

LNG저장탱크 Roof 설계에 관한 연구

김영균* · 이강원* · 홍성호* · 오병택*

The Study of Roof Design for LNG Storage Tank

Y.K. Kim, K Lee, S.H. Hong, B.T. Oh

Key Words: LNG Storage Tank (LNG저장탱크), FEM(유한요소법), Steel Roof (강재 지붕) Concrete Roof (콘크리트 지붕)

Abstract

Natural gas became one of the major sources of energy in Korea. As the consumption of natural gas increase, the more capacity of the LNG storage tanks is required. Recently, Korea Gas Corp.(KOGAS) has developed the technology of designing the LNG storage tanks. In this study, some of the finite element analysis has been made for designing of the roof structure of LNG storage tanks. The load case and safety code used in this study were followed by BS7777.

1. 서론

우리나라 천연가스(NG)의 수요는 에너지 다변화정책 및 환경 정책의 영향으로 청정 무공해 에너지라는 장점으로, 도입이래 소비량이 크게 증가하고 있다. 천연가스의 저장은 대기압, -162℃ 상태에서 액화하여 액화천연가스(LNG)로 저장하는 방법을 사용하고 있으며 수요 증가에 따른 저장기지의 건설 및 확충이 계획되고 있어 독자적인 LNG저장탱크 설계, 건설 및 시공 기술의 국산화 필요성이 증대되고 있다. LNG저장탱크는 내조·벽체·Roof로 구분할수 있으며, 내조는 9% Ni강 형식과 멤브레인 형식으로 나뉘어 진다. 9% Ni강 형식의 내조는 자립구조에 의해 LNG를 지지 저장하며 멤브레인 형식은 주름을 가지고 있는, 두께 1.2~2mm의 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열변형을 주름부에서 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 특성을 갖는다. 벽체는 원통 쉘 구조로의 측벽 및 원판 형태

의 저판에서 Prestress철근 콘크리트로 건설 된다. Roof는 벽체 정상부에 지지 되어진 강판의 구형 쉘 구조로 내압 그리고 액체 기밀 구조로 되어 있다. 지붕부의 단열은 Roof Frame에서 고정되어 지지된 서스펜디드 데크 상부에 단열재가 설치된다. 이와같은 LNG 탱크의 형상을 Fig.1에 나타냈다.

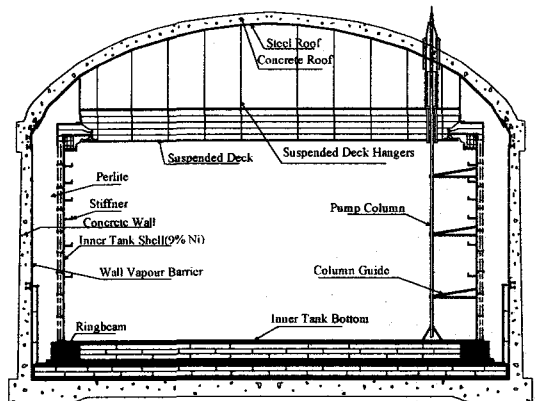


Fig.1 LNG Storage Tank

* 한국가스공사 연구개발원 kyk@kogas.re.kr

국내 LNG 저장탱크의 해석 및 설계기술 부문

에서 저장탱크의 Roof 구조는 그 형상 및 여러 가지 하중조건이 벽체에 비해 상대적으로 복잡하나 이에 대한 설계기술은 아직 미비한 실정이다. 또한 Roof는 재료 형태, 하중조건, 시공방법의 다양성으로 인하여 전체 LNG 저장탱크 구조요소 중 해석이나 설계가 상대적으로 어려운 부분이다. 따라서 본 연구에서는 외국⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾의 기준안을 바탕으로 LNG 저장탱크의 Roof를 실제적으로 해석하고 설계할 수 있는 기술을 구체적으로 개발하여 향후 건설될 저장탱크에 대한 안정성을 확보할 수 있는 근거를 마련하고 해석 및 설계기술의 국산화를 위한 근거를 마련하기 위한 구체적인 단계로서 LNG 저장탱크 Roof 구조의 해석 기술을 개발하고자 한다.

2. LNG저장탱크 Roof 설계

2.1 Roof의 기능

LNG저장탱크의 Roof는 자중과 Roof 상면에 작용하는 외하중을 지지하는 것으로 탱크 내부의 자연증발에 의한 가스 내압에 저항하며, 내조와 연결되어 탱크 내부를 완전 기밀 상태로 유지한다.

2.2 LNG저장탱크 Roof 기본구조

저장탱크 Roof의 구조는 크게 나누어 내부의 Steel로 이루어진 Roof Frame과 바깥쪽의 Concrete Roof로 구성되어진다고 볼 수 있다. 복합구조의 설계는⁽⁶⁾

- (1) 콘크리트 주구조-내면 강판 라이닝
- (2) 강주구조-콘크리트 완충재
- (3) 강-콘크리트 합성 구조

(4) 강구조 및 콘크리트 구조의 중첩 구조의 4가지로 나눌 수 있다. (1)은 콘크리트 Roof를 구조체로 완성후 기밀재로 강판을 내조와 같은 형상으로 부착하는 구조로 시공이 곤란하며 (2)는 콘크리트는 외부하중의 충격에 대한 완충재로 고려되어 방사원주상에 배치된 프레임에 강판을 부착하여 강제 지붕에서 하중을 지지하는 구조로서 강판과 강판 그리고 강판과 프레임은 용접으로 연결되어져 용접부의 저하를 고려하면 허용응력을 만족하기 위하여는 플레이트의 두께가 두꺼워지고 용접에 의한 공기가 길어지며 또한 프레임에서 콘크리트를 지지하여야 하므로 프레임이 너무 커지게 된다. (3)은 강판과 콘크리트를 합성하

여 하나의 구조물로 고려한 것으로 즉 강판을 철근으로 취급하는 구조이다. 이럴 경우 강판은 철근에 비교하여 허용응력이 작아 설계상 불리하게 된다. (4)는 강제 지붕은 LNG 저장탱크의 Roof를 지지하기 위한 구조물로써 Concrete Roof의 초기 시공단계에서 콘크리트 타설을 위한 거푸집 역할을 하며, 그 후 서스펜디드 테크와 단열재를 지지하게 된다. 일반적으로 저장탱크의 용량이 커짐에 따라 그 내부 압력은 탱크의 직경에 비례하여 커지므로 이 압력의 안정적 지지를 위해서는 Steel 보다 강성이 큰 콘크리트가 유리하다. 즉 충격하중에 대해서는 콘크리트를 기밀을 유지에는 Steel Roof를 사용하는 복합구조로 되어있다. 본 연구에서는 여러 가지 조건을 고려하여 (4)번의 경우에 해당하는 것으로 해석을 수행하였다. Fig.2는 해석 수행 흐름도 이다.

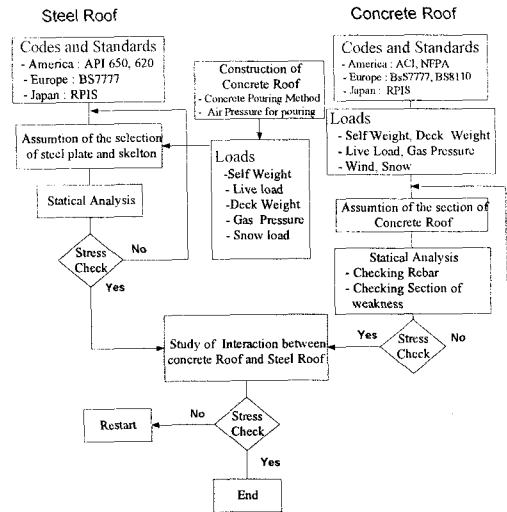


Fig. 2 The Procedure of LNG Roof Design

3. Steel Roof 설계

Steel Roof의 설계방법은 저장탱크의 형식과 용량, Roof의 형태와 직경 압력 및 재료의 특성등과 같은 기본적인 설계조건을 바탕으로 Roof의 곡률, Rafter의 간격 및 각도 그리고 Ring의 간격 및 Roof Plate의 두께등 기본적인 Roof의 골격을 결정한다. Roof Plate를 구하는 방법은 탱크 내부의 압력과 용접 효율을 고려하여 다음과 같은 식을 이용하여 구한다.⁽¹⁾

$$t = \frac{PR}{20f\eta}$$

- P : Internal Gas Pressure (mbar)
- R : Internal Radius of Dome (m)
- f_t : Allowable tensile stress (N/mm^2)
- η : Efficiency of Welded joint

해석에 사용된 모델은 9% Type 이며 용량 및 모형은 Table 1과 같다.

Table 1 Roof 설계 수치 및 Steel 재료

· 내측반경	32.8m
· 용량	140,000m ³
· Rafter	96개 (H200×200×8/12)
· Roof Plate	9mm (ASTM A516)
· Ring Plate	20mm (ASTM A516)

Roof는 시공 단계에 따른 하중조건이 다르며 현재 적용되는 코드에 의하면 Steel Roof의 하중 조건은 Roof Frame 만 설치된 경우의 하중 조건 3가지와 Frame에 Roof Plate까지 설치된 경우의 하중조건 7가지로 나누어 규정하고 있다.

Table 2 Load case at stage1

Load Case	Self Weight	Live Load	Deck Weight
1	○		
2	○	○	
3	○	○	○

Table 3 Load case at stage2

Load Case	Self Weight	Live Load	Deck Weight	Accessory	Gas Pressure	Snow	Fresh Concrete
1					○		
2	○						
3	○	○	○				
4	○	○	○	○			
5	○	○	○	○	○		
6	○	○	○	○	●		
7	○	○	○	○	○	○	○

● : Negative Pressure

본 탱크에서의 개발 단계에서는 Steel Roof 최적 형태와 안전성 여부를 확인하기 위해 유한요소해석 방법이 사용되었으며, 프로그램은 현장의 설계자가 사용하기 편리한 범용 해석 프로그램인

SAP 2000을 이용하였다. 하중 조건은 Table2에 나와 있는 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였으며 Live Load, Snow Load등은 BS7777코드에서 그리고 Deck weight, Gas Pressure는 탱크 설계 조건의 값을 사용하였다. 가장 가혹한 조건인 Table 3의 case 7의 하중조건에서 해석 결과를 Fig.3~5에 나타내었다.

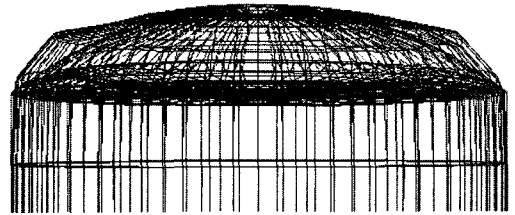


Fig. 3 Displacement behavior of Roof Frame (Stage 2)

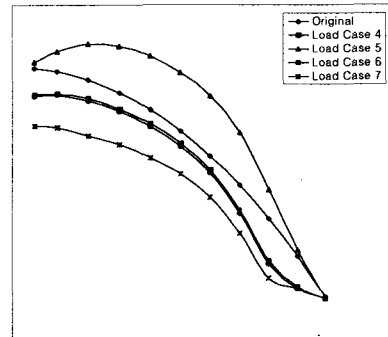


Fig. 4 Vertical Displacement of Roof Frame

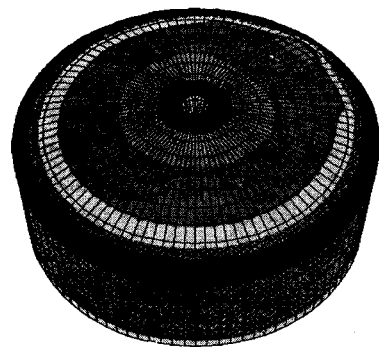


Fig. 5 Stress of the Wall and the Roof (Stage2)

4. 콘크리트 Roof

Concrete Roof의 해석에는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS와 콘크리트 구성방정식을 이용하여 수치 모형화 하여 해석하였고 ACI318 시방서를 근거로 축력과 모멘트, 전단에 대해 안전성을 검토하였다. 콘크리트와 보강철근 재료의 특성은 Table 4에 그리고 하중조건은 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Material Properties of roof concrete

	Concrete	Reinforcing Steel
탄성 계수 (psi)	4.65E+06	28.5E+06
포아송 비	0.18	-
Density (lb / in ³)	-	0.00073386

Table 5 Load cases of concrete roof

Load Case	Self Weight	Live Load	Deck Weight	Accessory	Gas Pressure	Snow	Wind
1					○		
2	○						
3	○	○	○				
4	○	○			○		
5	○	○	○	○	○		
6	○	○	○	○	●	○	
7	○	○	○	○	○	○	
8	○	○	○	○	●		○
9	○	○	○	○	○		○
10	○	○	○	○	○	○	○

Concrete Roof는 Steel Roof와 중첩 구조 형식의 거동 특성을 가지므로 해석에 적용된 하중은 Steel Roof의 해석 수행 결과 값을 Concrete의 하중값으로 적용하여 해석을 수행 하였다. 수행된 LNG 저장 탱크 dome section의 변위 해석결과를 살펴보면 전반적으로 가스압을 포함한 하중 조합이 dome의 positive 방향으로, 자중을 포함한 기타 사하중 조합이 negative 방향으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 예상과 같이 hole 단면의 변위가 크게 발생하였다. 가스압이 내부에

서부터 외부로 분출되는 경우(positive pressure)에는 일반적으로 처짐이 1.1163E-04~9.0345E-04 mm 정도로, 전반적으로는 그 처짐값들이 비슷하게 나타났다. Gas pressure가 내부로 작용할 때 (negative pressure)는 처짐이 self weight 하중조합과 결합되어 LNG 저장 탱크 dome section에 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 또한 가스압으로 인해 외부로 처짐이 발생한 경우, accessory 하중에 의해 dome부분이 약간 내부로 들어간 것을 볼 수 있다. 그러므로 하중 조합에 대해 고려할 때, 가스압력의 영향이 크게 작용하지만 Accessory 하중도 dome section의 변형에 영향을 미치는 주요인자로 고려되어야 한다고 판단된다. Dome section에서 가스압과 자중 등의 하중 조합이 큰 영향으로 작용하여, Mises 응력은 전체적으로 hoop방향으로 응력분포가 발생하였다. 이것은 하중조합이 고루 전체적으로 분포되어 작용하기 때문이고, roof를 요소로 모델링하였으므로 각 요소의 응력이 평균값들을 나타내기 때문이다. 가스압을 포함한 하중조합일 경우 응력이 hoop 방향으로 고루 분포된 것을 볼 수 있으며, 이에 반해 자중과 기타 하중 조합의 경우는 dome section의 중심과 hole 부분과 같은 국한된 부위에 응력이 분포되는 현상을 볼 수 있다. 또한 일반적으로 hole 부분에서 강하게 응력 집중 현상이 나타난다. 이것은 안전성 검토를 시행하면 보통 hole section이 취약한 것으로 판정된 것을 보면 알 수 있다.

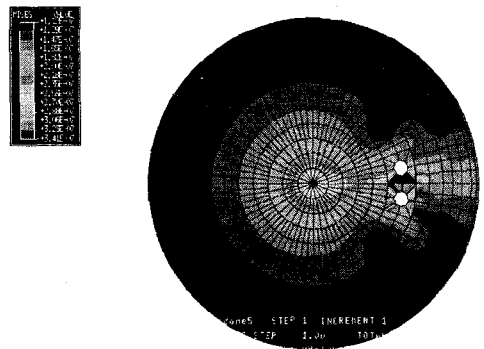


Fig. 6 Stress of Concrete Roof (Load case 3)

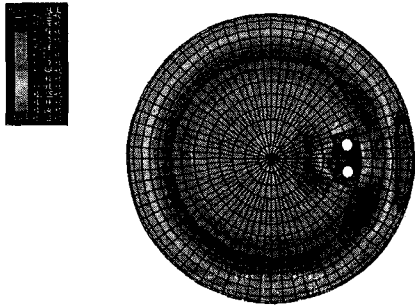


Fig. 6 Stress of Concrete Roof (Load case 3)

5. 결론

대용량 LNG 저장탱크에 적합한 Roof를 설계하기 위하여 필요한 기본적인 구조 해석을 수행하였다. 국내에는 아직까지 설계기준이 확립되어 있지 않으므로 영국의 BS7777 기준에 따른 하중조합에 따라 해석을 실시하고 안전성을 검토하였다. 해석대상은 최근 한국가스공사에서 설계 국산화에 성공하여 통영 LNG기지에 건설될 예정인 탱크에 대하여 실시하였다. Steel roof frame에 대해서는 SAP2000을 사용하여 해석을 실시하였고 콘크리트 roof에 대해서는 ABAQUS를 이용하였다. 먼저 Steel Roof에 대한 해석을 수행하여 각 하중조건 하에서 Roof Flame 및 Plate의 안전성을 검토한 결과 모든 조건하에서 안전성을 확인할 수 있었다. 또한 이때 얻은 Steel Roof의 변형값을 Concrete Roof 하중조건에 적용하여 해석을 실시하였고 예상한 바와 같이 Concrete Roof의 hole 부분에서 강한 응력집중 현상이 나타남을 알 수 있었다. 따라서 이들 부분에 대해서는 다른 단면에 비해 보강을 더 고려해야 함을 판단할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 1993, "Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service-BS7777"
- (2) 1996, "Standard for the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas-NFPA"
- (3) 1997, "Structural Use of Concrete - BS8110"
- (4) Japan Gas Association Committee, 1979,

"Recommended Practice for LNG Inground Storage Tank"

(5) Haruhito Okamoto "The Design Method of Inground LNG Storage Tank"Nippon Kokan Technical Report, 1984, pp.515~522"

(6) Hideo Watanabe "Construction of Concrete Roof of LNG Inground Storage Tank" Nippon Kokan Technical Report, 1990, pp.70~77"