KIGAS Vol. 9, No. 3, September, 2005
(Journal of the Korean Institute of Gas)

Pilot LNG 저장탱크 멤브레인 실 변형 거동 측정

†김영균 · 윤인수 · 오병택 · 홍성호 · 양영명 · 김정규*
한국가스공사 연구개발원, *한양대학교 기계공학부
(2005년 7월 5일 접수, 2005년 9월 12일 채택)

The Measurement of Real Deformation Behavior in Pilot LNG Storage Tank Membrane

†Y.K. Kim · I.S. Yoon · B.T. Oh · S.H. Hong · Y.M. Yang · J.K. Kim*
Kogas R&D Cente
**Hanyang University*
(Received 5 July 2005, Accepted 12 September 2005)

요 약

LNG 저장탱크 내부에 설치되는 멤브레인은 LNG 저장시 발생하는 온도와 압력의 하중변화에 따른 열 수축과 팽창을 주름에서 흡수하도록 설계 되어있다. 따라서 멤브레인 주름부의 변형률 측정을 통한 성능평가가 중요하며 이를 위해 유한요소해석 및 실험을 수행한다. 스트레인 게이지를 이용한 응력측정 시스템을 구축하여 운전 상태에서 멤브레인 주름 거동을 파악하기 위하여 변형률을 측정 하였다. 일부 측정값을 유한요소해석에 의해 구한 결과와 비교하여 KOGAS 멤브레인의 특성을 검토 하였다.

Abstract – 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 and pressure changes. It is very important to measure their thermal strains under LNG temperature 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.

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

I. 서 론

LNG(액화천연가스)는 도시가스 및 화력 발전소등의 기본 에너지 원료로서 사용되며, 최근 석유 대체 에너지로서의 기능과 청정 연료로서의 장점이 부각되어 수요가 크게 증가하고 있다. 천연가스는 대기압, -162°C 상태에서 액화하여 탱크에 저장되며 이러한 탱크는 충분한 안전성과 안정성을 요구한다. LNG 저장탱크는 내조의 형식에 따라 9% Ni형강을 이용한 자립형 탱크와 스테인리스 판을 가공하여 제작한 멤브레인을 이용하여 내조를 구성한 멤브레인형이 있다.

멤브레인은 주름을 가지고 있는 얇은 스테인리스 판으로 LNG 온도에 의한 열 수축과 팽창을 주름부에서 흡수하도록 설계하였으며, 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[1,2]에 따라 시행하고 있다. 즉 상온 환경에서 멤브레인 단위 유닛에 대하여 기계적 변형과 압력 변형을 부하하고 이에 대한 주름부 변형 거동의 안정성과 피로 강도의 확인에 대하여 규정하고 있다. 그러나 실제로 멤브레인이 시공 설치되는 환경은 단열재의 앵커링 피스에 용접 고정된 상태에서 LNG 저장시 발생하는 온도 변화에 따라 단열재와 연동되어 거동하는 특성이 나타난다. 또한 멤브레인 단위 유닛이 용접 연결되어 전체 탱크의 내조를 구성하며, 유닛이 서로 연동하는 하나의 압력 용기로서의 구조와 기능을 가지고 있어 멤브레인의 변형 거동

†주저자:kyk@kogas.re.kr

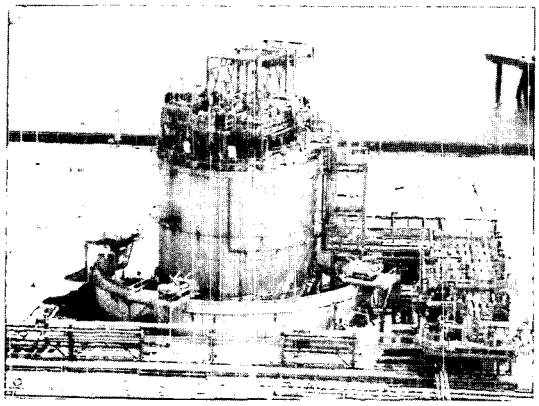


Fig. 1. Pilot LNG storage tank.

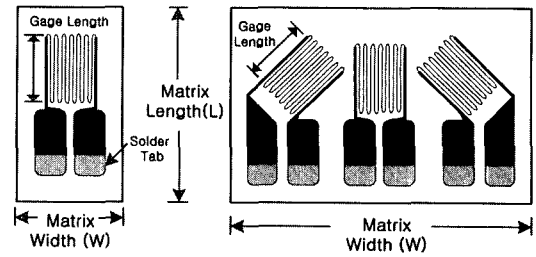
을 파악하기 위해서는 LNG 저장탱크에 설치된 멤브레인에 스트레인게이지를 부착하여 변형률의 실제 측정이 필요하다. 스트레인게이지를 이용한 LNG 저장탱크 멤브레인 변형률 측정은 LNG 저장에 의한 초저온 환경에서의 겉보기 변형률(Apparent Strain)[3-5] 발생에 의한 스트레인 측정의 난이성 그리고 안전관리법규에서 규정하는 안전거리 확보에 따른 와이어의 길이의 장거리화로 인한 문제로 측정에 어려움이 있다.

한국가스공사는 자체 개발 멤브레인을[6,7] 사용하여 1,000 m^3의 용량의 멤브레인 형식의 Pilot LNG 저장탱크를 순수 국내 기술로 설계하여 2001년 건설 완료하여 현재까지 운전중에 있으며 그 형상은 Fig. 1과 같다.

Pilot LNG 저장탱크는 선진 외국설계사와 비교하여 후발 주자로서 200,000 m^3 이상의 상용 대용량 탱크 설계를[8] 위한 중간 단계의 연구 개발 목적으로 건설 되었다. 멤브레인 설계 기술은 LNG 저장탱크의 핵심기술로, 한국가스공사에서 세계에서 3번째로 개발한 멤브레인 내조 설계 기술의 신뢰성을 확보코자 멤브레인의 변형률 측정 시스템을 구축하였다. 본 논문에서는 응력측정 시스템을 이용하여 Pilot LNG 저장탱크 멤브레인의 실제 변형 거동을 측정 하였으며 측정한 결과를 기본으로 멤브레인 거동의 안정성 여부와 초기 설계 시 적용한 유한요소해석 결과와 비교 분석하여 해석 및 설계 데이터의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

II. Piolt LNG저장탱크 응력측정 시스템

멤브레인 변형률 측정에 사용된 스트레인 게이지의 형상은 Fig. 2, 특성은 Table 1에 나타냈다. 주변형률 값 및 주변형 방향의 계산이 가능한 Rosette 형식의 스트레인 게이지를 사용하였으며, 1축 게이지를 사용한 더



(a) Single Gage (b) Rosette Gage

Fig. 2. Strain gage configuration.

Table 1. Strain gage specification (mm).

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

*Gage Length = 1.57 mm
*MM STC No. = 09 (STS Option)
*Strain Gage Resistance = 350 Ω

미 게이지 방식을 사용하여 온도보상을 하였다.

Pilot LNG 저장탱크에 적용되는 측정 시스템의 측정장비는 UGR-100을 사용하였으며 Pilot LNG 탱크 인근에 설치된 측정룸에 측정 장비를 설치하였다. 외조 벽체 콘크리트 내부에 스테인리스 파이프를 설치하여 상온용 리드와이어를 인입하였으며, 탱크 내부에는 저온용 리드와이어를 설치하였다. 와이어의 길이는 상온용은 80 m 그리고 저온용 와이어는 10~20 m의 길이였으며 상온 및 저온 와이어의 선은 7핀 커넥터를 이용하여 연결하였으며 연속적인 데이터 측정 및 저장이 가능 하도록 하였다.

III. Pilot LNG 저장탱크 멤브레인 거동

Pilot LNG 저장탱크 내조 멤브레인이 설치된 내조의 형상을 Fig. 3에 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 주름 중앙부에 앵커링 포인트가 있어 벽체에 고정된 단열재에 용접 고정 되는 방식으로 설치되어 있다. 코너부는 LNG저장탱크에서 가장 취약한 부위로서 벽체 멤브레인과 바닥 멤브레인의 주름들을 연결하는 코너 멤브레인이 설치되어 있으며, 코너 멤브레인 유닛 사이사이에는 외조 콘크리트에 고

정된 6 mm 두께의 후판을 설치하여 보강 하는 구조로 설계 되어있다. 바닥 멤브레인은 방사형 구조로 구성되어 각각의 멤브레인 유닛이 용접 연결되어 있으며 특히 앵커부가 없는 하나의 구조로 되어있어 LNG 저장에 따른 온도 변형 발생시에는 방사형 방향과 원주방향으로 후판의 수축 변형과 코너 멤브레인 주름의 변형이 동시에 발생 하는 거동이 예측되는 부위이다.

LNG 저장탱크 설계 시 멤브레인 유닛의 응력 발생점에 대한 안전성 여부를 평가 반영하여 설계 건설 하였으며, 실제 운전에서의 변형률을 측정하여 그 결과를 분석 하였다. 측정 데이터를 분석하기 위하여 Rosette 형식의 스트레인 게이지를 이용하여 주변형률을 계산하였으며 이 값을 식 (1), (2)에 적용하여 상당 변형률 값을 구하여 비교하였다.

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

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \quad (2)$$

3.1. 벽체 멤브레인

벽체 멤브레인은 Fig. 3과 같이 가로주름과 세로주름 그리고 앵커링 포인트가 규칙적으로 배치된 구조이다. 이 부위의 유한요소해석에 의한 변형률 값은 가로주름

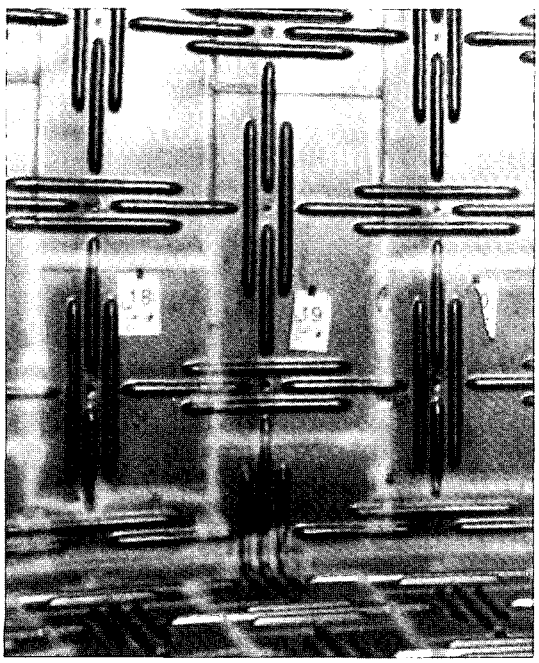


Fig. 3. The inner shell configuration of membrane in pilot LNG storage tank.

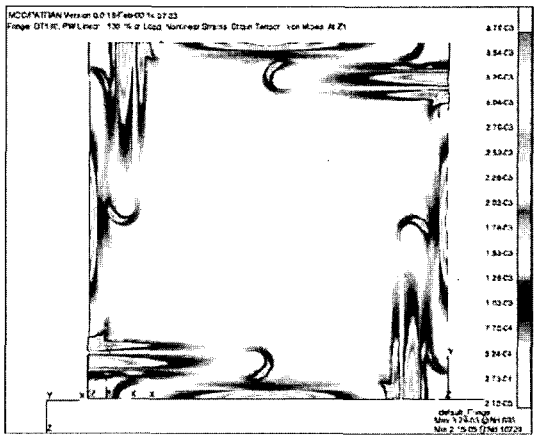


Fig. 4. The contour of stress in side membrane by FEM analysis.

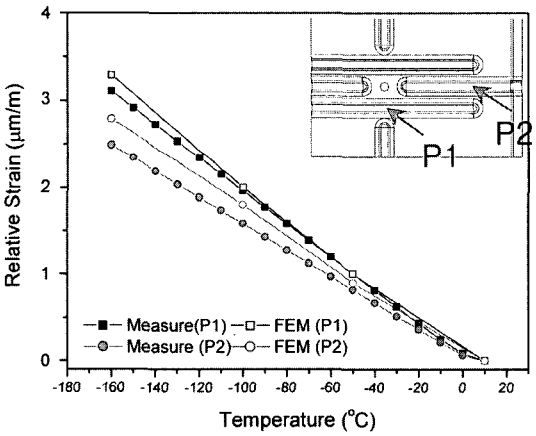


Fig. 5. Strain behaviour at side membrane during cooldown.

과 세로주름이 만나는 부위인 P1에서 최대 변형률 값이 예측 되었으며 실제 측정 결과에서도 P1 부위에서 최대 변형률 값이 측정되었다. 측정 결과에 의하면 측정부위 모두에서 온도 변화에 따른 스트레인 측정값이 선형적으로 변하는 안정적인 거동을 하는 것으로 나타났다. 벽체 부위에서는 변형률 값의 크기와 분포가 유한요소해석과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 벽체 멤브레인은 고정점인 앵커링 포인트 그리고 멤브레인도 일정한 간격으로 배치 되어 해석 수행에 필요한 경계조건 부여가 정확했던 것으로 판단된다.

3.2. Corner Membrane

코너 멤브레인은 수직방향으로 세 주름을 갖으며 이 주름이 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결한다. 양쪽 끝 평행방향은 6 mm 두께의 후판에 용접 연결되는

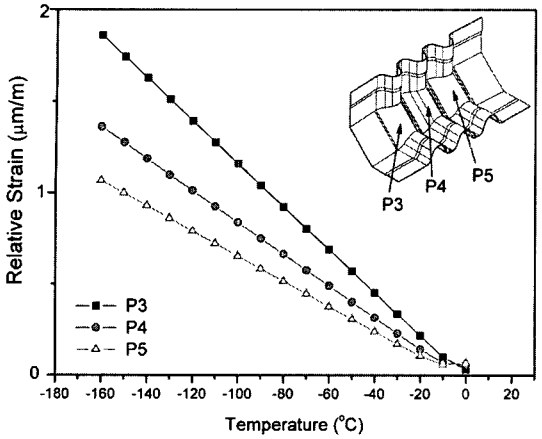


Fig. 6. Strain behaviour in corner membrane during cooldown.

구조를 가지고 있다.

코너 멤브레인을 구성하는 세 주름 상부에 게이지를 설치하여 변형률을 측정 하였으며 측정 결과는 Fig. 6에 나타냈다. 실제 측정 결과에 따르면 세 주름 모두 온도변화에 대하여 일정하게 변형 거동이 발생하는 것으로 나타나고 있어 안정적이라는 걸 알 수 있다. 변형률 분포는 P3에서 최대 변형률이 발생 하였으며 P4와 P5의 순서로 나타났다. 즉 코너 멤브레인에 부하되는 인장변형이 원주방향으로 동일하게 분포되는 형태가 아니라 한쪽 방향으로 큰 인장 변형이 부하 되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 코너 멤브레인의 형상 및 설치 조건이 동일하였으나 실제 시공시의 후판 용접 작업 등으로 인한 편심 그리고 멤브레인 용접작업으로 인해 코너 멤브레인에 미치는 영향으로 인하여 완전한 대칭을 이루지 못하고 한 쪽 방향으로 큰 변형이 발생하며 완전한 대칭이 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

3.3. Bottom membrane

바닥 멤브레인은 방사형 구조로 구성되어 있으며, 앵커 고정부가 없다. 모든 멤브레인 유닛이 용접 연결되어 하나의 판으로 열 하중을 흡수하는 구조로 설계되어 있다.

본 논문에서 변형률 측정하여 조사한 부위는 바닥 멤브레인 중 코너 멤브레인과 후판에 용접이 되는 부분으로 Fig. 7에 나타나는 멤브레인 각 부위의 거동에 대하여 분석 하였다. 변형률 측정 위치는 코너 멤브레인 주름과 직접 연결되는 부위인 A1 멤브레인 중 서로 대칭인 형상의 주름에서 주름 하부인 P6 그리고 주름 상부인 P7를 측정하였으며 이 부분의 측정 결과를 Fig. 8

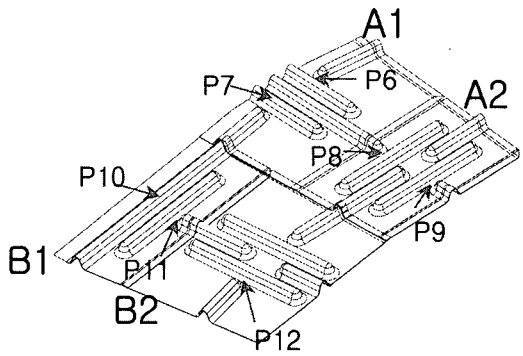


Fig. 7. Measuring points in bottom membrane.

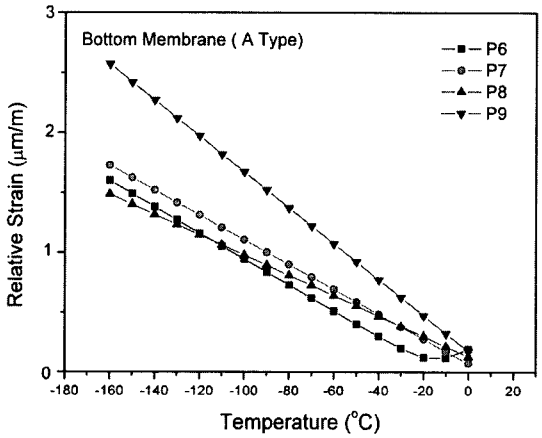


Fig. 8. Strain behaviour in bottom membrane (A Type) during cooldown.

에 나타내고 있다. 측정 결과에 따르면 온도변화에 대하여 주름부의 변형률이 안정적으로 거동하는 것으로 나타났다. 또한 3.2 코너멤브레인 결과에서와 같이 가운데 주름을 중심으로 양쪽 주름에서 변형률이 대칭으로 분포되기 보다는, 한 쪽 방향으로 변형이 크게 분포되며 이 주름도 그 영향을 받는 것으로 나타났다.

A2 멤브레인은 코너부에서 약간 떨어진 위치에서 방사형 방향의 변형을 흡수하기 위한 주름을 배치하였다. P8번과 P9번 주름 모두 방사형 방향의 변형을 흡수하는 동일한 형상의 주름을 가지고 있다. 측정 결과에 따르면 P9번에서 P8번 보다 큰 변형률이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 벽체에 가까운 P8번 주름은 벽체 고정부에서 가까운 부분으로 고정점 역할을 하게 되며 P9번에서 변형 거동이 크게 발생하는 것으로 판단된다.

B형 멤브레인은 코너 멤브레인과 연결되는 후판에 용접 연결되는 멤브레인으로 방사형 방향의 열 변형을

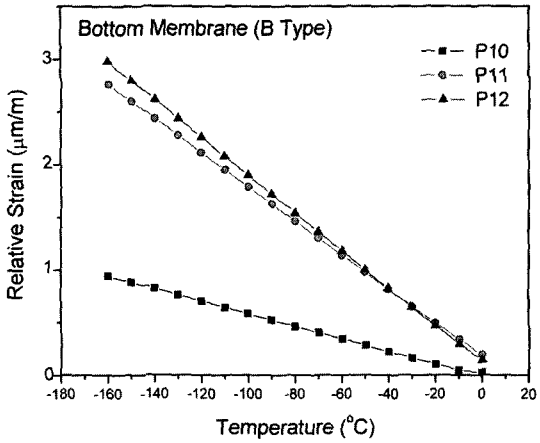


Fig. 9. Strain behaviour in bottom membrane (B Type) during cooldown.

흡수하도록 설계된 B1 멤브레인과 원주방향의 열 변형을 흡수하도록 설계된 B2 멤브레인으로 구성되어 있다. 실제 측정 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 멤브레인 주름의 변형률 거동은 온도에 따라 일정하게 안정적으로 변화하는 것으로 나타났다.

P10번은 P11번 위치보다 작은 값이 측정 되는 것으로 나타났다. P10번 위치는 멤브레인 전체를 관통하는 주름부위 이며, 코너 멤브레인과 연결되는 후판에 가까운 부분으로 큰 변형량이 발생 하지는 않는 것으로 나타났다.

즉 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인이 연결되는 코너 부위는 코너 멤브레인과 후판으로 구성되어 운전 시 형상 및 거동이 불균형 발생에 의한 응력 집중 현상이 나타나지 않아 멤브레인의 거동이 안정적 거동을 나타내는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

한국가스공사 멤브레인에 대한 성능평가 및 신뢰성 확보를 위하여 Pilot LNG 저장탱크 내조에 적용된 멤브레인에 스트레인 게이지를 설치하여 변형률을 측정하고자 하였다. 실제 운전 환경에서의 KOGAS 벽체·코너·바닥 멤브레인 주름부의 변형률을 측정 하여 벽체, 바닥 그리고 코너 멤브레인의 거동을 분석하였다. 측정 결과에 따르면 Pilot LNG 저장 탱크 내조 멤브레인의 변형률이 한 곳에 집중되지 않고 전체 주름부에서 고르게 분포되었으며, 온도 변화에 따라 거동이 안정적 거동하는 것으로 나타나 KOGAS 멤브레인의 안정성을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

[1] Japan Gas Association Committee., Recommended Practice for LNG Inground Storage Tank, (2002)

[2] Kawahara, M., "Fatigue Strength and Safety Assessment of Membrane Components", Nippon Kokan Technical Report, No.42, 11-18, (1984)

[3] Joo, J.W., "The Apparent Strins of Strain Gages in Cryogenic Enviroment", *Trans. of KSME(A)*, **16**, 1099-1107, (1992)

[4] Joo, J.W., "The Characteristic Test for Gage Factors of Strain Gages in Cryogenic Enviroment", *Trans. of KSME(A)*, **17**, 2205-2213, (1993)

[5] Arai, H., "Stress Measurements at Cryogenic Temperatures", Transactions of Nippon Kaiji Kyokai, 371-384, (1975)

[6] Oh, B.T., "The Development of KOGAS Membrane for LNG Storage Tank", *Trans. of KSME (A)*, **26**, 1203-1208, (2002)

[7] Kim,Y.K., Oh,B.T., Seo, H.S., Hong, S.H. and Yoon, I.S., "The Development of Stress Measurement system in LNG Storage Tank", *Proceedings of the KSME, Spring Annual Meeting*, 515-520, (2002)

[8] 한국가스공사 LNG탱크개발센터, "인천생산기지 #19-20 지하식 저장탱크 설계계산서 - Fatigue Strength Calculation for Membrane in LNG Inground Storage Tank", (2003)