

## 멤브레인식 LNG저장탱크 응력측정법

김영균\* · 홍성호\* · 윤인수\* · 오병택\* · 서흥석\*

### The Stress Measurement of Membrane Type LNG Storage Tank

Y.K. Kim, S.H. Hong, I.S. Yoon, B.T. Oh, H.S. Seo

**Key Words:** LNG Storage Tank, Strain Gage, Temperature Sensor, Membrane

#### Abstract

In LNG Tank, it is very important to measure the strain in Membrane by theoretical and experimental stress analysis. In this paper, perform the test about strain gage, thermal sensor and lead wire to make clear the properties. The test results conclude that stress measurement by strain gage must consider the effect of many factors to measure strain accurately. The corrections should be made on apparent strain, lead wire length and Membrane shape. It is also important to measure the temperatures accurately at the strain gage location

#### 1. 서 론

LNG저장탱크에 사용되는 내조는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나누어지며 저장탱크의 지하식 대용량화에 따라 멤브레인 형식이 많이 건설되고 있다. 멤브레인은 주름을 가지고 있는 두께 1.2~2mm의 판으로 LNG 저장에 의한 열변형을 이 주름 부에서의 신축적인 작용으로 흡수하는 구조로서 LNG탱크 및 LNG선박에서 사용되고 있다. 멤브레인은 각 회사별로 고유의 형상을 갖는 모델에 대한 특허권을 보유하고 있으며 한국가스공사에서도 1997년도에 프랑스 국제특허를 획득하였으며 현재에도 독자모델에 대한 수정작업을 진행 중에 있다. 멤브레인 구조는 평판 부위에서는 열변형이 거의 발생하지 않고 주름부위에서 항복강도를 초과하는 고변형률이 발생하도록 디자인 한 것으로 LNG 저장탱크의 운전에 따

른 액위 변화에 의해 멤브레인 주름부는 압력 과 온도의 변화에 따른 수축변형이 반복적으로 부하된다. 따라서 실제 운전조건에 따라 발생하는 멤브레인 주름부위의 변형률 변화를 정확하게 측정한다면 추후 대용량 LNG저장탱크 설계 적용에 필요한 데이터를 확보할 수 있을 것이다. 저온 영역에서의 스트레인 게이지 특성에 관한 연구는 온도변화에 따른 스트레인 게이지 자체의 기본특성에 대한 연구[1,2] 또는 기본적 응용[3,4]에 한정되었다. 본 연구에서는 스트레인 게이지를 이용한 LNG 탱크 멤브레인 측정시 발생 할 수 있는 문제점을 파악하여 정확한 측정 방법을 확립하기 위해 실시된 것이다. 이번에 실시한 각종 특성 확인 시험에서는 시험 수행을 용이하게 하기 위하여 액화질소(LN<sub>2</sub>)를 사용하였으며 이에 따른 액화천연가스(LNG)특유의 화학적 특성에 따른 결과의 차이에 대해서는 고려하지 않았다.

#### 2. 실험방법

##### 2.1 시험재료

시험 재료는 멤브레인식 LNG 저장탱크에 주로

\* 한국가스공사 연구개발원

사용되는 SUS304를 사용하였으며 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table1 Chemical composition of the material (wt.%)

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
SUS304	0.05	1.2	0.021	0.008	0.41	18.02	8.6

## 2.2 온도센서

저온 영역에서는 온도에 따라 스트레인게이지의 걸보기 변형률이 다른 값을 가지므로 온도센서를 스트레인 게이지 근방에 부착하여 측정부위의 정확한 온도측정이 필요하다. 본 시험에 사용된 온도 측정 센서는(MM사 ETG-50B) 온도변화에 따라 발생하는 저항의 변화를 전용 네트워크(MM사 LSC-100C-350C)에 연결하여 일반의 스트레인 게이지 측정 장비에서 측정 및 출력이 가능하도록 한 방식이다. 온도센서의 초기 온도 0점 조정은 증류수와 얼음이 담긴 용기에 10분간 유기한후 이 때의 온도를 0° C로 세팅하였으며 챔버(INSTRON사)를 이용한 실험에서는 챔버의 온도와 온도 센서의 온도의 변화를 서로 비교하여 정확한 온도측정이 되도록 하였다.

## 2.3 Strain Gage

시험에 사용된 스트레인 게이지는 미국 MM사의 저온용 스트레인 게이지인 WK 시리즈이며 게이지 길이는 3mm, 6mm를 사용하였다. 리드 와이어는 저온용 와이어 (MM사 모델명 : 330FJT) 를 사용하였으며 온도 센서 및 스트레인 게이지의 접착은 M-Bond 610을 사용하였다. 모든 센서는 부착후 M-CoatB를 표면에 도포하여 게이지 표면을 보호하였다. 스트레인 및 온도 측정에 사용된 장비는 독일 HBM사의 MGC-Plus이며, 시험 편과 동일한 재료의 시험편에 추가 스트레인 게이지를 부착하는 더미 게이지법에 의한 Half - Bridge 회로로 구성하였다.

# 3. 실험결과 및 고찰

## 3.1 온도센서 특성 시험

온도센서는 정확한 온도 측정을 위하여 스트레

인 게이지 부근에 부착되므로, 기계적 변형이 부하 되는 상태에서 온도측정이 이루어져 기계적 변형 부하에 의한 영향의 확인이 필요하다. 기계적 부하에 따른 온도 변화를 Fig.1에 나타내었다.

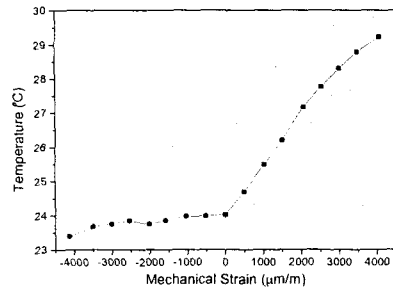


Fig.1 Influence of Mechanical Strain on Temperature Sensor

결과와 같이 인장 스트레인의 증가에 따라 5~6° C정도의 온도변화가 나타나 고변형이 발생하는 부위에서의 온도측정을 위해서는 보정값이 필요함을 알 수 있다.

## 3.2 무부하 냉각 시험

온도변화에 따른 스트레인 게이지의 걸보기 변형률을 구하기 위한 첫 번째 방법으로 게이지가 부착된 시험편에 LN<sub>2</sub>를 주입하여 온도변화에 따른 걸보기 변형률의 변화와 급격한 온도 변화시 발생하는 열적 충격에 대한 반응을 살펴보았다.

Fig.2, 3에서는 3mm 6mm 게이지의 시험 결과를 나타내었다. 측정된 걸보기 변형률 값은 제작사의 제시 값에 가까운 결과를 얻었으며 LN<sub>2</sub> 주입에 따른 열적 충격에 의한 이상 현상은 발생하지 않았다.

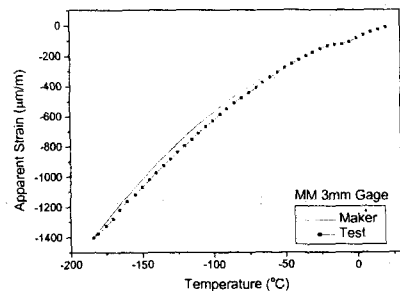


Fig.2 Apparent Strain dependence of temperature (Submerged in LN<sub>2</sub>)

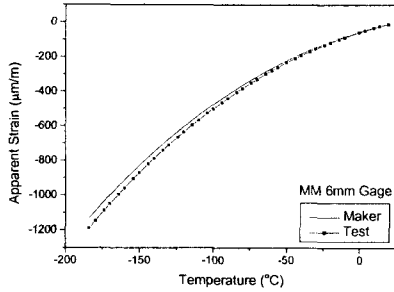


Fig. 3 Apparent Strain dependence of temperature (Submerged in LN<sub>2</sub>)

Fig. 4, 5는 챔버를 이용하여 게이지의 온도를 LNG 온도(-162 °C)까지 변화시켰을 때의 결보기 변형률 거동을 나타내었다. 결과에서 보이는 바와같이 안정적인 경향으로 나타났다.

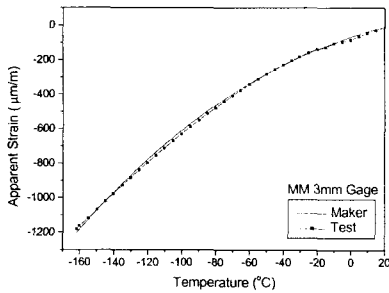


Fig.4 Apparent Strain dependence of temperature

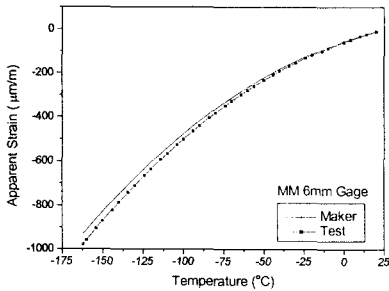


Fig.5 Apparent Strain dependence of temperature

### 3.3 리드 와이어에 의한 영향

LNG탱크 응력측정시에는 센서 설치 부위와 측정 장비까지 연결되는 리드 와이어가 길어지게 되며

특히 와이어의 상당부분이 탱크내의 저온 환경에서 장시간 거치 되게 되어 와이어 자체의 저항 변화가 발생하여 이 값이 스트레인 측정값으로 나타나므로 이를 고려하여 결과 값을 보정해야 한다. 이러한 와이어의 온도변화에 따른 영향을 보기 위해서 액체질소 챔버를 사용하여 무부하 시험에 사용된 리드 와이어의 길이에 6m를 추가한 와이어를 챔버내에 거치 한 상태에서의 온도 변화에 따른 온도센서의 거동은 Fig.6에 스트레인 게이지의 측정 결과는 Fig. 7, 8에 나타내었다. 온도센서에서는 기존의 와이어에 의한 측정 온도 값이 챔버의 온도 값과 같은 값을 나타내었으나, 추가 와이어에 의한 영향으로 약 11 °C 정도의 값의 차이가 나타났으며, 스트레인 게이지 또한 와이어에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타나 실제 LNG탱크의 경우 정확한 측정을 위해서는 와이어에 의한 영향을 고려해야 한다.

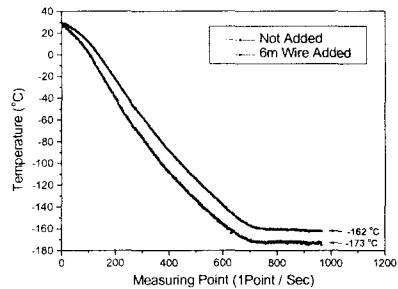


Fig. 6 Influence of Lead Wire on Temperature Sensor

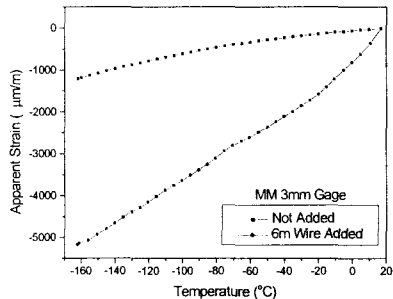


Fig. 7 Influence of Lead Wire on Strain Gage

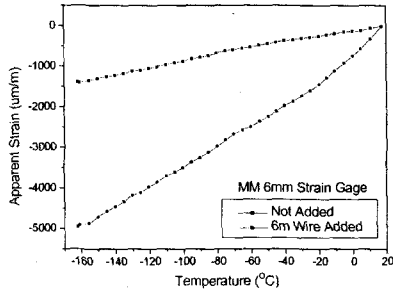


Fig. 8 Influence of Lead Wire on Strain Gage

### 3.4 멤브레인 형상의 표면 곡률 영향

멤브레인은 평면 시험편과는 달리 형상을 가지고 있으며 특히 이 부위에서 변형거동이 집중하게 되므로 이 부분에 대한 정확한 결보기 변형률 측정이 필요하다. 형상을 갖는 부위에서 스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정이 시행될 때에는 형상 부에 부착된 스트레인게이지의 감지선이 게이지의 판 재료와 접촉재 두께에 의하여 시험편 보다 높게 위치되어 이러한 조건에 의해 결보기 변형률 값이 평판재료의 값과 다르게 된다. Fig. 9은 곡률(Radius=15)을 갖는 시험편의 볼록한 부위(Convex Curvature)에 부착된 게이지와 평면 시험편에 부착된 게이지가 LN<sub>2</sub> 액체에 완전히 잠긴 상태에서의 변형률을 2차례에 걸쳐 측정된 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 결과에서와 같이 형상에 의한 영향으로 스트레인 값이 증가하는 경향으로 나타나고 있어 형상을 갖는 부분에 대한 온도변화에 따른 정확한 결보기 변형률 측정이 필요하다.

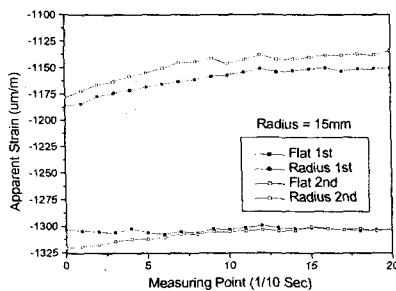


Fig. 9 Influence of Curvature on Apparent Strain

### 3.5 피로수명

멤브레인에 요구되는 피로수명은 LNG탱크 운전 에 따른 탱크 내부 액위 변화에 따라 발생하는 온도 및 압력 변화에 의해 부하 하는 반복 사이클에 대한 피로수명 확인이 필요하며 Table2와 같이 정해져 있다.[5]

Table 2 Conditions for Fatigue Strength Analysis

반복하중		스트레인	사이클 수
액압	$\Delta P=2.15$ kg/cm <sup>2</sup> G	$\Delta \epsilon_1$	$n_1 = 2,600$
열 하중	$\Delta T=90$ °C	$\Delta \epsilon_2$	$n_2 = 2,600$
열 하중	$\Delta T=190$ °C	$\Delta \epsilon_3$	$n_3 = 25$

스트레인 게이지는 멤브레인에서 최대로 예상되는 스트레인에 해당하는 조건에서 규정된 반복 사이클에 대한 피로 시험을 수행하여 스트레인 게이지 자체의 피로수명의 확인이 필요하다. 또한 이러한 피로시험을 통하여 동시에 접촉재의 반복 변형률 부하에 대한 내구성 및 피로수명확인이 필요하다.

## 4. 결론

스트레인 게이지를 사용한 멤브레인식 LNG 저장탱크 응력 측정을 위한 각종 센서 및 리드와이어에 대한 시험을 하여 검토한 결과 실험실에서 실시결과를 직접 적용 할 때에는 여러 가지 요인을 고려해야한다.

(1) LN<sub>2</sub>의 주입에 의한 급격한 온도 변화시 그리고 챔버를 이용한 일정한 온도 변화 시험 모두 온도변화에 대한 결보기 변형률의 거동이 안정적으로 나타났다

(2) 전기 저항식 온도센서의 경우 기계적 스트레인 부하에 따라 측정값의 변화가 나타났다.

(3) 온도 및 스트레인 측정시 와이어의 환경적 요인에 의한 영향을 받으므로 이에 대한 보정값이 필요하다.

(4) 스트레인 게이지는 형상에 따라 길보기 변형률 값이 변화하므로, 멤브레인 형상부의 길보기 변형률값을 구하여야 한다.

(5) 스트레인 게이지는 예상되는 변형률 범위에서 규정된 LNG 탱크 운전 기간 대한 피로수명을 가져야한다

### 참고문헌

- (1) 주진원, 김갑순, 1992. “극저온 환경에서의 스트레인 게이지의 길보기 변형률 특성에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 제16권 제6호, pp. 1099~1107
- (2) 주진원, 김갑순, 1993. “극저온 환경에서 스트레인 게이지의 게이지 상수 및 변형률 측정에 관한 연구,” 대한기계학회논문집 제17권 제9호, pp.2205~2213
- (3)1984, "Strain Gage Thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature," Measurement Group Tech Note TN-504-1
- (4) H. Arai, K. Suzuki, 1975, “低溫應力計測法”, 日本海士協會會誌, No.152, pp. 65~78
- (5) Japan Gas Association Committee, 1979, "Recommended Practice for LNG Inground Storage"