

완전 밀폐형 PC 구조물의 누설 안전성에 관한 연구

†김 청 균 · 조 승 현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
(2001년 11월 5일 접수, 2001년 12월 20일 채택)

A Study on the Leak-Proof of Full Containment Type Prestressed Concrete Structure

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

(Received 5 November 2001 ; Accepted 20 December 2001)

요 약

내부탱크의 파손에 따른 외부탱크의 누설 안전성을 검토하기 위해서 PC 구조물의 누설 저지효과에 대해 고찰하고자 한다. 이러한 누설 안전성 해석은 완전 방호식의 PC 구조물로 제작된 외부탱크가 내부탱크로부터 유입된 -162°C 의 초저온 액체에 의해 파손될 것이라는 가정을 하고, BS 7777에서 규정한 잔류압축구간의 개념을 도입하여 누설 안전성을 예측하였다. 계산된 결과에 의하면 PC 구조물로 제작된 외부탱크가 10% 잔류압축구간이 설치될 경우 -162°C 초저온 액체에 의해 누설된 총시간은 215시간(약 9일) 걸리는 것으로 해석되었고, 내부탱크에 설치된 주펌프 3대($330\text{m}^3/\text{hr}$ 송출용량)를 가동하면 $140,000\text{m}^3$ 규모의 LNG를 이웃 저장탱크에 이송하는데는 6일정도 걸리기 때문에 최소한 수치적으로는 안전하다는 결과이다.

Abstract - This paper presents safety analysis of LNG leakage in a prestressed concrete outer tank, which is strongly related on the leak checking effects of the PC structure with and without a residual compression zone based on the BS 7777 codes. The full containment type outer tank which is constructed by a prestressed concrete may be destroyed by leaked cryogenic fluids.

The FE calculated results show that the total leak checking time of the PC structure with 10% residual compression zone is about 9 days for -162°C liquids. But, three primary pumps in an inner tank may operate to send cryogenic fluids for 6 days, which are stored in an inner tank of $140,000\text{m}^3$ capacity. This means that the prestressed concrete outer tank may be safe for -162°C cryogenic fluids leaked from the demolished inner tank.

Key words : LNG, Storage tank, Cryogenic fluids, Leakage, Prestressed concrete

1. 서 론

LNG와 같이 -162°C 의 초저온 액체를 저장하기 위해서는 초저온 온도하중과 유체정압에 견딜 수 있는 구조물은 충분한 안전성을 확보해야 한다. 최근 초저온 저장탱크가 보통

$100,000\text{m}^3$ 이상의 초대형으로 건설되고 있다는 사실을 고려하면 어떠한 상황에서도 저장탱크에서 발생하는 누설 안전성은 완벽하게 확보되어야 한다.

저장탱크에 대한 누설 안전성은 내부탱크(inner tank)에 의해 보장되지만, 저장탱크 시

스텝 측면에서 보면 내부탱크가 파손될 경우에 대한 안전대책이 있어야 한다는 것은 분명하기 때문에 초기에는 방류둑(dike)이라는 일종의 댐을 저장탱크의 외곽에 설치함으로써 저장탱크 파괴에 따른 누설 안전성을 확보하려고 하였다. 그러나, 이러한 누설 안전성 확보는 저장탱크의 초대형화와 저장탱크의 파손에 따른 냉열에 의한 초저온 피해가 주변에 큰 영향을 미치기 때문에 최근에는 저장탱크를 완전 방호식(full containment type)으로 건설되는 경향이 있다.

결국, 저장탱크를 내부탱크와 외부탱크(outer tank)의 개념으로 설계하여 내부탱크의 파손에 따른 누설문제를 외부탱크가 모두 하중을 지지한다는 1차적 기능성으로 설계되었지만, 현실적으로는 내부탱크 파손에 따른 누설 안전성까지도 부분적으로 담당해야 하는 설계 개념이 도입되고 있다. 이러한 측면에서 외부탱크를 구조물의 강도측면보다는 -162°C 액체가 누설되면서 발생할 수 있는 열평형성(thermal equilibrium) 해석을 수행하고자 한다.

지진, 롤오버 현상, BOG 발생, 잘못된 설계, 누후화와 운전실수 등으로 저장탱크가 붕괴되는 최악의 상황이 발생되어 초저온 액체를 저장하고 있는 내부탱크가 파손하게 되면, 저장탱크는 각종 안전장치와 주펌프(primary pump)에 의해 신속하게 주변의 저장탱크로 송출하게 된다. 그러나, 이러한 프로세스가 안전하게 진행되기 위해서는 완전 방호식의 외부탱크 PC 구조물이 일정 시간동안 체류시켜야 한다. 따라서, 본 연구에서는 $140,000\text{m}^3$ 의 초대형 저장탱크가 누설된 LNG를 안전하게 임시 저장할 수 있는 시간을 열적평형 유한요소해석 방법^[1]으로 고찰하고자 한다.

2. 외부탱크의 누설 안전성 해석

내부탱크가 파손되는 긴급 상황에서는 누설된 LNG 액체가 1차적으로 단열재 기능을 파손하고, 2차적으로 내부탱크로부터 유출된 LNG 액체와 증발가스는 외부탱크인 PC 구조물에 영향을 미치게 되어 콘크리트 구조물의 누설 안전성을 손상하게 된다.

즉, 내부탱크가 파손되어 -162°C 의 초저온 액체가 PC 구조물로 제작된 외부탱크에 초

저온 액체가 접촉하고 콘크리트 구조물의 내부로 침투하게 되면서 PC 구조물은 파손되고, LNG의 누설은 진행된다. 따라서 본 연구에서는 PC 구조물의 열변형 거동특성의 개념으로 외부탱크 구조물의 두께를 따라서 발생하는 온도평형과 이에 따른 누설에 걸리는 시간을 해석하여 외부탱크 시스템의 안전성을 고찰하고자 한다.

완전 방호식의 PC 구조물에 대한 누설 안전성을 열평형의 개념으로 해석하는데, BS 777 Part 8에서 제시하고 있는 최소잔류평균 압축응력 $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 을 만족해야 한다는 규정에 따라 설계한 외부탱크에 대한 해석이다.^[2] 여기서 고려한 완전 방호식 저장탱크에서 콘크리트 두께의 10%(두께가 1,100mm를 갖는 $140,000\text{m}^3$ 규모의 저장탱크에서는 최소압축 구간이 100~160mm임)에 해당하는 잔류압축 구간(residual compression zone)을 PC 구조물에 확보해야 안전하다고 한다. 이러한 기준에 따라 본 연구에서는 정상상태에서 열적평형에 도달하는 시간, PC 구조물이 파손되면서 누설에 걸리는 시간, 잔류압축구간을 도입한 누설 안전에 대해 해석하고자 한다.

3. 해석조건 및 해석모델

3.1. 해석조건

LNG 저장탱크에서 외부탱크는 공기와 접하고, 내측에서는 베이퍼 배리어(vapor barrier)와 접하고, 이어서 단열재와 접하는 형태로 제작된다. 완전 방호식으로 제작된 외부탱크는 1차적으로 구조물의 하중을 지지해야 하고, 부분적으로는 누설된 LNG를 일정 시간 체류시켜야 하는 밀봉 안전성도 확보하고 있어야 한다.

외부탱크가 누설된 LNG에 의해 파괴되지 않을 것이라는 안전성을 규명하기 위해서는 실험을 수행하는 것이 타당하지만, 현실적으로 어렵기 때문에 수치적 모델링 기법으로 다음과 같은 몇가지 전제조건에 기반하여 저장탱크의 누설 안전성을 해석하고자 한다.

3.1.1. 가정

- PC 구조물에서 발생할 수 있는 누설특성을 해석하기 위해서는 외부탱크의 기하학적 형상이나 콘크리트 구조물의 내부에 상존하는 크랙, 각종 결함이나 기공, 불순물 함유

정도, 철근의 배열조건, 각종 부속장치의 설치로 인한 비대칭성과 불완전 특성을 모두 고려해야 하나 본 연구에서는 유한요소해석 기법의 특성상 외부탱크 PC 구조물의 재질이 균일하다고 이상화하였다.

- PC 구조물이 불완전해도 모델링 측면에서 강도해석은 문제가 없으나, PC 구조물의 두께 벽면을 따라서 발생하는 -162°C 의 초저온 액체에 의한 누설 문제를 해석하기 위해서는 잔류압축구간의 개념을 도입하는 것이 바람직하다. 이것은 BS 7777 Part 8에서 제시한 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 의 기준을 따른 것이고, 일본에서는 정부, 학계, 가스업체의 전문가들이 공동으로 제시한 100mm를 기준으로 Obayashi Corp.는 통영인수기지의 외부탱크 설계에 잔류압축구간을 도입한 사례가 있다.

- 외부탱크의 누설 안전성에 대한 파손 개념은 초기에 콘크리트 구조물의 좌·우측에 초기의 안정화된 온도구배가 존재하다가 누설된 초저온 액체(LNG)가 빠져나가면서 PC 구조물의 좌우측면에 불안정성 증가에 따른 새로운 열평형을 이루면 누설이 발생된 것으로 가정한다.

3.1.2. 해석변수

내부탱크에 저장된 LNG 액위(liquid level)와 계절에 따라 적용된 외부탱크 외측벽면의 공기온도를 Table 1에서 제시하고 있다.

3.2. PC 구조물의 열평형 해석모델

3.2.1. 해석모델

140,000 m^3 규모의 LNG 저장탱크 측벽면을 중심으로 PC 구조물의 외부탱크 [1], 단열재 [2]~[4], 9% 니켈강재 내부탱크 [5]에 대한 유한요소해석 모델을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 여기서 내부탱크에 저장된 LNG 액체가

운전중에 파손되어 누설이 발생하면 누설된 LNG는 온도 센서에 의해 감지되고, 내부탱크에 설치된 주펌프(primary pump)는 LNG를 인접한 저장탱크에 이송한다. 저장탱크에 설치된 각종 안전장치가 작동하는 과정에서 누설된 LNG는 바닥면에서 5m까지 설치된 9% 니켈강재의 코너 프로텍션(corner protection)에 의해 1차적으로 누설이 차단되지만, 내부탱크로부터 누설된 초저온 액체가 코너 프로텍션 높이를 넘거나 파손하게 되면 단열재는 서서히 파손된다. LNG의 지속적인 누설은 외부탱크의 내벽측에 설치된 베이퍼 배리어에 의해 지연 또는 차단되다가 PC 콘크리트 구조물이 LNG에 의해 직접적으로 침입을 받게된다.

누설된 LNG 액체가 PC 구조물에 침입하면서 외부탱크는 서서히 파손하지만 외부탱크를 BS 7777에 따라서 설계된 PC 구조물은 최소 100mm 이상의 잔류압축구간을 확보해야 하므로 이곳에서 LNG의 누설은 적극 차단된다.

3.2.2. 해석 데이터

외부탱크의 누설 안전성에 대한 수치해석을 수행하기 위해 필요한 PC 구조물과 9% 니켈강재에 대한 기계적 특성치와 열적 특성값을 Table 2^[3]에서 제시하고 있다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1. PC 구조물의 누설 안전성 해석

내부탱크가 파손됨 따라 누설된 초저온 액체에 의해 1차적으로 단열재가 기능을 상실하고, 이어서 외부탱크 PC 구조물의 내측벽이 -162°C 의 LNG 액체가 직접 접촉하게 된다. 외부탱크의 외측면이 35°C 의 공기와 접촉

Table 1. Air temperature depending on the LNG liquid level and the environment.

LNG Liquid Level, m	Summer Air Temperature, $^{\circ}\text{C}$	Winter Air Temperature, $^{\circ}\text{C}$
5	35	-5
10	35	-5
15	35	-5
20	35	-5
25	35	-5
30	35	-5

하는 경우에 PC 구조물의 두께 방향으로 PC 내부의 열평형 상태를 해석한 결과를 Figs. 2~3에서 제시하고 있다. 여기에 제시된 해석 결과는 PC 구조물의 내측면에 -162°C 의 초저온 액체가 접하는 경우 정상상태의 열평형에 도달하는데 걸리는 시간이다. 즉, 외부탱크를 통하여 직접 누설되는 것이 아니라 초저온 액체가 차단되어 열평형에 도달된 안전한 상태를 의미한다.

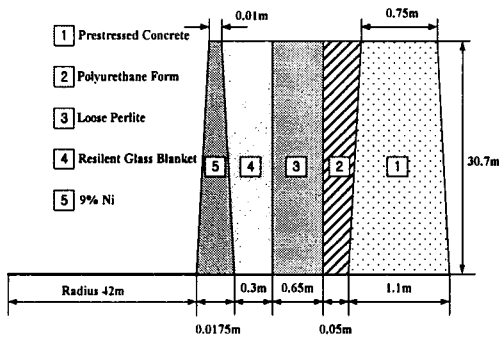


Fig. 1. Analysis model of LNG storage tank structure.

Table 2. Mechanical and thermal properties of PC structure.

	PC
Young's modulus, Pa	3.04006×10^{10}
Poisson's ratio	0.2
Mass density, kg/m^3	2,500
Thermal expansion coefficient at -200°C , $\mu\text{m/m} \cdot \text{K}$	10×10^{-6}
Thermal conductivity, $\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$	2.0
Specific heat, $\text{kcal/kg}^{\circ}\text{C}$	0.2

Fig. 2는 LNG의 액상 높이가 측벽면 높이의 97.7%인 30m 높이까지 모두 차 있다고 가정할 경우에 저장탱크 측벽면의 중간 부근인 15m에서 관찰한 열평형 해석 결과이다. 정상상태(steady state)에 도달한 열평형 해석결과에 의하면 PC 구조물의 내측벽면에는 -162°C 의 초저온 액체가 접하고, 외측벽면에는 35°C 의 공기와 접한다고 가정할 경우에 열평형은 100hr 정도 지나야 안정화된 정상상태에 도달한다. 그러나, Fig. 2에서 제시한

데이터처럼 약 50시간 지나면 PC 구조물은 이미 근사적 열평형 상태에 도달하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 LNG 액체가 측벽면 높이의 97.7%인 30m 높이까지 차 있다고 가정할 경우에 대한 열평형 해석 결과로 콘크리트 저장탱크의 상단부에 해당하는 외부탱크 PC 구조물은 100 시간이 지났는데도 아직 정상상태에 도달하지 않은 비정상 상태에 있다.

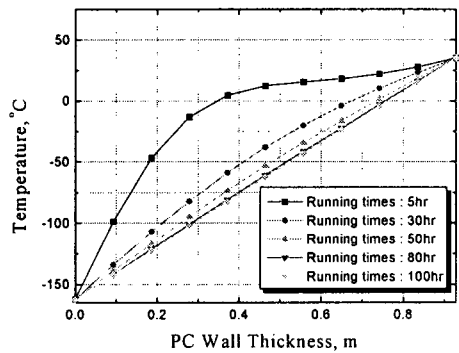


Fig. 2. Temperature profiles of prestressed concrete wall at the 15 meter height.

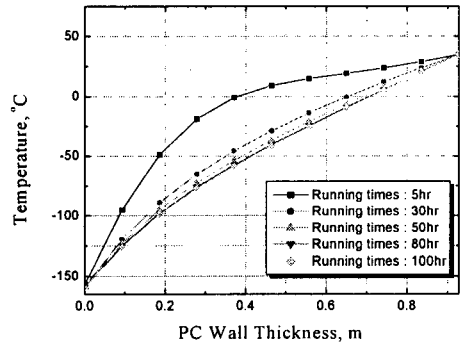


Fig. 3. Temperature profiles of prestressed concrete wall at the 30 meter height.

여기서 측벽면의 높이가 30m라는 것은 내부탱크의 최상단부로 아직도 -162°C 의 초저온 액체가 접하는 위치이다. 결국, LNG 액위가 30m인 지점에서 누설이 발생할 경우가 15m 위치에서 누설이 발생하는 것보다 누설에 걸리는 시간이 더 길어진다.

4.2. 잔류압축구간이 포함된 PC 구조물의 누설 안전성 해석

4.2.1. 해석모델

외부탱크를 완벽하게 제작된 PC 구조물로 볼 수가 없기 때문에 잔류압축구역이라는 개념을 도입하여 초저온 액체에 의한 누설 차단성을 검토하는 기준으로 삼고자 한다. BS 7777에서 규정한 1.0N/mm^2 을 만족하기 위해서는 $140,000\text{m}^3$ 의 초대형 저장탱크에 대한 최소한의 잔류압축구간이 100mm 이상이 되면 PC 구조물은 완벽하게 건설된 것이다. 이러한 안전구간 100mm는 외부탱크 바닥면 두께가 1,100mm인 PC 구조물의 약 10%에 해당하는 값이다.

Fig. 4는 외부탱크의 PC 구조물을 나타낸 모델로 LNG 누설에 관련된 안전설계 개념으로 도입된 잔류압축구간 모델을 보여주고 있다. 즉, 내부탱크의 파손으로 유입된 -162°C 의 초저온 액체가 PC 구조물의 내측벽면에 직접 접촉하였다가 PC 구조물에 상존하는 내부 크랙이나 각종 결함을 따라서 누설될 수 있는 불완전한 벽면 W_1 의 두께를 따라 누설된다는 것은 초저온 액체가 열적평형 상태에 도달하는 시간을 계산하면 된다.

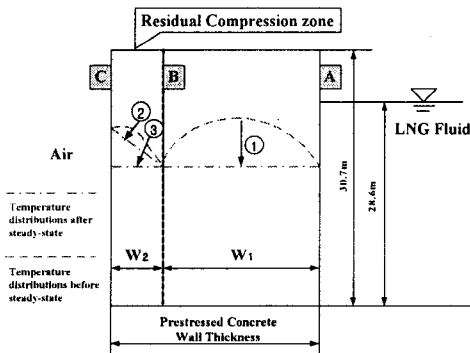


Fig. 4. Leak-proof analysis model of the prestressed concrete structure with a residual compression zone.

결국 누설된 LNG 액체는 A에서 B로 이동한 누설상태를 보여준 열적 평형해석이 ①에 해당하는 것이고, -162°C 의 초저온 액체가 B에서 다시 완벽한 PC 구조물 압축구간인 W_2 두께를 통과하는데 걸리는 시간을 정

상상태의 열평형 개념으로 해석한 것이 ②에 해당한다.

즉, 내부탱크로부터 누설된 -162°C 의 초저온 액체가 PC 내부 B에서 35°C 의 대기온도 C로 도달하면 Figs. 2와 3에서 제시한 것처럼 정상상태의 열평형 조건인 ②에 도달한다. 그러나, 열적으로 안정된 평형상태 ②에서 다시 불안정한 LNG의 누설이 발생되어 외부탱크 벽면의 최초 대기온도인 35°C 가 -162°C 로 변하는 상태, 즉 -162°C 의 누설 액체가 이동한 상태로 가게되면 압축구간 W_2 두께도 -162°C 의 초저온 액체가 통과되어 누설되었다고 가정되는 ③의 누설 불안정 해석모델이 된다. 이러한 ①, ②, ③의 열적 평형상태에 도달하는 시간을 계산한 결과치가 Table 3과 4에서 각각 제시하고 있다.

본 연구에서는 PC 구조물에서 불완전 구간(A-B)과 완전 구간(B-C)의 개념으로 LNG의 누설과 차단이라는 문제를 잔류압축구간의 개념으로 해석하고, 이들 결과를 주펌프의 송출성능과 연계하여 외부탱크의 누설 안전성을 검토하고자 한다.

4.2.2. 해석결과

PC 구조물의 저장탱크에 채워진 LNG 높이가 28.6m이지만, 해석된 LNG 액위는 14.3m에 대하여 누설에 관련된 정상상태의 열평형 데이터를 획득하였다. Fig. 4는 PC 구조물로 제작된 외부탱크의 누설에 관련된 두 가지 패스모델 ①과 ②, ①과 ③으로 나누어 해석하였다.

- (1) 불완전 구간(A-B) W_1 에서 ①을 따라 누설하고, 잔류압축구간(B-C) W_2 에서 ②를 따라 누설이 지연된 모델

-162°C 의 초저온 액체가 불완전 구간인 W_1 의 두께를 따라서는 누설이 발생되지만, 잔류압축구간인 W_2 의 두께를 따라서는 누설이 차단되고 열적으로 평형상태를 이루고 있는 경우에 해당되는 해석 모델로, 이들의 해석결과를 Table 3에서 제시하고 있다. 여기서 PC 구조물의 외부탱크 두께가 1,100mm인 경우는 잔류압축구간이 10%에 해당하는 110mm를 완벽한 잔류압축구간으로 계산한 것이고, 15%는 165mm의 잔류압축구간에 해당된다는 것을 각각 의미한다. 이것은 PC 구조물에서 균일한 재질특성을 갖는 완벽한

Table 3. Required time for checking the LNG leakage along the leak path model, ① and ②

With Residual Compression Zone		Without Residual Compression Zone		Wall Thickness of Outer Tank
Compression Zone Ratio, % [$W_1 / (W_1 + W_2)$] × 100	Leak Checking Time, hr (②)	Compression Zone Ratio, % [$W_1 / (W_1 + W_2)$] × 100	Leak Checking Time, hr (①)	Total Leak Checking Time, hr (① + ②)
10%(=110mm)	15	90%(=990mm)	209	224
15%(=165mm)	28	85%(=935mm)	187	215

PC 구조물 두께를 잔류압축구간으로 정의할 수 있어서 기계적 강도뿐만 아니라 LNG 누설을 완벽하게 차단할 수 있는 구간을 의미한다.

BS 7777에 의거 계산된 140,000m³ 규모의 초대형 저장탱크에서 잔류압축구간(최소한 완벽한 두께)이 100~165mm라는 점을 고려하면, 최악의 경우는 W₁ 구간에서 누설이 발생되고, 잔류압축구간 W₂에서는 누설에 필요한 정상상태 시간이 최소한 15~28시간 정도 걸리는 안전성을 보여주고 있다. 그러나, 불완전 구간(A-B) W₁에서 ①을 따라 누설되고, 잔류압축구간(B-C) W₂에서 ②를 따라 안정화된 누설차단 또는 지연 모델에 대해 계산된 전체 누설지연시간은 224~215시간으로 누설된 LNG를 저장·체류할 수 있는 지연시간을 확보하고 있다.

(2) 불완전 구간 W₁에서 ①을 따라 누설되고, 잔류압축구간 W₂에서 ③을 따라 누설이 진행된 모델

내부 결함이 존재하는 불완전 구간인 W₁의 두께를 따라서는 초저온 액체가 누설되고, 또한 완전하다는 잔류압축구간 W₂의 두께를 따라서는 누설이 발생하는 최악의 상황이 발생하는 경우에 대한 불안정 모델, 즉 외부탱크가 모두 파손되는 긴급상황에 대한 누설 해석 모델로 이들의 해석결과를 Table 4에서 제시하고 있다.

초대형 저장탱크 140,000m³ 규모의 저장탱크에서 최소 잔류압축구간 W₂가 BS 7777에 의거 100~165mm라는 점을 고려하면, 외부탱크 모두가 파손되는 최악의 경우는 누설에 필요한 최소시간 동안에도 안전한 잔류압축구간 W₂에서는 6~10시간 정도 걸리고 PC 구조물의 불완전 구간인 W₁에서는 209~187

시간 정도 걸리는 것으로 예측된다. 결국 PC 구조물이 초저온 액체에 의해 누설되는데 걸리는 총시간은 215~197시간이 된다.

그러나, LNG 저장탱크에서 누설이 발생하게 되면 1차적으로 단열재에 의한 누설 지연효과가 발생하고 동시에 온도센서에 의해 누설이 감지된다. 이어서 PC 구조물이 불완전하다는 W₁ 구간에서 누설된 초저온 액체의 누설 차단효과가 발생된다. 동시에 9% 니켈강으로 제작된 5m 높이의 코너 프로텍션에 의해 누설된 초저온 액체가 모두 채워지는 2차 누설 지연시간 등을 고려하면 내부탱크에서 누설된 초저온 액체가 누설 차단 또는 지연효과 의한 지연시간은 충분히 더 연장될 것으로 예상된다.

요약하면, PC 구조물인 외부탱크가 LNG를 누설하는데 필요한 총시간은 잔류압축구간이 10%(110mm 구간)인 외부탱크 PC 구조물을 고려할 경우는 최악의 누설 상황인 W₂의 잔류압축구간에서는 6시간, 불완전한 구간인 W₁에서는 209시간 걸린다는 해석결과를 Table 4에서 제시하고 있다. 결국 110mm의 잔류압축구간을 갖는 PC 구조물에서 누설하는데 필요한 최소시간은 215시간(약 9일) 걸리는 것으로 예측된다.

(3) 누설 안전성 요약

내부탱크에서 누설이 발생되면 1차적으로 단열재 구간에서 온도센서에 의해 감지되고, 이어서 저장탱크에 설치된 각종 안전장치가 작동하게 되어 사전에 안전조치를 수행함으로써 LNG 저장탱크 시스템의 안전성이 확보되지만, 이러한 안전조치가 전혀 이루어지지 않은 경우라도 잔류압축구간을 외부탱크 두께의 10%(110mm)를 고려하면 누설하는데 걸리는 총시간이 215시간이라는 점이다.

Table 4. Required time for leaking the LNG fluids along the leak path model, ① and ③

With Residual Compression Zone		Without Residual Compression Zone		Wall Thickness of Outer Tank
Compression Zone Ratio, % [$W_1 / (W_1 + W_2)$] × 100	Leak Checking Time, hr (③)	Compression Zone Ratio, % [$W_1 / (W_1 + W_2)$] × 100	Leak Checking Time, hr (①)	Total Leak Checking Time, hr (① + ③)
10%(=110mm)	6	90%(=990mm)	209	215
15%(=165mm)	10	85%(=935mm)	187	197

누설된 LNG가 PC 구조물의 내부에서 누설이 진행되는 체류시간 동안에 내부탱크에 설치된 3대의 주펌프로 LNG를 인접 저장탱크에 이송하는 안전조치를 이행할 수 있는 시간을 충분히 갖게 된다. 내부탱크에 설치된 3대의 주펌프로 140,000m³ 규모의 저장탱크를 모두 비우는데 필요한 시간은 약 144시간(6일) 정도이기 때문에 잔류압축구간이 10%인 경우에 대한 해석결과가 215시간이므로 약 3일 정도의 체류 지연시간을 더 확보하고 있다. 결국, 외부탱크의 누설차단 또는 체류기능은 최소한 확보되었다고 예측되므로 설계측면에서 보면 안전하다.

그러나, 외부탱크의 누설을 효과적으로 차단하고, 보증할 수 있는 잔류압축구간 100~165mm를 확보하지 못하거나 불완전한 구간인 W₁에 콘크리트 타설이 불량하게 제조되면 앞에서 해석된 데이터는 신뢰성을 잃게된다.

5. 결 론

LNG를 안전하게 저장하고 관리하기 위해서는 저장탱크를 설계할 당시부터 안전규격이나 기준에 따르고, 저장탱크에 대한 누설 안전성을 충분히 확보해야 한다. 즉, 외부탱크인 PC 구조물은 원래 강도를 담당하는 것이지 증발가스나 초저온 액체의 누설을 차단하는 역할을 수행하는 것이 아니기 때문에 재질이 금속처럼 균일한 밀도를 갖지는 않으나 내부탱크가 파손될 경우는 방류둑(dike) 역할을 수행할 수 있는가에 관심을 갖고 있다. 그래서, 본 연구에서는 내부탱크의 파손에 따른 외부탱크인 PC 구조물의 누설 안전성을 검토하기 위해서 PC 구조물의 누설 차단효과, 즉 체류효과에 대하여 고찰하고자 한다.

안전 방호식의 PC 구조물로 제작된 외부탱크의 바닥면이 1,100mm일 경우에 외부탱크가 BS 7777 규정을 만족하는 10%(110mm에 해당)~15%(165mm에 해당) 구간에서 초저온 액체에 의한 누설이 발생할 수 있다는 최악의 누설조건을 해석하면 최소 6~10시간 정도 걸리고, 불완전하다는 90%~85% 구간에서도 209시간과 187시간이 각각 걸린다. 즉, 1,100mm 두께의 PC 구조물로 제작된 외부탱크가 10% 잔류압축구간을 갖는 경우는 -162℃ 초저온 액체의 누설에 의해 걸리는 총시간이 215시간(약 9일) 걸리는 것으로 해석되었다.

140,000m³ 규모의 내부탱크가 파손되어 외부탱크가 초저온 액체를 잠시 체류시키는 동안에 내부탱크에 설치된 주펌프 3대(송출용량 : 330m³/hr)를 가동하여 내부탱크에 있는 LNG를 이웃 저장탱크에 이송한다고 가정하면 6일정도 걸리기 때문에 앞에서 계산된 9일은 안전하다. 여기에 내부탱크가 파손함에 따라 초저온 액체의 단열재에 의한 지연시간과 9% 니켈강재로 제작된 5m 높이의 코너프로텍션에 의해 누설된 액체를 1일정도 더 저장할 수 있다는 사실을 고려하면 수치적으로 안전하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. "MARC User's Manual," Ver. 6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
2. BS 7777 Part 8, pp. 16, 1993.
3. 지상식 일체형 LNG 저장탱크 기술기준, 한국가스공사, November 1999.