

기계적/전기적 측정 센서를 이용한 Kogas Pilot LNG 저장탱크 멤브레인 변형 거동 측정(I)

김영균[†], 홍성호*, 오병택*, 윤인수*, 김지훈*, 김석순*
(*한국가스공사 연구개발원)

The Measurement of Membrane Deformation Behavior in Kogas Pilot LNG Storage Tank by the use of Mechanical/Electrical Sensor (I)

Y.K. Kim[†], S.H. Hong*, B.T. Oh*, I.S. Yoon*, J.H. Kim*, S.S. Kim*
Kogas R&D Center*

Abstract

A membrane unit for Liquefied Natural Gas (LNG) storage tank is a structural member which is designed specifically for preventing undesirable LNG leakage. Membrane units have to endure gas and liquid pressures by LNG and thermal stresses by the contact with cryogenic liquid of -162°C . It is of importance to assure the strengths of membrane by experimental stress analysis under the temperature of LNG. In this paper, we proposed measurement system using commercial electrical strain gage and mechanical extension meter designed for this study. Basis on these results, we developed the strain and extension measurement system for the membrane.

1. 서론

우리나라 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 환경 정책의 영향으로 1986년 도입이래 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162°C 상태로 액화하여 체적을 1/600로 축소한 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있다. 수요 증가에 따른 저장기지의 건설 및 확충이 계획되고 있어 독자적인 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화 필요성이 증대되어 한국가스공사에서는 이에 대한 연구를 수행 한 결과, 자체 설계 개발한 멤브레인⁽¹⁾을 이용하여 내조를 구성한 $1,000\text{m}^3$ 용량의 Pilot LNG 저장탱크를 건설하였다. 멤브레인은 특수 기하학적 형상(주름)을 가지고 있는 두께 1.2~2mm의 스테인리스 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열 변형을 주름부에서 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 기능을 갖고 있다. 즉 평판부의 열 변형을 주름부에서 흡수 하도록 디자인한 것으로, 기밀성, 저온 인성 및 열전도성의 특성이 요구된다. 또한, 저장탱크 내의 LNG 방출과 충전으로 인한 압력과 온도의 반복적인 부하에 대해 충분한 피로수명강도가 요구된다. 이러한 요건의 만족 여부는 정해진 시험규격⁽²⁾에 따라 성능을 평가하고 있다. 시험규격은 상온

[†] kyk@kogas.re.kr

환경에서 멤브레인 단위 유닛에 기계적 변형과 압력 변형을 부하하여 이에 대한 주름 부 변형 거동의 안정성과 피로강도를 확인하는데 국한되어 있다. 이에 멤브레인 개발사 별로 자체적으로 액체질소(LN₂)를 이용한 추가적인 시험을 실시하여 성능을 평가하고 있다. 즉 벽체, 바닥 그리고 이를 연결하는 코너 멤브레인을 용접 하여 큰 구조체의 시험편을 만들어 실제 LNG 저장탱크의 일부분을 형성하도록 하여 액체질소 주입에 의한 온도하중 부하에 따른 비정상 거동 유무를 확인 하고 있다. 그러나 멤브레인은 탱크 내에서 단열재의 앵커링 피스에 용접 고정되며 온도변화에 따라 단열재의 수축현상이 발생하여 고정점과 연동하는 변형 거동이 발생 하고 있으며 또한 멤브레인은 정확한 원통형이 아닌 임의의 각형 구조를 갖기 때문에 유닛에 대한 실험조건과 꼭 일치하지 않는 부분이 존재하며 저장유체의 채움과 비움을 반복함으로 인해 국부적인 비대칭 거동을 하게 되므로 멤브레인의 정확한 변형거동을 파악하기 위해서는 실제 탱크에서의 멤브레인 변형거동을 측정 하는 것이 요구된다. 다른 한편으로는 탱크 내의 거동을 파악하기 위한 연구로 조명 장치를 포함하고 있는 내부 관찰 카메라를 이용하여 노즐부 및 용접부등의 거동을 확인 하고 있다⁽³⁾. 카메라 촬영에 의한 내부 관찰은 계속 적인 촬영을 통한 비정상 거동 유무판단에는 적합 하나 멤브레인 변형량 측정과 같은 정확한 측정 데이터 획득에는 적합하지 않다. KOGAS에서 건설한 Pilot LNG 저장탱크는 선진 외국사와 비교하여 20년 이상의 후발 주자로서 140,000m³ 이상의 상용 대용량 탱크 설계를 위한 중간 단계의 연구 개발 목적으로 건설 되었으며, 그중에서도 핵심 기술인 내조 멤브레인의 변형 측정이 필요하며 이를 위한 측정 시스템을 설계단계에서 반영하였으며 이를 바탕으로 본 논문에서는 Pilot LNG 저장탱크 멤브레인의 변형률을 측정하기 위하여 구축한 변형 측정 시스템 과 실제 적용에 대하여 논하였다.

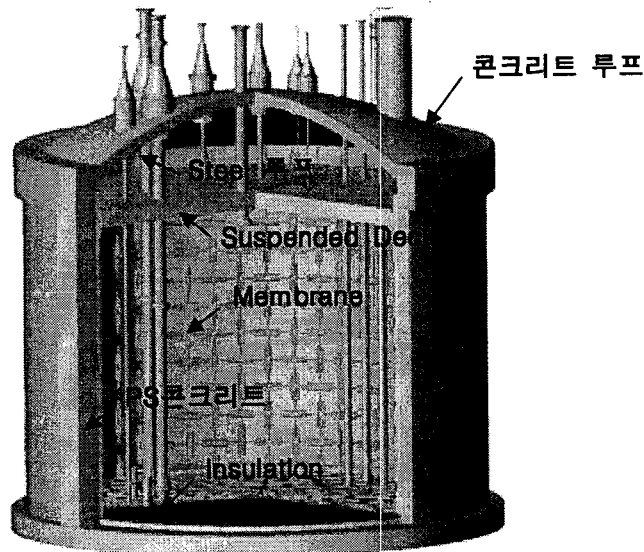
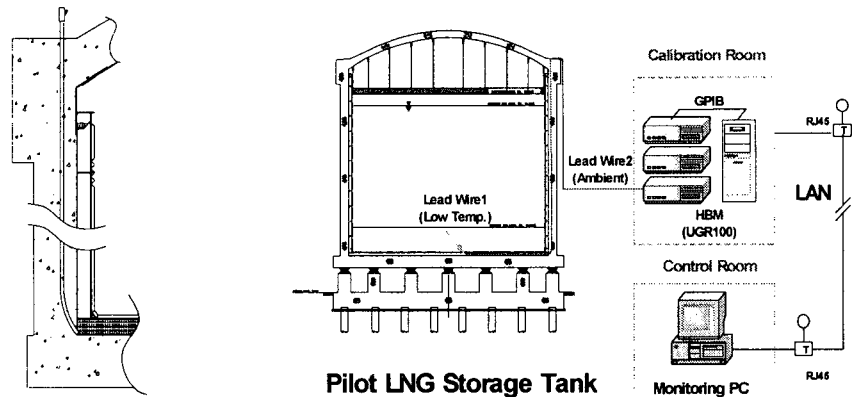


Fig.1 Pilot LNG Storage Tank

2. 멤브레인 변형 측정 시스템 구축

2.1 전기적 스트레인 게이지를 이용한 측정

스트레인 게이지를 이용한 LNG저장탱크 멤브레인 변형률 측정은 LNG 저장에 의한 초저온 환경에서의 겉보기 변형률^(4,5)(Apparent Strain)등에 의한 스트레인 측정의 난이성과 노이즈의 영향을 최소화 하기 위해서는 측정 장비를 LNG 저장탱크에 근접하여 설치하여야 하나 LNG 저장탱크는 산업 기반 시설물로서 안전 관련 법규가 엄격하게 적용 되고 있어 탱크 인근의 모든 시설물 및 장비에 대하여 허가를 획득하여 하는 절차상의 어려움이 있다. 겉보기 변형률을 최소화하기 위하여 STS 재료에 대하여 자기온도보상이 되어있는 스트레인 게이지를 사용하였으며 주변형률을 계산하기 위하여 Rosette 게이지를 그리고 보상 게이지는 1축(single) 게이지를 사용하였으며 측정 립은 최대한 Pilot LNG 저장탱크 인접한 부근에 설치하였다. Pilot LNG 저장탱크에 적용되는 측정 시스템의 개략 도는 Fig.2와 같다. 리드 와이어는 센서에서 단열재까지는 저온 리드와이어를(MM사 3선식-트위스트-테프론 피복), 단열재에서 측정장비까지는 상온 리드와이어(Lapp사- 72선식 실드케이블)를 이용하였으며, 이러한 저온 리드와이어와 상온 리드와이어는 7핀 PCP 커넥터를 이용하여 연결 하였다. 상온 및 저온 와이어 연결부인 커넥터는 단열재 내부에 거치하여 온도의 영향을 받지 않도록 하였으며 저온 리드 와이어는 5~15 m, 상온 리드 와이어는 80m의 길이로 시스템이 구성되었다. 특히 스트레인 게이지는 멤브레인 뒷면 즉 LNG와 직접 접촉하지 않도록 게이지를 설치하였으며 이를 위해 리드 와이어를 Fig.2-a)와 같이 외조 벽체에 STS 파이프를 설치하여 이를 파이프 내로 리드와이어를 탱크내로 인입 하여 게이지와 연결 하였다. 스트레인 측정시 온도의 영향을 제거하기 위해서는 스트레인 게이지를 풀 브리지(Full-Bridge) 구성을 하여야 하나 멤브레인의 변형률 측정이 필요한 측정점이 많으며 또한 리드 와이어의 탱크내 설치에는 일정한 한계가 있어 최소 와이어의 사용을 필요



(a) 상온 리드 와이어 인입용 파이프

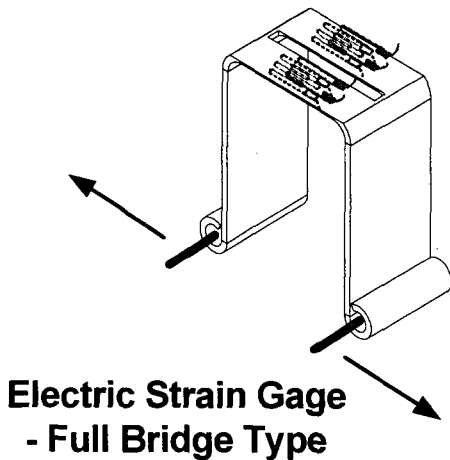
(b) 응력측정 장비 설치도

Fig.2 스트레인 게이지를 이용한 Pilot LNG 저장탱크 내조 멤브레인 변형률 측정

로 하며, 온도 변화에 따른 길보기 변형률을 어느 정도 제거할 수 있는 보상 게이지법에 연결되어 측정하는 정적 측정 방식이다. 측정 장비는 UGR-100(독일:HBM사)을 사용하였으며 Pilot LNG 탱크 인근에 설치된 측정 룰에 측정 장비를 설치하여 연속적인 데이터 측정 및 저장이 가능 하도록 하였으며 이 측정값은 랜연결에 의하여 원거리에서 연속적인 데이터 확인 및 저장이 가능 하도록 하였다. 이러한 방식을 적용하여 Online 실시간 모니터링이 가능 하며 약100포인트에 대한 멤브레인 변형률 값을 측정이 가능 하였다.

2.2 자체제작 Extensometer

스트레인 게이지를 이용한 시스템에서는 보다 많은 포인트 측정을 목표로 하였으며 동시에 경제성을 고려하여 변형 쿼터 브리지 형식을 적용하였다. 이러한 방식은 더미게이지에 의한 온도와 와이어 길이에 의한 노이즈 영향을 최소화 하고자 하였으나 풀 브리지에 비해 정확성이 약간 떨어지는 것으로 나타난다. 이러한 스트레인 게이지 방식을 보완하기 위하여 Fig3 과같이 자체제작 Extensometer를 제작 하였다. Fig.3-(a)와 같이 가공에 의해 제작된 빔 상하면에 4개의 단축 스트레인 게이지를 부착 하여 풀 브리지 회로를 구성하여 완전 보상이 가능하도록 하였다. 이 Extensometer의 특성을 확인하기 위하여 Instron 시험기를 이용하여 변형을 부하하였을때의 변형에 대한 스트레인 값을 Fig. 와 같이 측정하였다. Extensometer는 변형 값을 단계적으로 부하 하였을 때 선형적으로 증가 하는 변형거동 특성을 나타냈다. Extensometer는 멤브레인 주름 내에 용접 고정 되어 설치되며 LNG 저장시 멤브레인 주름 변형 발생시 Extensometer가 연동되어 변형이 발생 하며 이러한 변형에 의하여 나타나는 스트레인 값을 측정 하게 되며 이러한 측정값을 바탕으로 실험실에서 미리 구해놓은 변형률 값에 대입하여



(a) Extensometer 형상



(b) 실제 멤브레인 적용 사례

Fig.3 스트레인 게이지 풀 브리지를 이용한 Extensometer

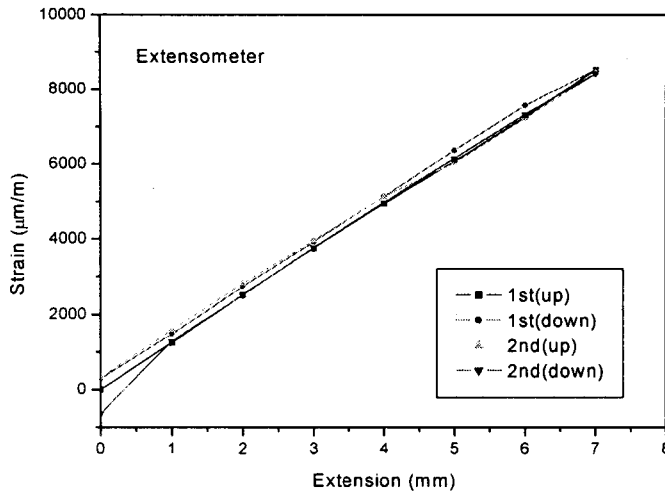


Fig.4 기계적 변형 부하에 따른 Extensometer 변형을 거동

멤브레인 주름의 변형 값을 추산하게 된다. Extensometer의 측정 장비 및 와이어 연결 작업은 스트레인 게이지와 동일한 방식으로 설치하였다.

2.3 기계적 변형 측정 장치

스트레인 게이지와 Extensometer는 전기적 저항에 의한 측정으로 측정 장비에서 게이지까지의 리드와이어 거리가 90m에 이르는 장거리에 의한 노이즈 영향이 발생 한다. 이러한 스트레인 게이지 방식의 단점을 보완하기 위하여 Fig.5 와 같이 Invar를 이용하여 기계적 변형 측정 장치를 멤브레인에 설치하였다. 기계적 변형 측정 장치는 Invar를 이용하여 제작되었으며 주름 양편에 지지대를 설치하였으며 양쪽 지지대는 멤브레인 주름을 가운데 두고 용접 고정 하였으며, 지지대에 연결되는 Bar는 한쪽만 용접 고정 하다. 반대편 지지대의 Bar의 끝단 부는 고정하지 않은 상태에서 테프론 소재의 Stopper를 설치하였다. LNG의 저장에 따른 온도변화가 발생하면 멤브레인 주름부에서 인장 변형이 발생하게 되며 이때 멤브레인에 용접 고정된 지지대 또한 연동되어 변형 거동이 발생 하게 된다. 이러한 변형이 발생하게 됨에 따라 Stopper 또한 위치가 변하게 된다. LNG를 완전 방출 되어 탱크 내부의 온도가 상온 상태로 되었을 때에는 멤브레인 주름 변형이 제거되었을 때 측정기 또한 멤브레인과 연동되어 원래의 위치로 돌아오나 Stopper의 경우 온도에 의한 변형 발생 위치에 그대로 위치하게 된다. 탱크를 개방 하여 내부를 조사 관찰 시에 이러한 Stopper 위치의 변화를 측정 하여 멤브레인 주름부에서 최대 변형 값을 측정이 가능 하게 된다.

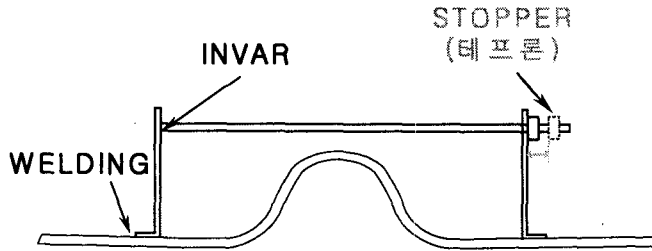


Fig.5 Invar를 이용한 기계적 변형 측정 장비 구성도

이러한 측정 방식의 장점은 스트레인 게이지 방식과 달리 노이즈 영향과 주위 환경에 의한 영향을 받지 않는 상태에서 변형 값을 측정 할 수 있다. 그러나 실시간 측정이 불가능 하여 LNG 주입 전후 상황에 대한 변형 값을 측정 할 수 있으며 또한 정밀한 측정이 불가능한 단점이 있다.

3. 결론

KOGAS 멤브레인을 사용하여 내조를 구성한 Pilot LNG 저장탱크를 이용하여 멤브레인의 성능평가 및 대용량 탱크 설계시 기본 데이터 활용을 위하여 멤브레인 변형을 측정 하고자 하였다. 스트레인 게이지, 자체제작 Extensometer 그리고 기계적 측정 장치를 설치 하여 상호 측정 데이터를 비교 분석을 통한 신뢰성을 높이고자 하였다. 스트레인 게이지 및 Extensometer 방식은 전기저항식 스트레인 게이지를 이용하여 시스템을 구축 하였으며 실시간 Online Monitoring이 가능 하도록 하였으며 기계적 변형 측정 장치는 멤브레인에 용접 고정 되어 멤브레인의 변형과 연동되어 이때 발생하는 변형이 Stopper의 변형으로 나타나는 것을 측정 하는 방식을 적용하는 것이다. 이러한 세 가지 방식에 의한 측정 시스템을 구축하여 멤브레인의 변형 값을 실험적으로 측정이 가능 하도록 하였다.

참고문헌

1. 오병택, 김영균, 윤인수, 서홍석, 홍성호, "LNG 저장탱크용 Kogas 멤브레인 개발", 대한 기계학회논문집 A권, 제26권 제6호, pp1203~1208, 2002
2. Japan Gas Association Committee, "Recommended Practice for LNG Inground
3. LNG地上式貯槽内部觀察技術の開発, Mitsubishi Heavy Industry, 1996
4. 주진원, 김갑순, 1992, "극저온 환경에서 스트레인 게이지의 결보기 변형을 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권, 제6호, pp.1099~1107
5. 김갑순, 주진원 1993, "극저온 환경에서 스트레인 게이지의 게이지 상수 및 변형을 측정에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp. 2205~2213