서, LNG저장탱크 및 LNG선박에서 사용하고 있다. 벽체는 원통 셸 구조로서 측벽 및 원판 형태의 바닥판에서 Prestress 철근 콘크리트로 건설된다. 지붕은 벽체 정상부에 지지되어진 강판의 구형 셸 구조로 내압 및 기밀 구조로 되어 있으며 외부는 충격하중 등에 대비하여 콘크리트로 시공된다. 탱크 내부에서의 멤브레인의 거동을 살펴보면, 평판부를 포함, 유닛 전체에서 발생하는 열수축을 주름부에서 흡수하도록 설계한 것으로 기능상으로는 기밀성이, 사용 재료는 저온 인성 및 열전도성의 특성이 요구된다. 또한, 저장탱크 내의 LNG 방출과 충전으로 인한 압력과 온도의 반복적인 부하에 대해 멤브레인 주름부 거동의 안전성 및 충분한 피로수명강도가 요구된다. 멤브레인은 각 회사별로<sup>(1-3)</sup>

† 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원  
E-mail : shhong@kogas.re.kr  
TEL : (032)810-0354 FAX : (032)810-0360  
\* 회원, 한국가스공사 연구개발원

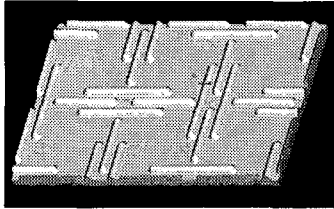


Fig. 1 KOGAS wall membrane concept

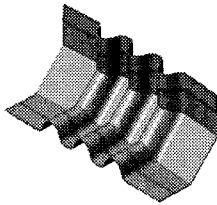


Fig. 2 KOGAS corner membrane 3-D model

고유의 형상을 갖고 있으며 이에 대한 특허권을 보유하고 있다. 한국가스공사<sup>(4)</sup>에서는 1997년, 프랑스 국제특허를 획득한 이래 지속적인 멤브레인 설계 및 해석 기술을 개발하고 있다. 이미 국내에서는 천연가스 수요 증가에 따라 저장기지의 건설 및 확충이 이루어지고 있어 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화를 통한 자체적인 탱크 설계 필요성이 증대되고 있다. 본 논문에서는 현재까지 실행된 기술개발 성과 중 멤브레인의 설계와 해석 및 실험에 의한 멤브레인 안전성을 확인하는데 중점을 두었다.

## 2. KOGAS 멤브레인 설계

### 2.1 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 대각선 중심을 기준으로 회전거동하는 형태를 취하게 되어, 상대적으로 평판부의 변형이 작도록 고안하였다.

### 2.2 코너 멤브레인 형상 및 기본구조

코너 멤브레인의 형상은 Fig. 2와 같이 3개의 평행한 주름으로 이루어져 벽체 멤브레인과 바닥

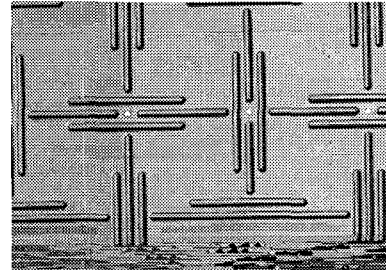


Fig. 3 Assembly drawing of wall, Corner &amp; bottom Membrane

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

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. 3와 같다.

### 2.3 멤브레인 재료

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

## 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. 4는 멤브레인 유니트의 해석 수

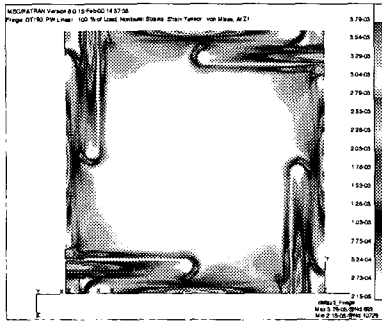


Fig. 4(a) The strain contour plot of wall membrane

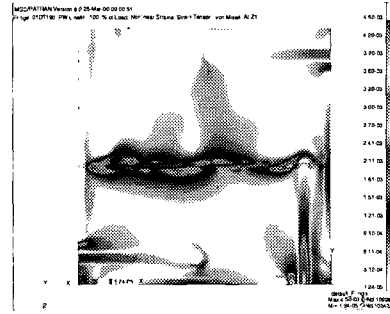


Fig. 5(a) The strain contour plot of wall membrane located between NG and LNG

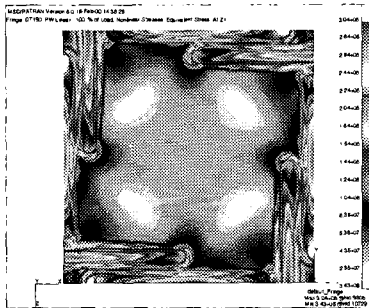


Fig. 4(b) The stress contour plot of wall membrane

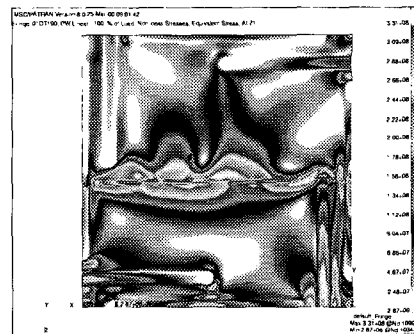


Fig. 5(b) The stress contour plot of wall membrane located between NG and LNG

Table 2 The reaction force of 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

행 결과로서, Fig. 4(a)은 변형률(Strain) 분포를 보여주며, Fig. 4(b)는 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  $-162^{\circ}\text{C}$  즉,  $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$  조건을 적용하여 ASME Best Fit Curve에서 무한 수명이 예상되는, 응력 약 300MPa, 변형률 3E-03 정도의 최적모델을 설계하였다.

다음 단계로 위의 과정을 통해 설계된 벽체 멤

브레인이 실제로 적용되어 LNG의 방출과 충전을 반복하는 과정을 해석하였다. 멤브레인 유니트 중간부분에 LNG와 NG의 경계면이 존재하고, 이를 유한요소 모델의 경계조건으로 부여하여 해석을 실행한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a)은 LNG와 NG의 경계면이 존재하는 벽체 멤브레인의 변형률 분포를, 그리고 Fig. 5(b)는 응력 분포를 나타낸다. 가상의 가혹한 조건을 부여하기 위해 벽체 단열재 쪽으로 변위를 자유롭게 풀어준 상태에서 해석을 수행하였고, 각 고정점에서의 반력은 Table 2에 정리한 바와 같다. 결과로부터, 멤브레인 유니트의 열수축에 의한 고정점에서의 반력은 실험을 통해 고정점이 건디는 편하중의 최대크기가 1.6톤임을 감안할 때, 양호하며 위의 결과를 바탕으로 고정점(Anchor point) 크기를 설계하고, 건설중인 Pilot LNG 저장탱크에 적용하였다.

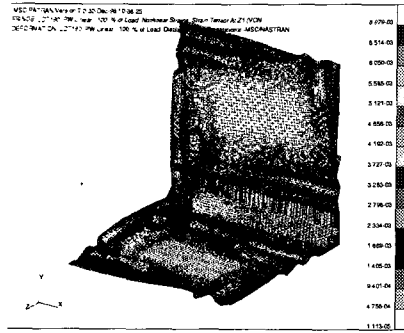


Fig. 6 Analysis model & result of corner membrane

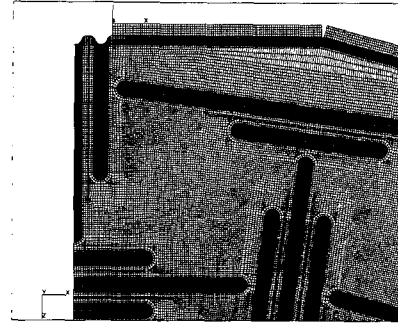


Fig. 8 FE Model of corner & bottom membrane used in Pilot LNG storage tank

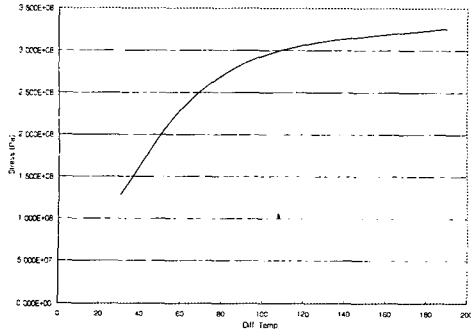


Fig. 7(a) The result of stress according to temperature change at corner membrane

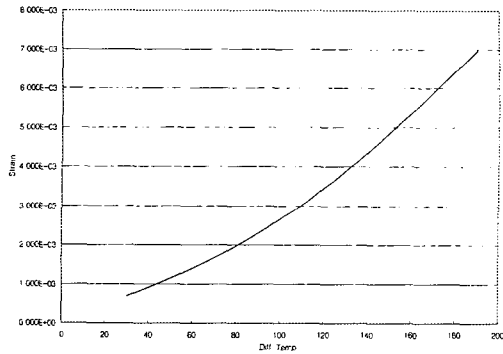


Fig. 7(b) The result of strain according to temperature change at corner membrane

3.2 코너 및 바닥 멤브레인의 유한요소 해석

코너 멤브레인의 경우 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결시키는 부위이므로 코너 멤브레인 유니트만을 사용하여 경계면에 대칭조건을 부여할 수 없는 특징이 있어, 코너 멤브레인에 바

다과 벽체 멤브레인을 연결한 모델을 사용하여 최적의 코너 멤브레인 형태를 찾아내는 방법을 사용하였다. Fig. 6은 해석결과를 나타내며, 온도 변화에 따른 발생 응력과 변형률은 Fig. 7(a)과 7(b)의 그래프로 나타내었다. 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 변형률이 1E-02의 비교적 큰 값을 나타내므로, 추가적인 피로시험을 통해 안전성을 판단해야 하는 부분으로 사료되어 실험을 실시하였으며, 시제품을 사용한 실제 실험에서는 우수한 피로수명을 나타내었다. 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. 8은 바닥과 연결된 일부분의 유한요소모델을 소개하고 있다. 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. 9,10에 나타내었는데 각각 응력분포와 변형률분포를 보여준다. 선행된 해석을 통해 도출된 최적 코너 멤브레인 형태에 경계조건의 한계성을 벗어났다는 것에 의미가 있는 해석이지만, 아직도 코너멤브레인에서 고변형률이 발생하고 있다.



Fig. 9 Stress contour plot of corner & bottom membrane

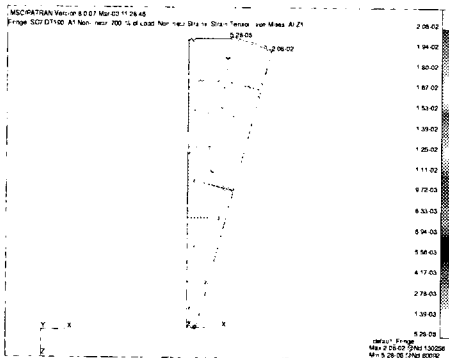


Fig. 10 Strain contour plot of corner & bottom membrane

코너 멤브레인 및 바닥 멤브레인은 정상운전조건에서 항상 LNG가 차 있는 상태로 유지되므로 이 부분에 해당하는 극악 조건은 최초 사용시와 탱크 완전 개방을 통한 유지보수 후 행해지는 Cool-down 과정이다. Cool-down 과정은 탱크의 수명연한 동안 해마다 1회씩 반복하게 되는데 해석결과 코너 멤브레인에서 고변형률이 발생하므로 이 부분에 대한 피로시험이 필요하였으며 이미 언급한 대로 실제 실험을 수행한 결과, 우수한 피로수명을 나타내었다. 따라서, 유한요소해석을 통해 최적화된 KOGAS 멤브레인은 실제 제작 및 실험을 통해, 기준에 만족하는 결과를 얻었으며, 이를 Pilot LNG 저장탱크에 적용하여 실용화 가능성을 입증하였다.

#### 4. 제작 및 성능평가

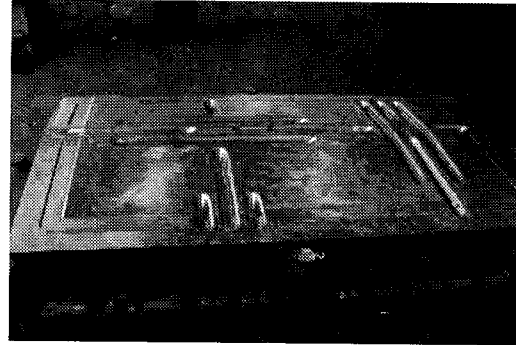


Fig. 11 Metal die of wall membrane

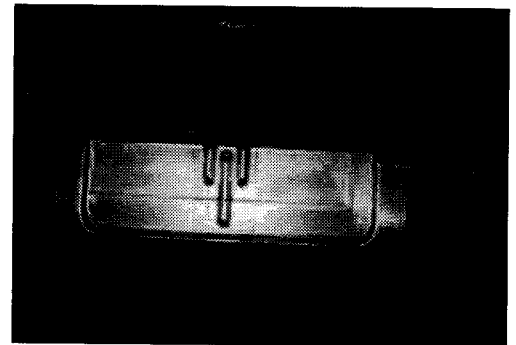


Fig. 12 Metal die of corner membrane

해석을 통해 최적화된 형상으로 금형을 제작하여 실제 멤브레인을 생산 하였다. Fig. 11은 벽체 멤브레인, Fig. 12는 코너 멤브레인의 금형을 각각 보여준다.

##### 4.1 RPIS 기준에 따른 멤브레인 평가

LNG저장탱크는 특수한 구조를 가지고 있으며 재해에 따른 처리기준 및 안전성 평가법도 명확하지 않다. 그러므로 ASME의 코드를 기본으로 일본에서 제정한 LNG저장탱크 저조 지침<sup>(5)</sup>(RPIS)을 기준으로 벽체 멤브레인<sup>(6)</sup>과 코너 멤브레인<sup>(7)</sup>에 대한 실험을 실행하여 멤브레인 주름의 변형 거동 안전성 및 피로강도를 확인하였다.

##### 4.2 가공도의 영향

RPIS에서 사용된 피로수명 곡선은 가공되기 전의 재료 자체에 대한 것이므로, 멤브레인 가공에 의한 STS304 강의 일부가 상변태되는 주름부는 별도의 실험을 통한 피로수명 확인이 필요하다. 멤브레인 주름부에서 Fig. 13과 같은 피로시험편

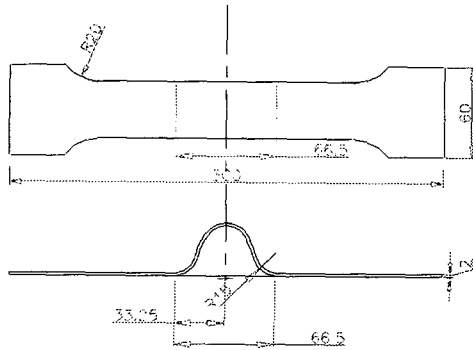


Fig. 13 Fatigue Test Specimen of Membrane

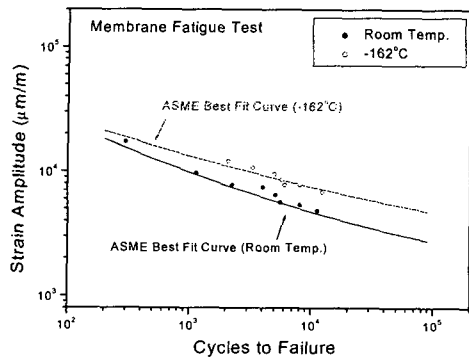


Fig. 14 Fatigue Test Result of Membrane

을 채취하여 상온 및  $-162^{\circ}\text{C}$  환경에서 피로시험을 실시 하였다. 하중 조건은 변위제어에 의한 일정 변형량을 과단시 까지 반복 부하하여 과단 사이클을 구하였으며, 이때 변형량이 집중되는 부위에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정 하였다. 멤브레인 주름부의 소형 시험편을 이용한 피로 시험 결과를 Fig. 14와 같이 모재에 대한 ASME Best Fit Curve와 비교 도시한 결과 주름부에서도 충분한 피로수명을 가지고 있음을 확인할 수 있어 멤브레인 주름부의 가공에 의한 영향이 크지 않음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

멤브레인을 설계 개발하여 대용량 상용 LNG 저장탱크에 적용하기 위한 필요한 기본적인 평가를 이론 및 실험에 의해 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유한요소해석을 통하여 온도 및 압력 부하에 안정적인 변형 특성을 나타내는 멤브레인 요소 (벽체, 코너 및 바닥 멤브레인)를 최적 설계하였다.
- (2) 설계 형상을 바탕으로 실제 금형 가공에 의해 제작한 각 멤브레인 유니트에 대해 온도 및 압력 하중을 부하하여, RPIS기준에 의한 변형거동과 불안전 붕괴에 대한 안전성을 확인하였다.
- (3) 소성 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 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 유한요소해석," 대한기계학회 논문집 제18권 제10호, pp. 2797~2804.
- (5) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage".
- (6) 오병택, 홍성호, 윤인수, 김영균, 서홍석 "LNG 저장탱크용 벽체 멤브레인 개발," 대한기계학회 추계학회 논문집A, 2001, pp. 907~912.
- (7) 김영균, 홍성호, 윤인수, 오병택, 서홍석 "LNG 저장탱크용 코너 멤브레인 개발," 대한기계학회 추계학회 논문집A, 2001, pp. 800~805.