

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

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 (II)

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

Abstract

Korea Gas Corp. has developed the design technology of the LNG storage tank. The membrane to be applied inside of LNG storage tank is provided with corrugations to absorb thermal contraction and expansion caused by LNG temperature. We constructed strain measurement system by using strain gage. In this paper, some problems which should be considered when measuring strain at -162°C , are discussed by presenting test results on the characteristics of strain gages, Temperature sensor, adhesive and lead wire. And presenting the procedure of the constructing strain measurement system.

1. 서론

기계나 구조물은 하중이나 열등 외부로부터의 조건이 변화하게 되면 변형을 하며 이와같은 변형을 정확하게 측정 하기 위하여 가장 널리 쓰이는 센서가 스트레인 게이지이다. 스트레인 게이지는 일정한 저항을 가지고 있는 저항체로서 약 1~5V의 전압을 부하하여 저항을 변화를 측정하여 이를 변형률 값으로 환산하여 출력하는 방식으로, 사용이 편리하며 다른 변형률 측정법에 비해 경제적이어서 여러 분야에 적용되고 있다. 멤브레인은 STS304 재료를 이용하여 프레스 가공을 통해 일정한 주름을 갖도록 하여 제작된 것으로 RPIS[1]에서는 각 주름부의 변형 거동의 안정성과 피로 강도의 확인을 규정화 하고 있으며, 이러한 평가를 하중부하에 따른 각 주름부의 스트레인을 측정하여 평가 하도록 규정하고 있어, 각 멤브레인 제작사에서도[2~4] 멤브레인 평가 시에 응력 집중 예상부에 스트레인 게이지를 부착 하여 변형률을 측정 하여 평가하고 있다. 한국가스공사에서는 1996년 LNG저장탱크 국산화 프로젝트가 시행되어 멤브레인 모델의 개발 및 유한요소해석에[5] 의한 제작이 이루어 졌으며 멤브레인 성능 평가를 위하여 응력 집중 예상부에 스트레인 게이지를 부착 하여 변형률 측정에 의한 실험적 방법으로 수행되었다. 이러한 멤브레인 개발 국산화 프로젝트의 결과물로 1,000m³ 용량의 Pilot LNG 저장탱크를 설계하여 2001년 완공되어 현재까지 운전이 계속되고 있다.

[†] kyk@kogas.re.kr

Pilot LNG 저장탱크를 이용하여 멤브레인 분야에서는 성능 확인을 통한 대용량 저장탱크에 적용에 대한 신뢰성을 확보하는 것을 목표로 하고 있다. 멤브레인은 단위 유닛의 변형 보다는 각각의 단위 유닛의 용접 결합 그리고 바닥 멤브레인과 벽체 멤브레인을 연결하는 코너 멤브레인의 결합을 통한 완전한 하나의 압력 용기를 구성하는 구조를 가지며 용접 연결에 의한 변형 거동의 연동성을 가지고 있어 Pilot LNG 저장탱크 내부의 멤브레인 변형 거동 측정이 필요하다. 이를 위하여 Pilot LNG 저장탱크 내부에 설치될 멤브레인에 스트레인 게이지를 설치하여 여러 부위에 대한 연속적인 변형률을 측정할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 스트레인 게이지는 저항의 변화를 스트레인으로 변환하여 출력하는 방식으로 온도 변화가 발생할 경우 이러한 온도 변화로 인한 저항 변화가 크게 나타나 스트레인 값 측정의 정확성확보가 힘들어 -162°C 환경에서도 정확한 측정이 이루어질 수 있도록 스트레인 게이지, 리드와이어, 본드 및 코팅재의 선택 그리고 장거리 측정에 따른 문제점에 대하여 연구하였다.

2. 저온 환경에서의 스트레인 게이지 적용

2.1 측정 센서

저온 환경에서는 하중에 의한 영향 보다는 온도에 의한 영향이 스트레인 게이지 변화에 주요한 요인으로 작용하여[6~7] 이러한 온도 영향에 의해 나타나는 변형률은 겉보기 변형률 (Apparent Strain) 이라 하며, 이러한 겉보기 변형률의 영향을 최소화하기 위하여 STS 재료에 대하여 자기 온도보상 (Self Temperature Compensate)이 되어있는 스트레인 게이지를 사용하게 된다. 그러나 자기온도 보상 게이지를 사용하였어도 LNG온도 환경에서는 겉보기 변형률이 크게 나타나므로 더미게이지법에 의한 온도 보상을 해주어야 한다. 스트레인 게이지 형식은 주변형률을 계산하기 위하여 Rosette 타입의 게이지를 그리고 보상 게이지는 1축(Single) 게이지를 선택하였다. 온도센서는 온도변화에 대한 응답성과 안정성을 고려하여 스트레인 게이지 방식의 전기저항식 온도 센서인(MM사, 모델명:LSC-100C-350)를 사용하여 스트레인 측정 장비에서 온도 데이터를 획득할 수 있도록 하였다. 센서 접착은 저온용 접착제 (MM사, 모델명: AE-10)를 코팅재는 M-Coat B를 사용하였다.

2.2 겉보기 변형률

이러한 겉보기 변형률은 온도변화에 의한 스트레인 게이지 선의 수축/팽창 그리고 측정 재료의 수축/팽창이 발생하며 각각의 수축/팽창의 차이에 의하여 겉보기 변형률로 나타나게 된다. 멤브레인 재료에 대한 겉보기 변형률을 측정하였다. 실험 조건은 멤브레인 제작에 사용된 STS304 시험편에 스트레인 게이지를 부착하여 INSTRON사 챔버에 넣은 후 LN_2 를 주입하여 온도 변화에 따른 겉보기 변형률을 측정하였다. 시험에 사용된 게이지는 Table 1과 같으며 게이지 길이에 의한 겉보기 변형률에 대한

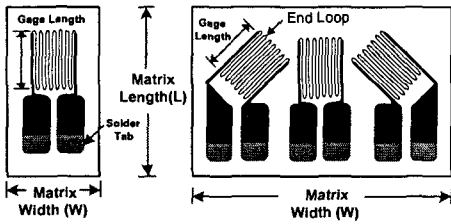


Fig. 1 Strain Gage Configurations
(a) Single Gage (b) Rosette Gage

Table 1 Strain Gage Specification

No.	Model	Type	Gage Length	Matrix Size(L×W)
1	WK-062-RB	Rosette	1.57	10.7×11.7
2	WK-125-RA	Rosette	3.18	9.9×11.7
3	WK-250-RA	Rosette	6.35	19.8×23.6
4	WK-062-AP	Single	1.57	6.6×4.1

*MM STC No. = 09 (STS Option)

Strain Gage Resistance = 350Ω

Unit : mm

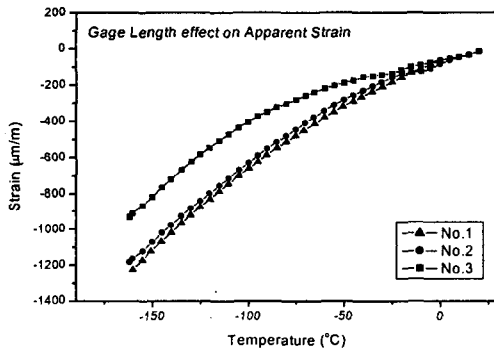


Fig. 2 The Gage Length effect on Apparent Strain

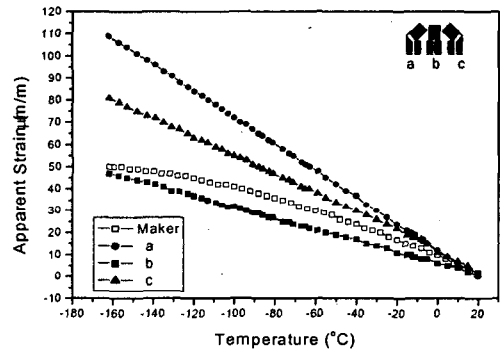


Fig. 3 The Apparent Strain when compensated by Single Gage

비교 결과를 Fig.2에, Rosette Type 게이지와 Single Type 게이지를 비교한 결과는 Fig.3에 나타냈다. 측정값은 3개의 시험편에 부착된 게이지에서 측정된 값을 평균을 내었다. 실험 결과 No.1과 2 게이지의 결보기 변형률 값이 크게 나타났으며 상대적으로 No.3은 작게 나타났다. 이러한 현상은 스트레인 게이지의 게이지 선의 길이가 짧을수록 열적 질량(thermal mass)이 감소되고, 또한 게이지 선에서 차지하는 End Loop의 비중이 커져 온도 변화에 의한 결보기 변형률 값이 커지는 것으로 나타났다. Rosette의 경우 게이지 Matrix 소재와 게이지 선의 방향이 서로 상이 하여 세 개의 게이지에서 측정된 결보기 변형률이 동일하게 나타나지 않았다. 일반적인 저온 환경에서의 스트레인 측정은 온도변화가 이루어진 이후에 0점 조정후 하중을 부하 하여 스트레인 측정하는 방식이 적용하고 있으나, LNG 저장탱크 멤브레인은 온도 변화에 따른 열 하중 부하에 의한 변형을 측정 하여야 하며 이때 온도 변화에 의한 결보기 변형률을 제거 하여야 한다. Full Bridge 방식을 적용하여 측정 하는 것이 정확하나 LNG 저장탱크와 같이 대형 구조물에서 다채널을 측정 시엔 하나의 보상 게이지로 여러 게이지를 보상

하는 방식으로 측정 하는 것이 경제적이다. 이러한 방식으로 Rosette 형식 스트레인 게이지를 1축 스트레인 게이지로 보상한 방식에서의 온도변화에 따른 결보기 변형률을 측정 한 결과와 메이커에서 제시하는 결보기 변형률 값을 이용하여 구한 값과 비교 하여 Fig.3에 나타냈다. 1축 게이지와 게이지 선의 방향이 같은 b에서 최소 값을 나타냈 으며 a, c 방향에서 크게 나타났다. 이러한 실험을 통해 같은 게이지 길이를 갖는 1축 스트레인 게이지를 이용하여 Rosette Type 게이지를 보상을 하였을 때에도 오차가 약 간 발생 하며 실제 적용 하여 스트레인을 측정 할 때 이에 대한 보정이 필요하다.

3. Pilot LNG 저장탱크 스트레인 측정 시스템

3.1 스트레인 게이지 부착

스트레인 게이지는 기 수행 유한요소 해석 결과를 기본으로 하여 측정 점을 결정 하였으며 측정 점은 Rosette Type 게이지 90개 총 270채널과 온도채널 30채널로 총 300 채널을 구성 하였다. 게이지 접착은 저온용 접착제인 AE-10 (MM사)을 이용하였으며 저온용 납을 (M-Line Solder) 이용한 납땜을 통해 게이지와 와이어를 터미널을 구성하여 연결하였다. 이렇게 구성된 게이지와 납땜 부를 코팅제 (M-CoatB)를 이용하여 충분히 도포하여 외부 충격 및 습기를 방지하도록 하였다. 보상용 게이지는 멤브레인과 동일한 재료로 만든 사각 판에 (20mm×50mm) 부착한 후 이 판을 측정 게이지 부근에 한쪽 부분만 용접 고정 하여 기계적 하중을 받지 않도록 하고 멤브레인과 동일한 온도 조건에 있도록 하였다. Fig.5는 스트레인 게이지가 멤브레인에 설치된 모습이다.

3.2 리드 와이어 구성

리드 와이어는 환경 조건에 따라 상온과 저온 와이어를 조합 하여 구성 하였다. 실제 LNG를 저장하는 멤브레인에서 단열재를 거쳐 콘크리트 외조까지는 저온 리드 와이어를 사용하였다. 저온 와이어는 3선식 트위스트 케이블로 테프론 피복소재로 되어 저온에 의한 크랙 발생을 방지한 제품이며(MM사 모델명 : 330FTE) 길이는 5m~15m으로

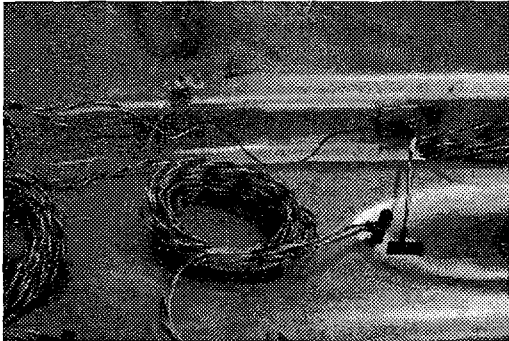


Fig. 4 The Installed Strain Gage with Low-Temperature Lead Wire



Fig. 5 The Photo of Ambient Lead Wire



Fig. 6 The inserted Ambient



Fig. 7 The Connector of Ambient and Low-Temperature Lead Wire

구성되었다. 특히 저온 리드 와이어를 단열재 틈에 넣은 후 글라스 울 (Glass wool)로 채워넣어 저온 환경에 노출되지 않도록 하였다. LNG 탱크의 외조 벽체 내에 STS 재질의 파이프를 설치하여 이 파이프 내로 상온 리드와이어를 인입 하였으며 이 와이어 (Lapp사- 72선식 실드케이블)를 이용 하여 탱크 내 벽체에서 측정 장비까지 80m 길이로 구성 하였다. 이렇게 설치한 저온 리드와이어와 상온 리드와이어는 7핀 PCP 커넥터를 이용하여 연결 하였다.

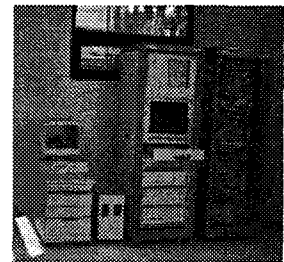
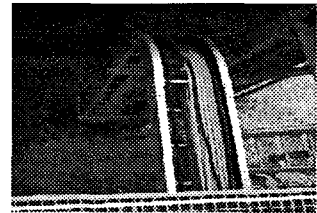
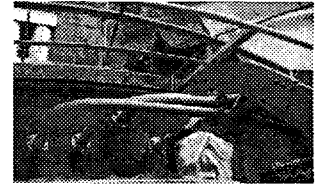
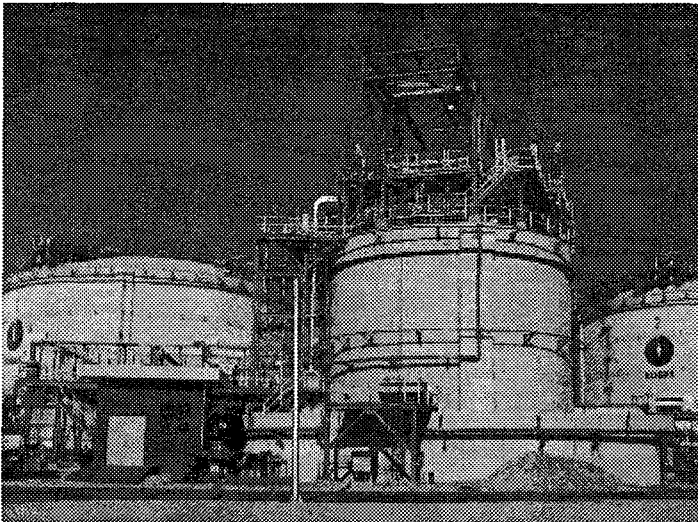


Fig. 8 The Photo of Strain Measurement System by using Strain Gage

3.3 Pilot LNG 저장탱크 스트레인 측정 시스템

실제 건설되어 완공된 모습과 상온 와이어가 벽체로 인입되는 부분 그리고 응력 측정 장비가 설치된 모습을 Fig. 9에 모두 나타냈다. 측정 장비는 UGR-100(독일:HBM사)을 사용하였으며 Pilot LNG 탱크 방화벽에 근접하여 건설된 측정 룸내에 측정 장비를 설치하여 연속 적인 데이터 측정 및 저장이 가능 하도록 하였으며 이 측정값은 랜연결에 의하여 원거리에서 연속적인 데이터 확인 및 저장이 가능 하도록 하였다.

4. 결론

KOGAS 멤브레인을 사용하여 내조를 구성한 Pilot LNG 저장탱크를 이용하여 멤브레인의 성능평가 및 대용량 탱크 설계시 필요한 기본 데이터를 확보하기 위하여 멤브레인 변형을 실시간 Online Monitoring이 가능 하도록 할 수 있는 응력 측정 시스템을 개발 하였다. 정확한 측정을 위하여 저온 환경에서 고려해야할 스트레인 게이지의 걸보기 변형률 및 더미 게이지법에 의한 측정시 고려해야 할 조건을 실험을 통한 상호 측정 데이터를 비교 분석을 하여 측정되는 결과의 신뢰성을 높이고자 하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 실제 Pilot LNG 저장탱크에 스트레인 게이지를 설치하여 응력 측정 시스템을 구축 하였다.

참고문헌

- [1] Japan Gas Association Committee, "Recommended Practice for LNG Inground
- [2] 한국가스공사 인천생산기지 기술제의서, 일본 MHI사
- [3] 한국가스공사 인천생산기지 기술제의서, 일본 KHI사
- [4] 한국가스공사 인천생산기지 기술제의서, 일본 IHI사
- [5] 오병택, 김영균,윤인수,서홍석,홍성호, "LNG저장탱크용 Kogas 멤브레인 개발", 대한기계학회논문집A권, 제26권 제6호, pp1203~1208, 2002
- [6] 주진원,김갑순, 1992, "극저온 환경에서 스트레인 게이지의 걸보기 변형률 특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제16권,제6호,pp.1099~1107
- [7] 김갑순,주진원 1993, "극저온 환경에서 스트레인 게이지의 게이지 상수 및 변형률 측정에 관한 연구,"대한기계학회논문집, 제17권,제9호,pp. 2205~2213