

# 스트레인 게이지를 이용한 Pilot LNG 저장탱크 멤브레인 실 변형 거동 측정

김영균<sup>†</sup> · 윤인수\* · 오병택\* · 홍성호\* · 양영명\*

## The Measurement of Real Deformation Behavior in Pilot LNG Storage Tank Membrane by using Strain Gage

Young Kyun Kim, Byoung Taek Oh

Seong Ho Hong, Young Myung Yang, Ihn Soo Yoon

**Key Words:** Pilot LNG Storage Tank (Pilot LNG저장탱크), Membrane (멤브레인)  
Strain Gage (스트레인 게이지), Experimental Stress Analysis (실험응력해석)

### Abstract

Korea Gas Corp. has developed the design technology of the LNG storage tank. The membrane to be applied inside of the LNG storage tank is provided with corrugations to absorb thermal contraction and expansion caused by LNG temperature changes. It is very important to measure their thermal strains under LNG temperatures by analytical and experimental stress analysis of the membrane. We have developed a stress measurement system using strain gages and measured the strain during cooldown and storing the LNG. We also analyzed the measured data by comparison with the FEM data. On the basis of these results, we could design and assure the application of the Kogas Membrane to large scale LNG storage.

### 1. 서 론

최근 석유대체 에너지 및 청정연료인 천연가스(NG)의 수요가 크게 증가하고 있다. 천연가스는 대기압, -162°C 상태에서 액화하여 액화 천연가스 상태(LNG)로 저장탱크에 저장되며, 이러한 초저온 상태에서 안정적으로 저장 하기 위하여 주름을 가지고 있는 얇은 스테인레스 판인 멤브레인을 LNG 저장탱크 내부에 설치 하여 LNG 온도에 의한 열수축과 팽창을 주름부에서 흡수하도록 설계 하였다. 멤브레인은 기능상으로는 기밀성이,

재료상으로는 저온 인성 및 열전도성의 특성이 요구되며 특히 압력과 온도의 반복적인 부하에 대한 멤브레인 주름부 거동의 안정성 및 피로 수명 강도가 요구된다. 멤브레인의 성능평가는 정해진 시험규격<sup>(1)</sup>에 따라 시행하고 있으나, 시험규격은 상온 환경에서 멤브레인 단위 유니트에 대하여 기계적 변형과 압력 변형을 부하하여 이에 대한 주름부 변형 거동의 안정성과 피로 강도의 확인에 국한되어있다. 그러나 멤브레인은 시공 설치시 단열재의 앵커링 피스에 용접 고정되어 운전시에는 LNG 저장에 따라 발생하는 온도변화 시엔 단열재와 연동되어 변형 거동이 발생 한다. 또한 각각의 단위 유니트들이 용접 연결되어 전체 탱크의 내조를 구성 하여 연동하는 하나의 압력 용기로서의 구조와 기능을 가지고 있어 멤브레인의 변형거동을 파악 하기 위해서는 실제로 LNG저장탱크에 설치된 멤브레인에 센서를 부착

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원

Email : kyk@kogas.re.kr

TEL : (032)810-0366 FAX : (032)810-0360

\* 한국가스공사 연구개발원



Fig.1 Pilot LNG Storage Tank

하여 변형률을 측정 해야 한다. 스트레인 게이지를 이용한 LNG저장탱크 멤브레인 변형률 측정은 LNG 저장에 의한 초저온 환경에서의 결보기 변형률(Apparent Strain)<sup>(2-3)</sup> 발생에 의한 스트레인 스트레인 측정의 난이성 그리고 안전규정에 안전거리 확보에 따른 와이어의 길이의 장거리화로 측정시 어려움이 있다.

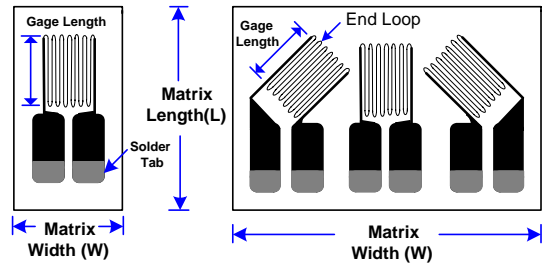
한국가스공사에서는 자체 개발 멤브레인<sup>(4-5)</sup>을 사용한 1,000m<sup>3</sup>의 Pilot LNG 저장탱크를 건설하였으며 그 형상은 Fig.1과 같다. Pilot LNG 저장탱크는 선진 외국사와 비교하여 후발 주자로서 140,000m<sup>3</sup> 이상의 상용 대용량 탱크 설계를 위한 중간 단계의 연구 개발 목적으로 건설 되었으며, 핵심적 기술인 내조 멤브레인의 변형률 측정을 위하여 응력 측정 시스템 구축을 위한 별도의 측정틀을 설계에 반영하여 건설 하여 실제로 Pilot LNG 저장탱크 내부 멤브레인의 변형률을 측정할수 있도록 응력 측정 시스템을 개발 하였다.

본 논문에서는 기개발 응력 측정 시스템을 이용하여 Pilot LNG 저장탱크 멤브레인의 실제 변형 거동을 측정 하였다. 이렇게 측정한 결과를 기본으로 멤브레인 거동의 안정성 여부와 초기설계시 적용한 유한요소해석 결과와 비교 분석 하였다.

## 2. Piolt LNG저장탱크 응력측정 시스템

### 2.1 측정 센서

저온용 스트레인 게이지는 사용 재료에 대하여 온도 보상이 자체적으로 되어 있지만 온도 변화



(a) Single Gage (b) Rosette Gage

Fig. 2 Strain Gage Configurations

Table 1 Strain Gage Specification (units:mm)

No.	Model	Type	Gage Length	Matrix Size(L×W)
1	WK-062-RB	Rosette	1.57	10.7×11.7
2	WK-062-AP	Single	1.57	6.6×4.1

\*MM STC No. = 09 (STS Option)

Strain Gage Resistance = 350Ω

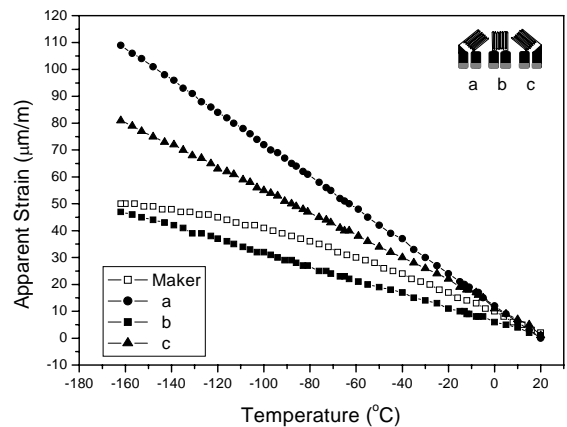


Fig. 3 The Apparent Strain when compensated by Single Gage

가 커지면서 결보기 변형률 (Apparent Strain)이 크게 발생한다. 이러한 결보기 변형률은 온도변화에 의한 스트레인 게이지 선의 저항 변화와 실제 선과 측정 재료의 수축/ 팽창의 차이에 의해 이러한 현상이 나타나게 된다.

측정에 사용된 스트레인 게이지는 주변형률값 및 주변형 방향의 계산이 가능한 Rosette 형식의 스트레인을 사용하였으며, 1축 게이지를 사용하던미 게이지 방식을 사용하여 온도보상을 하였다. Fig.3 에서는 Rosette 형식의 스트레인 게이지를 1축 스트레인 게이지로 보상한 방식에서의 온

도변화에 따른 겉보기 변형률을 측정 하여 나타내었다. 측정된 결과를 스트레인 게이지 메이커에서 제시하는 겉보기 변형률 값을 이용하여 구한 값을 도시 하여 나타냈다. 1축 게이지와 게이지 선의 방향이 같은 b에서 최소값이 나타났으며 a,c 방향에서 더 크게 나타났다. 이러한 실험을 통해 같은 게이지 길이를 갖는 1축 스트레인 게이지를 이용하여 보상을 한 경우에도 최대 110 μm/m 정도의 오차가 발생 하는 것으로 나타났다.

### 2.2 LNG저장탱크 응력 측정 시스템

Pilot LNG 저장탱크에 적용 되는 측정 시스템의 개략도는 Fig.4와 같다. 측정 장비는 UGR-100을 사용하였으며 Pilot LNG 탱크 인근에 설치된 측정룸에 측정 장비를 설치하였다. 외조 벽체 콘크리트 내부에 스테인레스 파이프를 설치 하여

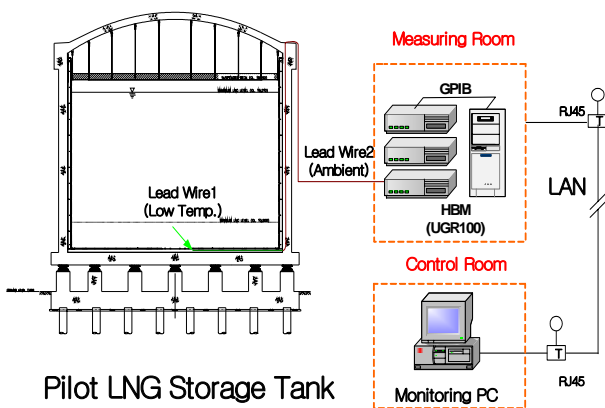


Fig. 4 The diagram of Pilot LNG Storage Tank Strain Measurement System

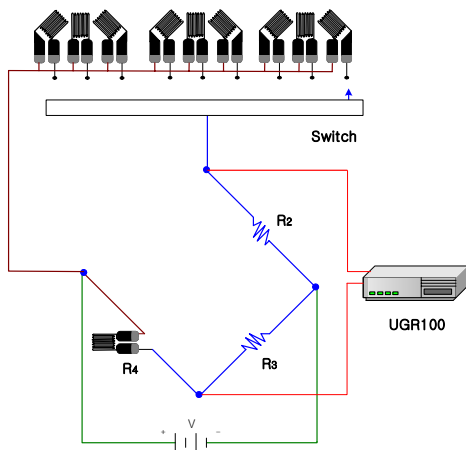


Fig. 5 Switching Active gages in R<sub>1</sub> of the Wheatstone bridge

상온용 리드와이어를 인입하였으며, 탱크 내부에는 저온용 리드와이어를 설치하였다. 와이어의 길이는 상온용은 80m 그리고 저온용 와이어는 10~20m의 길이였으며 각 와이어 선을 7핀 커넥터를 이용하여 연결하였다. 연속 적인 데이터 측정 및 저장이 가능 하도록 하였으며 이 측정값은 랜연결에 의하여 원거리에서 연속적인 데이터 확인 및 저장이 가능 하도록 하였으며, Fig.5와 같이 변형된 Half Birdge를 구성하였다.

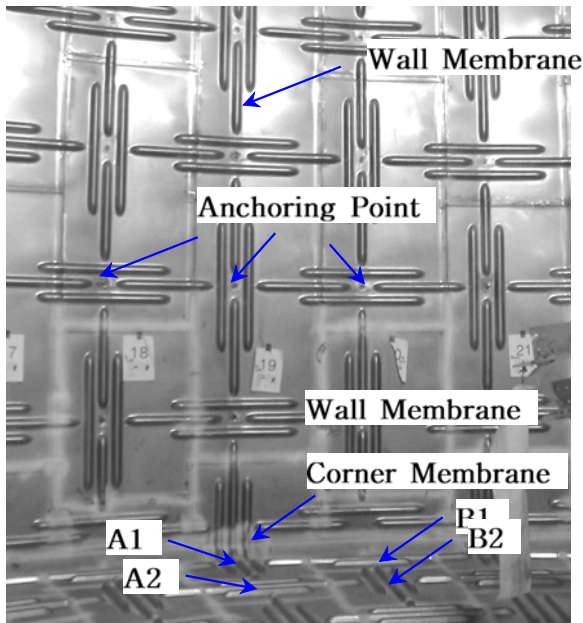
### 3. 유한요소해석 및 측정 결과 비교

Pilot LNG 저장탱크 내조 멤브레인이 설치 되어 내조의 형상을 Fig.6 에 나타냈다. 내조 시스템은 벽체 멤브레인과 바닥 멤브레인 그리고 이 두 멤브레인을 연결 하는 코너 멤브레인으로 구성되어 있다.

벽체 멤브레인은 가로 주름과 세로 주름이 일정한 간격으로 교차하는 방식으로 구성되었으며 특히 주름간의 사이 중앙부에 앵커링 포인트에 용접 고정되는 방식으로 이루어져 있다. 코너부는 LNG저장탱크에서 가장 취약한 부위로서 벽체 멤브레인과 바닥 멤브레인의 주름을 연결하는 코너 멤브레인과 보강을 위하여 외조 콘크리트에 고정된 6mm 두께의 후판을 설치하여 벽체, 바닥 그리고 코너 멤브레인의 평판부와 용접 연결 하는 구조로 되어있다. 바닥 멤브레인은 방사형 구조로 구성되어 각각의 멤브레인 유니트가 용접 연결되어 있으며 앵커링이 없는 하나의 구조로 되어있으며, LNG 저장에 따른 온도 변형 발생시엔 길이 방향과 원주방향으로의 후판의 수축 변형과 코너 멤브레인 주름의 변형이 동시에 발생하는 거동이 예측 되는 부위이다. LNG 저장탱크 설계시 유한요소해석을 수행하여 전체구조의 최대 응력 발생점에 대한 안전성을 확보하여 건설 하였으며, 실제운전에서의 실험 측정값을 구하여 해석값과 비교 하였다. 측정데이터와 유한요소 해석 결과를 비교하기 위하여 Rosette 형식의 스트레인 게이지를 이용하여 주변형률을 계산 하였으며 이 값을 (1)~(2)식에 적용하여 상당 변형률 값을 구하여 비교 하였다.

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

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \dots\dots\dots(2)$$



**Fig.6** The inner shell configuration of Membrane in Pilot LNG Storage Tank.

**3.1 벽체 멤브레인**

유한요소해석에 의한 결과에서는 가로 주름과 세로주름이 만나는 부위인 P1에서 최대 변형률값이 예측 되었으며 실제 측정 값 또한 P1 부위에서 큰 변형률값이 측정되었다. 측정 결과에 의하면 측정부위 모두에서 온도 변화에 따른 스트레인 측정값이 안정적인 거동을 나타내는 것으로 측정 되었다. 벽체 부위에서는 변형률값의 레벨과 분포가 유한요소해석과 거의 일치 하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 벽체 멤브레인의 고정점인 앵커링 포인트가 일정하게 배열되어 있으며 또한 멤브레인도 일정한 배열 형상을 띠고 있어 해석 수행에 필요한 경계조건 부여가 정확했기 때문이다.

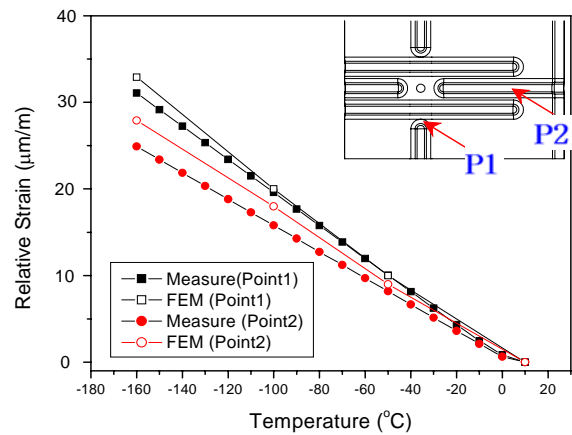
**3.2 Corner Membrane**

유한요소해석 결과에 의하면 최대 변형률은 코너 멤브레인의 중앙부에서 발생하며 양쪽 주름으로는 낮은 스트레인 값이 대칭적으로 분포하고 있다. 측정된 결과에 의하면 세 주름 모두 온도 변화에 대하여 일정하게 변형하는 안정적 거동을 나타내고 있다. 측정된 변형률 분포는 유한요소해석과 달리 P3에서 최대 변형률이 측정되었으며, P4와 P5의 순서로 나타나 전체적으로 코너

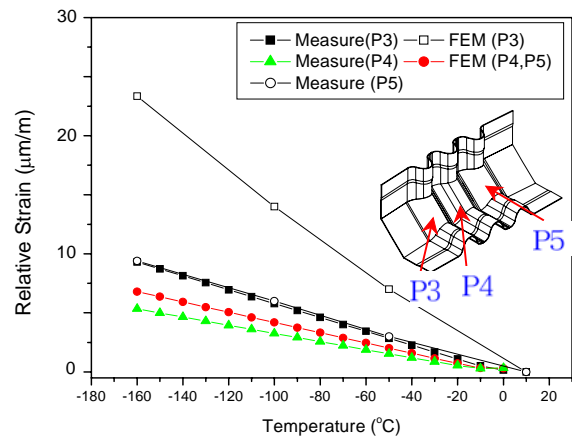
멤브레인이 인장 상태에 있는 것으로 나타났다. 유한요소해석에서 예측과 달리 측정 결과에서는 코너 멤브레인에 부하되는 인장변형이 원주방향으로 동일하게 분포 되는 형태가 아니라 한쪽 방향으로 큰 인장 변형이 부하되는 것을 알수 있다. 이러한 현상은 코너 부위의 모든 멤브레인이 후판과 연결되어 있으며 이러한 구조상 후판의 변형거동에 영향을 받아 실제 거동이 유한요소해석과 다르게 나타났다.

**3.3 Bottom membrane**

바닥 멤브레인은 방사형 구조로 구성되어 있으며 코너 멤브레인과 후판에 용접 되는 부분의 거동에 대하여 분석 하였다.



**Fig. 7** Relationship between measured and calculated strain at wall membrane



**Fig.8** Relationship between measured and calculated strain at wall membrane

A 멤브레인 주름의 변형은 원주방향의 변형을 나타내는 P6, P7과 방사형 변형을 나타내는 P8, P9으로 나눌수 있다. 코너 멤브레인 주름과 연결되는 부위인 P6, P7은 유한요소해석에 의하면 서로 대칭 되는 부분으로 동일한 크기의 변형률값이 예측 되는 부위이나 측정결과에 의하면 약간

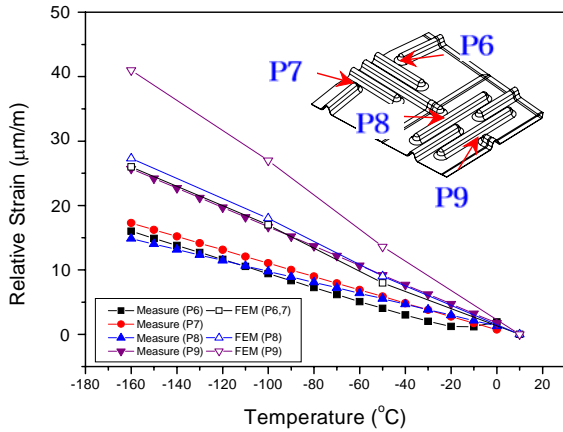


Fig.7 Relationship between measured and calculated strain at bottom membrane (A type)

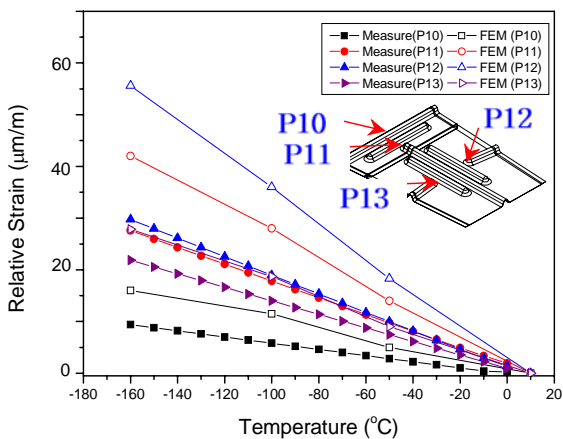


Fig.8 Relationship between measured and calculated strain at bottom membrane (B type)

다르게 나타나고 있다. 즉 코너멤브레인 주름의 경우와 같이 한 쪽 방향으로 변형이 집중되고 있으나 코너 멤브레인의 경우 보다는 변형률값의 차이가 작게 나타났다. 코너 멤브레인과의 달리 후판과 연결되지 않아 후판 거동의 영향이 작아 이러한 현상이 나타났다.

방사형 방향의 변형을 나타내는 P8, P9번의 거

동은 유한요소해석에서 예측되는 변형과 측정 변형값은 P9번에서 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 즉 A 멤브레인 전체적으로 코너 멤브레인과 후판에 용접 고정되어 고정점 역할을 하며 이에 따라 강성도에 의해 P9번에서 큰 변형률이 발생하는 것으로 나타났다. P8번에서는 P9번 측정값의 60% 수준의 변형률값이 예측 되었으며 실제 측정값 또한 일치 하였다.

B형 멤브레인 에서는 유한요소해석에 의해 P11과 P12에서 P10과 P13보다 큰 변형률이 예측 되었다. 유한요소 해석 결과 바닥 멤브레인의 변형률 분포는 예측되었으나 변형률 값의 크기는 실제 측정시 작게 나타났다.

이러한 현상은 바닥 멤브레인이 용접에 의해 연결되어 있으며 앵커링이 없는 하나의 구조되어있으며 코너 부위를 연결하는 코너 멤브레인과 후판의 유한요소해석 경계조건 부여가 용이치 않았기 때문이다.

유한요소해석에서 예측된 변형률값의 상대 비교에서는 측정 값과 유사한 값을 얻을수 있었으나 변형률값의 절대 비교에서는 유한요소해석결과가 측정결과 보다 크게 나타났다. 이러한 현상은 유한요소해석시 가장 가혹한 환경에 대한 경계조건 부여에 의한 해석 수행이 이루어져 해석 값이 전체적으로 크게 나타났다. 설계시에는 안전성을 고려 하여 보수적인 경계조건을 부여 하기에 그 차이가 크게 나타났다.

#### 4. 결론

LNG 저장탱크 멤브레인 변형률을 측정 하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정 시스템을 개발하여 실제 Pilot LNG 저장탱크에 적용 하여 멤브레인 변형률을 측정 하여 유한요소해석과 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LNG 저장탱크 응력 조건에서 저온 무부하시험을 결과 측정게이지인 Rosette 형식의 게이지와 1축의 보상게이지의 결보기 변형률의 차이가 최대 110 발생하여 이부분에 대한 보정이 필요하다.

(2) 벽체 멤브레인의 유한요소해석 결과에서 예

측한 변형률과 실제 측정에 의해 구한 변형률값이 변형률 값의 레벨과 분포가 비교적 잘 일치하였다.

(3) 코너 멤브레인은 벽체와 바닥 멤브레인의 주름을 연결하는 동시에 후판에 용접 고정되어 유한요소해석에서 예측된 가운데 주름을 중심으로 대칭적 변형이 분포되는 현상이 예측되었으나 실제 측정 결과에 의하면 한 쪽 방향에서 더 큰 인장 하중을 받고 있는 것으로 나타났다.

(4) 바닥 멤브레인은 유한요소해석 결과와 측정 결과값을 비교한 결과 측정부위의 상대 비교시엔 해석 결과와 근사한 결과를 얻었으나 변형률의 크기가 큰 차이를 보이고 있다.

#### 참고문헌

- (1) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage Tank"
- (2) Oh, B. T., Kim, Y.K., Yoon, I.S., Seo H.S., and Hong S.H., 2002, "The Development of KOGAS membrane for LNG Storage Tank," Trans. of KSME (A), Vol.26, pp1203~1208
- (3) Joo, J.W., Kim, K.B., 1992, "The Apparent Strains of Strain Gages in Cryogenic Environment," Trans of KSME (A), Vol.16, pp1099~1107
- (4) Joo, J.W., Kim, K.B., 1993, "The Characteristic Test for Gage Factors of Strain Gages in Cryogenic Environment," Trans of KSME(A), Vol.17, pp2205~2213
- (5) H.Arai, K.Suzuki, 1975, "低温應力計測法," 日本海士協會會誌, pp. 371~384