

## Pilot LNG저장탱크의 모드 형상 파악을 위한 동특성 실험

† 이 강 원 · 김 영 균 · 홍 성 호 · 김 지 훈

한국가스공사 연구개발원

(2003년 7월 4일 접수, 2003년 8월 27일 채택)

### Dynamic Experiment for Mode Shape of Pilot LNG Storage Tank

Kangwon Lee · Seongho Hong · Young Kyun Kim and Ji Hoon Kim

Kogas R&D Center

(Received 4 July 2003 ; Accepted 27 August 2003)

#### 요 약

한국에서의 LNG에 대한 수요는 처음 수입된 1986년 이후로 크게 증가 하고 있다. 따라서 LNG 소비에 맞추어 LNG 저장탱크의 확충이 요구 된다. 그러나 LNG 저장 설비에 대한 설계, 건설 그리고 분석 분야에서는 유체-구조의 상호 작용과 LNG의 저온 특성 때문에 고정도의 선진 기술이 요구된다. 최근 한국가스공사에서는 Pilot LNG 저장탱크를 건설 하였으며 실제 운전을 통한 핵심 기술을 개발 하여 축적 하고 있다. 한 부분의 연구로서 기초 동특성 시험을 실시하였다. 본 연구에서는 동특성 실험을 수행하였으며, Pilot LNG 저장탱크에 대한 동특성을 검증 및 분석 하였다.

**Abstract** - The demand of LNG in Korea has dramatically increased since it was first imported in 1986. Thus, more LNG storage tanks are required to meet the growing consumption of LNG. However the design, construction, and analysis of LNG storage facility need highly advanced technology compared to the general structures due to the fluid-structure interaction and the low temperature of LNG. Recently Korea Gas Corporation(KOGAS) constructed a pilot LNG storage tank, and it is in operation to develop and accumulate the core technology. As a part of those objects, the fundamental dynamic test for the pilot tank were performed. For this study, dynamic test were carried out and the dynamic characteristics of the pilot tank were verified and analyzed.

**Key words** : LNG storage tank, Dynamic Characteristics, Fluid-Structure Interaction, Impact load

#### 1. 서 론

1986년 제2차 석유판동이후 탈석유정책의 일환으로 도입하기 시작한 청정에너지인 LNG (Liquefied Natural Gas)는 급격한 소비 증가를 보이고 있다. 이에 따라 저장탱크의 증설이 계속되고 있으나 최근까지 대부분의 설계가 선진 외국기술에 의존해 왔다. LNG 저장탱크는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온액체를 저장해야

하고 만일 LNG가 유출될 경우에는 엄청난 재앙을 초래할수 가 있으므로 설계 및 시공은 특수한 기술을 요하고 있다.

한국가스공사 연구개발원에서는 국내최초로 LNG 저장탱크 설계기술을 확보하고 저장탱크에 쓰이는 단열재 및 멤브레인 등의 소재를 개발하였다. 국산화된 소재와 설계기술을 적용하여 2001년 12월 실험용 저장탱크인 pilot LNG 저장탱크를 완공하고 현재 정상운

전 중에 있다. 이 pilot 탱크의 운전기간 동안 각종 실험을 수행하여 향후 설계 합리화 및 탱크의 수명연장을 위한 기본 데이터로 활용할 예정이다. 본 논문에서는 저장탱크의 설계 및 해석에 중요한 역할을 하는 동적해석 수행에 필요한 저장탱크의 고유진동수와 모드 형상과 같은 동적특성을 파악하기 위해 현장 시험을 실시하였으며 이를 해석결과와 비교하였다.

## 2. 동특성 실험

### 2.1. Pilot LNG저장탱크 제원

실험대상인 파이롯트 LNG저장탱크는 한국 가스공사의 인천 LNG생산기지 내에 건설되었으며, 멤브레인 내조와 단열재 그리고 프리스트레스트 콘크리트 외조로 구성되어 있다. 저장탱크는 매트기초위에 설치된 37개의 pedestal위에 놓여지고 저장탱크와 pedestal 사이에는 지진발생시에 지진력을 흡수하기 위한 지진격리장치(isolation pad)가 설치되었다. 저장탱크의 내조 반경은 6.88m이고 콘크리트 외조의 내부반경은 7.09m로, 내조와 외조 사이에 21cm두께의 단열재가 있으며 외조벽체의 두께는 60cm, 바닥슬래브 두께는 70cm이다. 저장탱크의 모습과 자세한 제원을 Fig.1에 나타내었다.

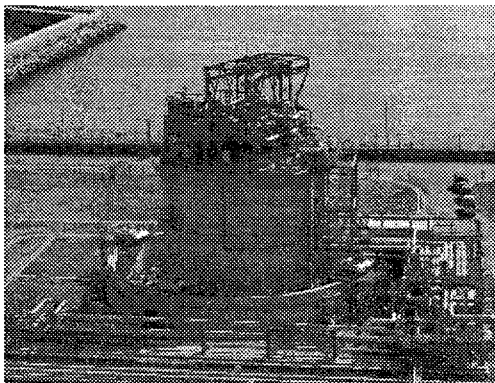


Fig. 1 Overview of Pilot LNG Tank.

### 2.2. 실험장비

본 실험에 사용된 장비는 저장탱크에 충격

Table 1. Specification of Impulse Hammer.

Sensitivity	0.94mV / lbf
Force Range	0 - 5000 lbf
Head Mass	12.1 lbf (5.5kg)
Freq. Range	Hard Tip - 750 Hz Medium Tip - 650 Hz Soft Tip - 350 Hz Super Soft Tip - 250 Hz

하중을 가하기 위해 사용된 충격해머, 가속도응답을 측정하는 가속도센서와 FFT analyzer가 사용되었다. 사용된 충격해머는 PCB사의 Model 086D50 Sledge Impulse Hammer이며 해머에 장착된 로드셀의 허용 가능한 최대충격은 5000Lb(약2.3톤)이고 감도는 lbf당 1mV이다. Table 1에 PCB Impulse Hammer의 주요제원을 나타내었다. 충격하중에 의한 응답을 측정하기 위하여 사용된 가속도계는 같은 PCB사의 Model 393A03 Seismic Accelerometer로  $\pm 5g$ 의 범위에 g당 1000mV의 감도를 가지며 주파수 응답범위는 0.5Hz에서 2000Hz ( $\pm 5\%$ )사이이다. Fig.2는 설치된 가속계의 모습을 나타낸다. 가속도계로부터 발생하는 아날로그 신호는 FFT Analyzer를 이용하여 실시간으로 FFT 연산 처리하여 저장하였다. 여기에 사용된 장비는 미국 ZONIC사의 Medallion으로 최대 16개의 입력채널을 갖고 있으며 입력주파수 범위는최고 10KHz까지이다.

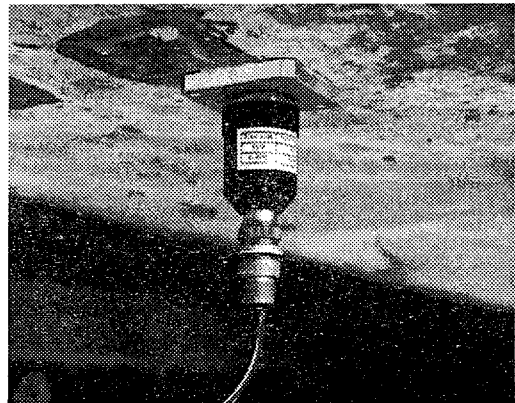


Fig. 2 Accelerometer attached on the tank.

### 2.3. 하중제하 및 센서설치

센서부착 위치는 저장탱크의 벽면을 따라 같은 간격으로 8개 지점 높이방향으로 5개 지점씩 총 40개 지점에 가속도를 계측할 센서를 부착하였다. 하중은 탱크높이의 0.75Hz에 작용하는 것으로 모형화 하였고 200Hz의 진동수를 가진 파의 진행을 잡을 수 있도록 요소의 크기를 결정하였다. Impulse Hammer를 이용하여 가진점에 충격을 가하고 측정된 응답신호는 A/D 변환기에 의해 샘플링 하여 컴퓨터에 입력되고 FFT변환에 의해 가진점과 응답점과의 전달함수가 계산된다. 진동모드를 구하기 위해 구조물의 여러 지점에 대해 전달함수 계측을 반복하여 실험하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1. 저장탱크의 응답함수

실험을 통하여 얻은 계측결과를 이용하여 Pilot LNG 탱크의 고유주파수와 진동모드를 추출하였다. Fig.3은 Sledge Hammer로 저장탱크의 벽면의 중심을 향해 가진한 충격파형의 시간영역 이력을 보여주며, Fig.4는 이것을 FFT(Fast Fourier Transform)변환시킨 스펙트럼이다. Fig.4에서 볼 수 있듯이 대략 100Hz까지의 주파수 대역에서 일직선모습을

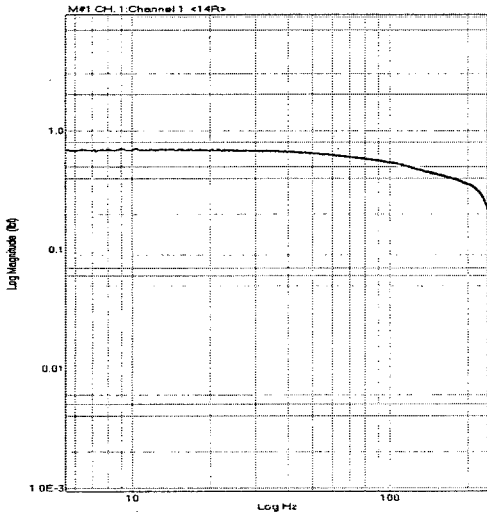


Fig. 3. Wave by Impact Hammer.

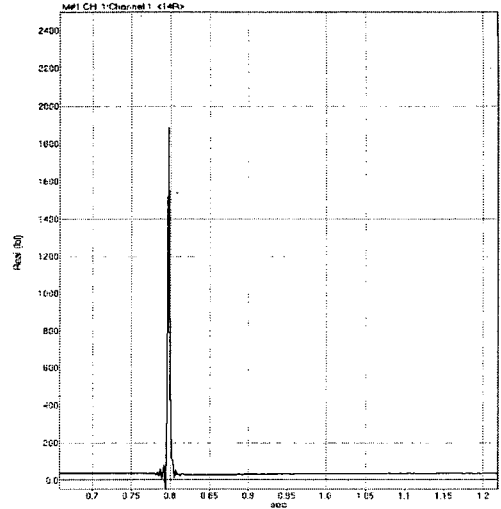


Fig. 4. Wave Spectrum of Impulse .

보여주며 이는 저장탱크의 고유모드중 100Hz이내의 모드는 해머에 의한 충격으로 충분히 가진할 수 있다는 것을 보여준다.

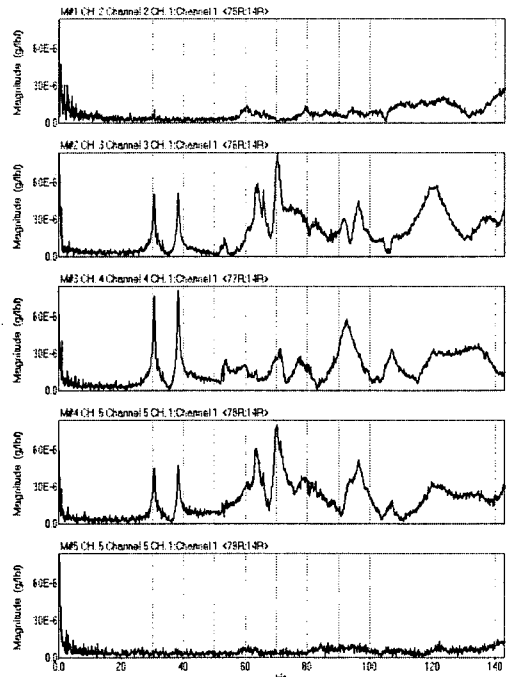


Fig. 5. Frequency Response Function.

Fig.5는 세로1열의 주파수 응답함수를 보여주고 있다.

### 3.2. 모드형상

실험을 통하여 얻어진 임펄스 응답으로부터 모드해석을 통하여 얻은 형상이다. Fig. 6~9는 각각 고유진동수 31.5Hz, 38.25Hz, 52.75Hz, 69.5Hz때의 모드형상으로 평면도 및 입체도로 구성되어 있어서 복잡한 모드형상을 알아보기 쉽게 시각화하였다. 고유진동수 31.5Hz의 경우, 가장 기본적인 모드로 pilot 탱크를 위에서 볼 때 타원형태가 나타나며, 타원의 장주 부분은 측면에서 볼 때 볼록해지며, 단주 부분은 오목해지는 경향을 보인다. 두번째 모드형상은 고유진동수 38.25Hz일 때의 경우로 위에서 볼 때 정사각형 형태를 띠고, 사각형의 모서리 부분은 측면에서 볼 때 1차 모드로 볼록해지는 형상을 나타낸다. 고유진동수 52.75Hz를 갖는 세 번째 형상은 두 번째 모드형상과 유사한 형태를 보이나 평면도의 경우 직사각형 형태로서 정면도와 측면도를 비교해 볼 때, 볼록한 정도가 다르다. 따라서 이런 비대칭성은 pilot 탱크가 두 번째 경우보다 더욱 복잡한 형태로 거동하고 있음을 알 수 있다. 네 번째 경우로 고유진동수가 69.5Hz일 때는 정면도와 측면도의 형상이 같으며, 2차 모드로 움직이는 것을 알 수 있다. 이는 탱크가 위, 아래로 볼록해짐과 오목해짐을 반복한다는 것을 나타낸다.

### 3.3. 해석결과와의 비교

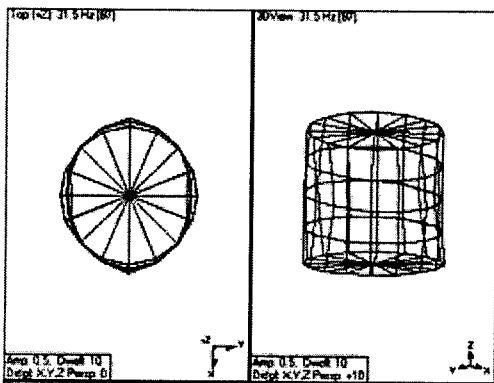


Fig. 6 Mode Shape at 31.5 Hz.

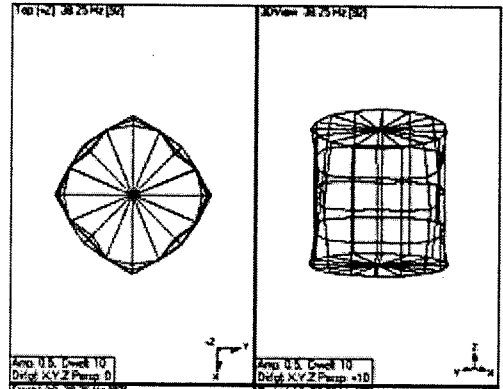


Fig.7 Mode Shape at 38.25 Hz.

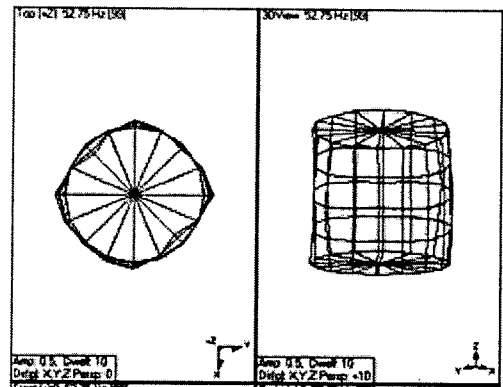


Fig. 8 Mode Shape at 52.75 Hz.

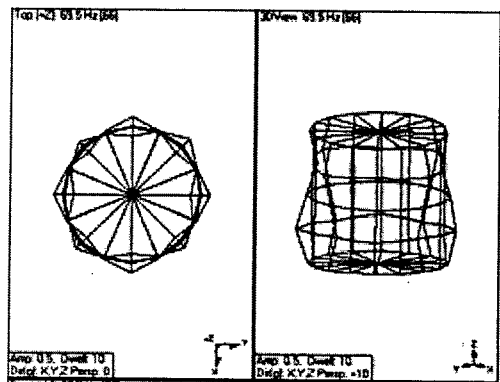


Fig. 9 Mode Shape at 69.5 Hz.

실험결과와 타당성을 판단하기 위하여 구조해석프로그램인 SAP2000을 사용하여 모드해석을 하였다. 실험의 경우 Impulse Hammer의 가진력이 Isolator에 영향을 줄만

Pilot LNG저장탱크의 모드 형상 파악을 위한 동특성 실험

큼 크지 못할 것이라는 가정 하에 수치해석모델에서는 탱크의 구속조건으로 고정 단을 사용하였다. Fig.10은 고유진동수 33.89일 때의 모드형상을 타나낸 것으로 실험 첫 번째 모드형상인 고유진동수 31.5Hz의 경우와 일치한다. Fig.11는 고유진동수 37.03Hz일 때의 모드형상으로 실험 두 번째 모드형상인 고유진동수 38.25Hz일 때의 형상을 반영하였다. Fig.12는 고유진동수 65.79Hz일 때의 모드형상으로 실험 네 번째 경우 고유진동수 69.5Hz의 모드형상을 나타낸다. 실험에서 얻어진 5개의 모드형상을 수치해석모형과 비교하면서 유사한 모드 형상을 찾은 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

일치하는 모드형상은 Case1, Case1, Case4로서 오차범위 10% 이내로 나타나, 실험에서 구한 모드형상이 대체적으로 타당하다는 것을 말해주고 있으나, Case3, Case5의 경우 정확히 일치하는 결과를 구할 수 없었다. 이는 실제 탱크에 부착된 악세사리들을 수치해석모델에 반영하지 못한 데에 따른 것으로 추정된다.

Table 2. Comparison of Frequency(Hz).

Case	실험(Hz)	수치해석(Hz)	오차(%)
1	31.5	33.89	+8
2	38.25	37.03	-3
3	52.75		
4	69.5	65.79	-5
5	80.5		

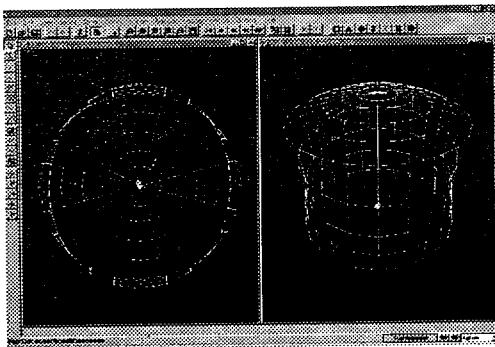


Fig. 10 Mode shape at 33.89Hz(FEM).

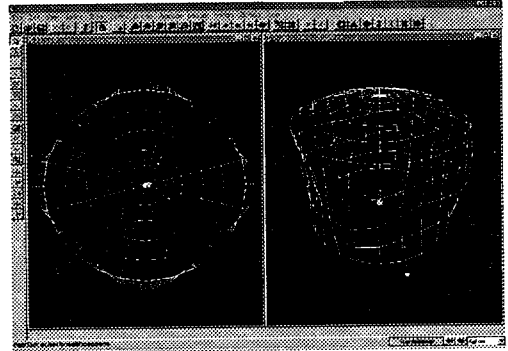


Fig. 11 Mode shape at 37.03Hz (FEM).

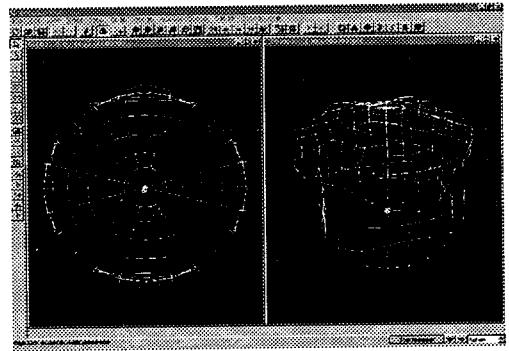


Fig. 12 Mode Shape at 65.79Hz (FEM).

4. 결 론

국내에서는 최초로 LNG저장탱크에 대한 동특성실험을 수행하였다. LNG 탱크의 벽면을 따라서 등 간격으로 8개 지점씩 총 40개 (원주방향 8개소 x 수직방향 5개소 = 40) 지점에 대하여 가속도를 계측하여 모드해석을 한 결과 탱크의 고차모드까지 반영함으로써 계측점의 개수가 경제적으로 선정되었으며, 모드형상을 반영하기에 충분하였음을 알 수 있다. 가진 지점에서 Impulse Hammer로 LNG Tank의 벽면을 중심을 향하여 친 충격 파형의 시간영역의 이력과 이를 FFT(Fast Fourier Transform) 변환시킨 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 대략 100Hz까지의 주파수 대역에서 거의 일직선을 나타내고 있으며, 이는 Tank의 고유모드 중 100Hz이내의 모드는 Hammer의 충격으로 충분히 가진할 수 있음

을 알 수 있었다. FFT변환과 노트북 컴퓨터에 의한 커브피팅으로 얻어진 세로 1열의 시간영역의 가속도 응답과 주파수 응답함수(Frequency Response Function)를 통하여 고유진동수를 파악하고, 이와 연관된 모드형상을 구한 결과, 고유진동수 31.5Hz, 38.25Hz, 52.75Hz, 69.5Hz, 80.5Hz일 때의 모드형상을 알 수 있었다. 이 중 31.5Hz, 38.25Hz, 69.5Hz일 때의 모드형상은 SAP2000으로 해석한 모드형상과 고유진동수 오차범위 10%이내에서 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 52.75Hz와 80.5Hz일 때는 수치해석결과에서 확인할 수 없는 모드로써 pilot탱크의 액세서리 장착 등에 따른 변수가 작용했다고 추정된다.

### 참 고 문 헌

- [1] TUNG A.T.Y., and KIREMIDJIAN, A.S., "Application of System Reliability Theory in the Seismic Analysis of Struct Structures." *Earthquake Spectra*, 8(3), 1992, pp. 471-494.
- [2] MAZUREK D.F., and DeWOLF J.T., "Experimental Study of Bridge Monitoring Technique." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116(9), 1990, pp. 2532-2549.
- [3] NARKIS Y., "Identification of Crack Location in Vibrating Simply Supported Beams." *Journal of Sound and Vibration*, 172(4), 1994, pp. 549-558.
- [4] PARK S., STUBBS N., and SIKORSKY C., "Linkage of Nondestructive Damage Evaluation to Structural System Reliability." Proc. of SPIE, Smart structures and Materials 1997: Smart systems for Bridges, Structures and Materials 1997: Smart Systems for bridges, Structures, and highways, Vol. 3043, 1997, pp.234-245.
- [5] STUBBS N., PARK S., CHIO S., BOLTON R. W., and SIKORSKY C., "Non-Destructive Estimate of the Rate of Change of Structural Degradation of the Lavic Road Overcrossing." Technical Report No. FHWA/CA/ESC-99/13, Submitted to state of California Department of Transportation, Sacramento, California, Texas Engineering Experimental Station, Texas A&M University, College Station, Texas.
- [6] EWINS D. J., *Modal Testing : Theory and Practice*, Research Studies Press LTD., 1986, pp.269
- [7] Vibrant Technology, Inc., 1997 ME'scope™ version 4.0 Operating Manual, Jamestown, California, 1997.
- [8] COMPUTERS & STRUCTURES, INC., *SAP2000 Integrated Finite Element Analysis and Design Structures*, 1998.