



지하식 저장탱크 Corbel부 실험적 거동 분석

†윤인수 · 김정규 · 김영균* · 김지훈*

한양대학교 기계공학부, *한국가스공사 연구개발원
(2006년 2월 20일 접수, 2006년 3월 27일 채택)

Experimental Analysis of Corbel Part Behaviour in Inground LNG Storage Tank

†I.S. Yoon · J.K. Kim · Y.K. Kim* · J.H. Kim*

Hanyang University

*Kogas R&D Center

(Received 20 February 2006, Accepted 27 March 2006)

요 약

지하식 LNG 저장탱크의 Bottom Slab와 Side Wall의 연결부(코벨)는 응력집중을 완화하기 위하여 앵커 바를 사용하여 부분적으로 고정되는 힌지 조건을 갖는다. 그러므로 LNG 저장탱크 하중 조건인 LNG 온도, 지하수압 등에 의해 방사 방향과 수직 방향으로 변형된다. 멤브레인 설계 관점에도 이러한 변형값이 직접 전달되어 중첩되므로 중요한 부분이다. 본 논문에서는 코벨부의 실제 거동을 조사하기 위하여 센서를 설치하여 온도, 하중 그리고 변위를 측정하였다. 또한 FEM 해석으로 예측한 하중조건에 대한 설계 값과 비교하여 합리적인 설계를 제시하고자 하였다.

Abstract – The connection part (corbel) between bottom slab and side wall in inground LNG storage tank has hinge conditions partly fixed by using anchor bars to reduce stress concentration. The corbel deforms in both radial and vertical directions under load conditions of the LNG tank such as LNG temperature, hydraulic pressure, etc. Membrane is an important part from the viewpoint of design because the deformation of the corbel is transferred directly to the membrane and superposed with other deformations. Behavior of the corbel has been investigated through various sensors to measure temperature, load and displacement. And the test data have been compared with finite element results analysis to propose a more reasonable design of LNG storage tank.

Key words: Inground LNG Storage Tank (지하식 LNG저장탱크), Corbel (코벨), Membrane (멤브레인), Relative Displacement Meter (상대 변위계), Load Cell (로드셀)

I. 서 론

원자재 값급등 현상 및 달러 약세화에 따라 국제유가 상승세가 지속되고 있으며 고유가 체제가 장기화될 가능성까지 제기되고 있는 상황이다. 에너지 다소비형 산업이 주축인 우리나라에서는 지속적인 경제 발전을 위해서는 에너지의 안정적 공급이 필수적이다. 이를 위해서 해외 유전 개발 강화 및 에너지 이용 다변화 정책이 본격화될 것이다. 대체에너지 적용에 있어 환경문제의 중요성 또한 커지고 있으며 특히 국제기후변화 협

약인 교토의정서를 비준함으로써 온실가스 감축 노력이 본격화 될 것으로 예상된다. 따라서 경제 발전, 에너지 사용 그리고 환경 보존의 세 가지 문제를 동시에 풀어야 한다. 이러한 여러 문제를 해결할 수 있는 대안으로 도시가스 및 화력 발전소등의 기본 에너지 원료로서 사용되는 천연가스가 언급되고 있다. 즉 청정 연료로서의 장점과 석유 대체 에너지로서의 가능성이 커 그 수요가 증가하고 있다. 천연가스는 운송 및 저장 시 대기압, -162°C 상태에서 액화상태로 탱크에 저장되며 이러한 탱크는 충분한 안전성과 안정성을 요구한다. 한국가스공사 인천생산기지는 대도시에 인접한 지역이며 현재 송도 신도시 개발이 진행되고 있어 2차 확장 건

†주저자: isyoon@kogas.or.kr

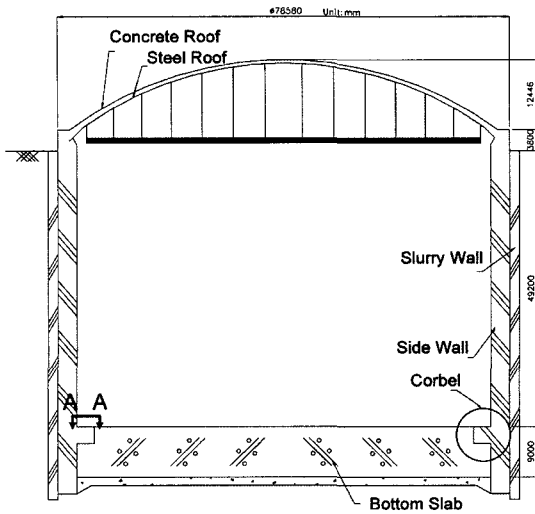


Fig. 1. The configuration of inground LNG storage tank.

설부터 저장탱크를 지하식으로 건설하고 있다. 지하식 LNG 저장탱크는 전량 지하에 저장되어 탱크 파손에 의한 누설 발생시에도 지표에 유출 가능성이 없는 안전성을 갖추고 있으며 방액제가 필요없어 토지의 이용률을 높여주는 장점이 있다. 그러나 지하식 저장탱크는 지상식 저장탱크와 달리 지반을 굴착하여 시공 건설한 구조물로 구조가 달라 세심한 유지관리가 필요하다. 지하식 구조의 특성으로는 먼저 Slurry wall을 시공하여 지반 지지대를 시공하여 안정성을 확보한 후 탱크 구조에 대한 굴착과 시공이 이루어지게 된다. 이에 따라 시공시에는 굴착 시공에 따른 관리가, 운전상에서는 지하수 처리 및 냉열 전달에 의한 지반 동결에 따른 탱크 구조에 미치는 영향을 고려해야 한다.

구조적으로는 콘크리트 바닥 슬라브와 벽체가 완전 연결되는 방식이 아닌 힌지 고정 방식으로 연결된다. 이는 벽체 및 바닥 연결부에 응력 집중 현상이 발생을 완화 및 경제적 시공을 하기 위해 취한 시공 방식이며 두 부분은 앵커바를 사용하여 연결이 이루어진다. 즉 LNG 액체 저장 및 온도변화에 의한 외조변형이 발생하는 경우 이 부위에서 수평 및 연직 방향 변형이 발생하는 구조이다.

멤브레인은 LNG저장에 따라 발생하는 액압과 열하중의 흡수를 주요 기능으로 하는 것으로 이러한 하중에 대한 안전성 평가가 이루어져 왔다. 그러나 지하식 저장탱크와 같은 코벨부의 외조 거동이 발생할 경우 멤브레인 변형 거동에 중첩되는 추가적인 변형이 발생하므로 멤브레인에 미치는 영향에 대해 분석이 필요하다.

본 논문에서는 한국가스공사 인천생산기지 #000 탱

크에 실제 센서를 설치하여 운전중 코벨부의 온도, 하중 그리고 각 방향의 변형값을 측정하였다. 또한 여러 하중 조건에 대한 유한요소해석으로 구한 코벨부 변형값과 실험 측정값을 비교하여 지하식 LNG 저장탱크 외조의 거동을 분석 하였으며 이를 통해 멤브레인에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

II. Corbel 부 구조 및 거동

2.1. Corbel부 구조

Fig. 2-3는 코벨 연결부에 대한 자세한 구조 및 형상을 나타내고 있다. Bottom Slab와 Side Wall의 연결되는 접촉부는 표면이 테프론 소재로 피복된 Bearing Plate가 설치되며 이 사이를 Anchor bar를 설치하여 고

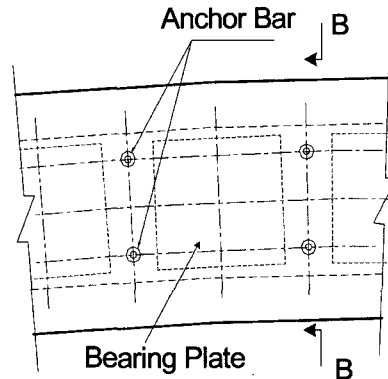


Fig. 2. The configuration of corbel part in LNG storage tank (Fig.1 A-A View).

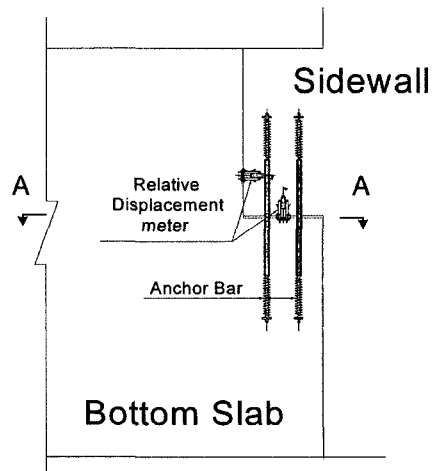


Fig. 3. The configuration of corbel part including sensors in LNG storage tank (B-B View).

Table 1. Material specification.

	Material	Size (mm)	No.
Bearing plate	SS400	1000 × 950 × 12	320
Anchor bar	SBPD930 /1080	32φ	320

정 한다. 재료 특성은 Table 1에 나타났다.

2.2. Corbel부 변형 거동 측정 센서

코벨부의 변형 거동을 파악하기 위하여 변위, 하중 그리고 온도를 측정하였다. 변위 센서는 상대 변위계를 (모델명: PD-100RC, Potentio meter 방식, 제작사: Toyoko Elmes) 일정한 간격 및 수평 수직 방향을 각 4개씩 총 8개를 설치하였다. 실제적으로 고정되는 점은 anchor bar로 이 부위에 부하되는 응력을 측정하기 위하여 로드셀을(모델명 : GL-500kNCAL-60 제작사: Toyoko Elmes) Anchor bar내에 설치하여 하중을 측정하였다. 각 센서의 최하 사용 온도 범위는 변위계는 -70°C 그리고 anchor bar는 -50°C로 되어 있어 온도를 측정하여 측정 데이터의 신뢰성을 파악하였다. 온도 센서는 RTD 센서를 (PT100, 3선방식-Konics사) 사용하였다. 측정 부위는 Bottom Slab의 최상부로서 단열재와 접하는 부분으로 외조 콘크리트 구조에서 최저 온도가 예측되는 부위이다.

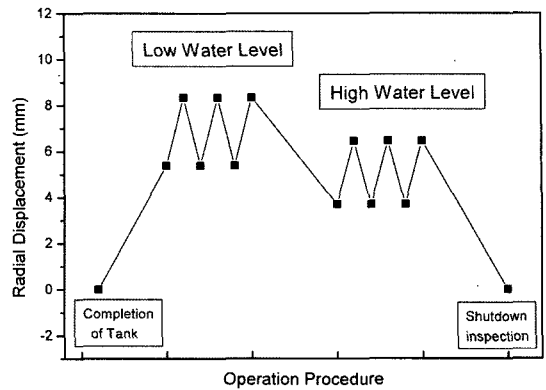
III. Corbel 부 거동 특성

3.1. FEM 해석

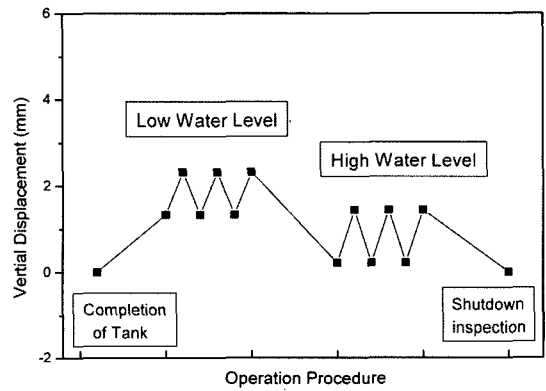
FEM 해석은 기존 설계서에 제시한 코벨부 변형값을 인용하였다. 운전 상태에 따른 하중 조건을 상정하여 구한 코벨부의 수직 및 수평 방향 변형 거동을 Fig. 4에 도시하였다.

지하식 저장탱크는 자체 냉열을 이용하여 2년 정도 벽체 구조 주위의 지반동결을 통한 동결선을 확보하여 구조적 강성도를 증가시키는 방식으로 운전된다. 강도 확보에 따라 초기 지하수위를 저수위로 운전에서 고수위 운전으로 전환하여 지하수 관리의 경제성과 편의성을 확보하게 된다.

해석 수행은 저수위 환경(Beginning of operaiton)과 고수위 환경(Steady State) 조건으로 나누어 해석을 수행하였다. 하중 조건은 LNG 액위 변화에 따른 온도 변화, 수위 변화에 의한 압력변화와 같은 내부 하중, 토압 및 수압을 포함하는 외부에서 부하되는 외부 하중 그리고 대기온도 변화에 의한 지반 온도 분포 변화와 같은 환경조건에 대한 하중 조건을 조합하여 해석을 시



(a) Radial Displacement



(b) Vertical Displacement

Fig. 4. Obtained displacement procedure by FE analysis.

행하였다.

따라서 Fig. 4에 나타나는 바와 같이 방사방향 변형은 LNG 충전에 따라 발생하는 온도 변화에 의해 변형량이 주로 발생하였고, 충전된 LNG의 충전과 방출의 반복에 따라 코벨부도 반복 변형이 부하되는 것으로 계산되었다. 또한 고수위 운전시 즉 동결선 확보에 의해 외조 구조의 강성 확보시엔 그 변형량이 저수위 운전시와 비교 하여 감소하는 것으로 계산되었다. 수직 방향 변형의 전체 사이클은 방사 방향과 동일하며 변형량은 방사 방향 보다는 작은 것으로 계산되었다.

3.2. 계측결과

Fig. 5는 실제 저장된 LNG 액위 높이의 변화를 나타냈다. 액위 변화에 따른 액압 및 전체 구조의 온도 변화가 발생하여 코벨부의 거동에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 초기 운전 시작에서 250일 정도 운전이 된 데이터를 나타냈다. 이 기간동안 최대 저장가능 양을

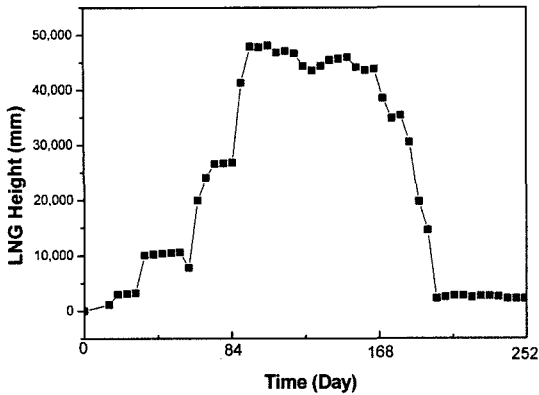


Fig. 5. The variation of LNG height during operation in LNG storage tank.

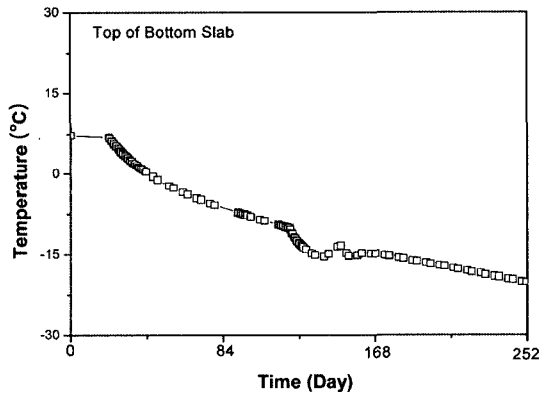


Fig. 6. The variation of temperature in top of bottom slab.

저장하였고 최저 액위까지 방출하는 운전을 하였다.

Fig. 6는 Fig. 5 운전환경에서 Bottom Slab 최상부 즉 단열재와 바닥 콘크리트가 만나는 부위의 온도변화를 나타냈다. 이 부위는 항상 LNG가 저장되는 부위와 접촉된 부위로서 LNG 냉열의 영향으로 온도가 감소하는 현상을 보인다. 온도변화는 LNG 냉열을 흡수하는 단열재의 열전도 특성에 따라 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 일정한 온도로 감소하고 있다. 온도 변화가 약 -20°C 정도로 분포되고 있어 측정 센서에 미치는 온도 영향은 크지 않을 것으로 파악되었다. 즉 센서의 사용 온도 범위 내에 있어 온도변화로 인한 노이즈 발생은 작용하지 않을 것으로 예측 되었다.

Fig. 7~9는 응력 및 변위 결과를 나타내고 있다. 센서 측정값은 초기 설치 시에 0점 조정을 하였다. 실제 탱크 초기 운전 조건에서 0점 조정을 하지 않고 시공 중 발생한 변형량을 초기값으로 갖는 상황에서 측정을 시작하여 운전상황에서 상대적인 비교를 통해 측정값

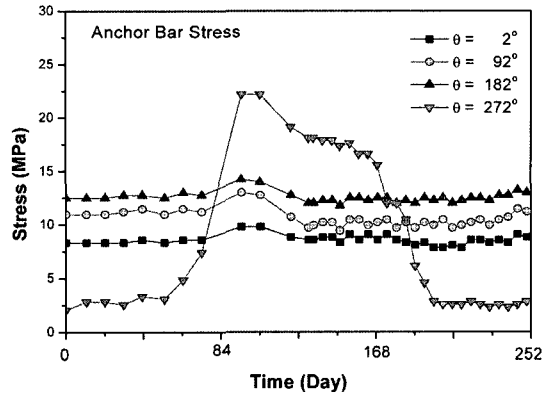


Fig. 7. The variation of stress in anchor bar at corbel part.

을 분석하였다.

Fig. 7는 Bottom Slab와 Side Wall을 직접 연결하는 anchor bar에 부하되는 하중을 측정하여 응력으로 환산한 결과이다. Anchor bar에 로드셀을 설치하여 부하되는 하중을 측정하였다. 측정결과에 의하면 다른 부분은 큰 변화가 없었으나, 272° 위치에서 응력 변화가 발생하는 현상이 나타났다. 이 응력값은 LNG 액위 변화와 일치 하는, 즉 LNG 충전에 따라 증가하였다가 LNG 방출에 따라 다시 감소하는 현상을 보였다. 비록 한 부분에 응력값이 큰 변화를 보이는 현상이 발생하였으나 이때 부하된 응력값이 Anchor bar 소재의 물성치에 비해 미소한 값을 나타내고 있어 큰 응력이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 또한 변형 발생 후 LNG 액위 감소에 따라 초기 값을 회복 하는 안정적 거동을 나타내고 있다.

Fig. 8-9는 방사 및 수직 방향의 상대 변위값을 나타내고 있다. Fig. 4에서 제시된 바와 같이 코벨부에서는

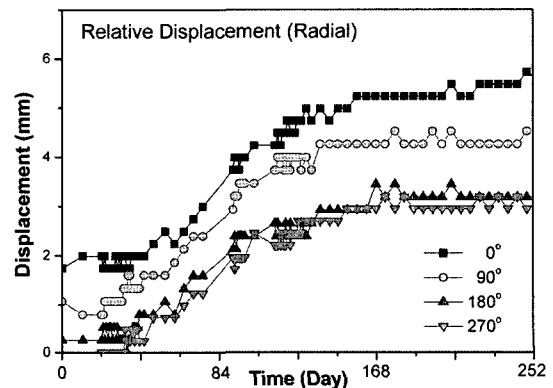


Fig. 8. The variation of relative deformation in radial direction at corbel part.

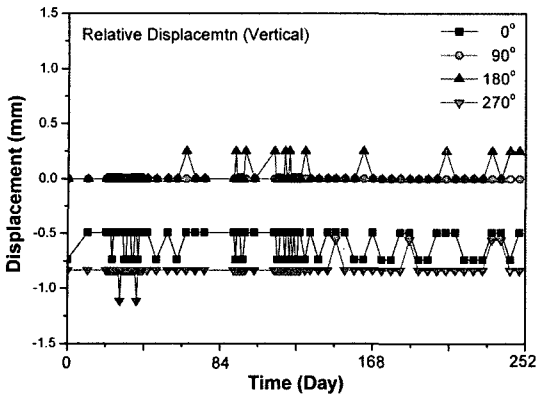


Fig. 9. The variation of relative deformation in vertical direction at corbel part.

수평방향으로는 5.37 mm 그리고 수직 방향으로는 1.33 mm의 변형이 예측되었다. Fig. 8에서 나타내는 측정된 수평방향 변위값이 3.2~4.5 mm로 분포되고 있어 유한 요소해석으로 예측한 계산값 보다 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 설계시에 적용되는 하중조건 선정시 계절적 요인에 의한 주위 온도 환경등을 보수적 해석에 의해 극한조건에 대한 해석을 수행하므로 설계값이 약간 크게 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 9에 보여지는 나타낸 수직 방향 변위 또한 변형량이 거의 발생하지 않아 설계서에서 예측한 값보다 작은 값을 갖는 것으로 측정되었다.

수평 및 수직 변위 계측값은 모두 LNG 액위 변화와 관계없는 것으로 나타났다. 수평방향 변위값은 LNG 충전에 따라 일정한 곡선을 그리며 증가하나 LNG 방출이 이루어지면서 변위값이 복원되지 않고 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 수직 방향의 변형거동은 주요 요인으로 작용한다. 지하식 저장탱크는 대형 구조물로서 자체 중량에 대한 충분한 안전성 및 안정성을 확보하기 위하여 파일강관 시공을 하여 운전환경에 따른 액위 변화에 의한 중량 변화에 의한 수직 변위 거동이 미세하게 나타나고 있다.

특히 수평방향의 상대 변위가 LNG 액위 변화에 따라 변화가 발생하는 즉 반복 거동이 발생하는 방식이 아닌 일정하게 유지되는 현상을 보이고 있어 설계와는 약간 다른 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 액위 변화에 따른 방사방향의 반복 거동은 멤브레인에 반복 피

로 하중으로 부하되어 이에 대한 평가가 반드시 수반되어야 하는 필요가 있는 부분으로 중요한 요소이다. 따라서 이러한 방사방향 변형의 반복 발생 여부를 파악하는 것은 중요하다.

본 논문에서 제시한 측정 결과는 측정 기간이 길지 않아 제시한 결과만으로 코벨부의 거동을 완전히 파악하는 것은 불가능 하며 장기적인 데이터 측정 및 획득 그리고 관리를 통해 정확한 코벨부 거동을 파악하는 추가적인 연구가 필요하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 지하식 LNG 저장탱크 외조 구조의 일부인 코벨부 거동에 대한 설계값 및 측정 결과에 대하여 비교 분석을 하였다. 코벨부의 온도, anchor bar의 응력 그리고 수평 및 수직 방향의 변위를 측정된 결과 안정적 거동을 하는 것으로 나타났다. 코벨부는 LNG 충전 및 방출에 따라 연속적인 거동을 하므로 장기 운전 상황에서의 데이터 측정 및 획득 그리고 관리를 통한 코벨부 거동을 파악하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] API Standard 620 Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks, (2002)
- [2] Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service BS7777", (1993)
- [3] Japan Gas Association Committee, Recommend Practice for LNG Inground Storage Tank", (2002)
- [4] KHI, "인천생산지 #000 지하식 저장탱크 설계제안서"
- [5] 高木淳, "大容量LNG地下タンクの開発と建設", セメントコンクリート, No.587 Jan., 14-20, (1996)
- [6] Koji Miyamoto, "Study on Streamlining the Reinforced Concrete Structures for Inground LNG Storage Tanks", Japan Civil Eng., No.560, 79-89, (1997)
- [7] 최창근 외, "지하식 LNG 저장탱크의 개선된 유한요소해석 모델", 5, 1175-1182, (2003)
- [8] 김영균 외, "초기운전 환경에서의 지하식 LNG저장탱크 열전도 분석", 대한토목학회 추계 정기학술대회, 2316-2319, (2005)