

LNG 탱크의 극저온 온도응력을 고려한 수밀성 설계방법 비교 연구

A Study on the Liquid Tightness Design of LNG Tank Incorporating Cryogenic Temperature-induced Stresses

전 세 진* 김 영 진** 정 철 현*** 진 병 무* 김 성 운**
Jeon, Se Jin Kim, Young Jin Chung, Chul Hun Jin, Byeong Moo Kim, Seong Woon

ABSTRACT

In a design of LNG storage tank, one of the major loading conditions that significantly affects liquid tightness of the outer concrete wall is the cryogenic temperature of LNG under the emergency condition of LNG leakage. Proposed in this study are the more consistent procedures to ensure the liquid tightness of LNG tank focusing on the design of prestressing tendon. It is expected that the proposed schemes lead to a more effective serviceability design of LNG tank that satisfies various requirements for the liquid tightness in an efficient manner.

1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas; 액화천연가스)는 천연가스를 약 $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각하여 액화시킨 것이다. 그림 1은 국내에 건설된 완전방호식(full containment type) 지상식 LNG 탱크의 구조를 보여주고 있다. LNG가 내조로부터 누출되어 단열재에 스며드는 사고가 발생했을 경우 외조에는 급격한 온도변화로 인한 큰 단면력 또는 응력이 발생하게 되며, 이는 균열을 유발하고 수밀성(水密性)을 저하시킬 수 있다.

극저온에 노출된 벽체의 수밀성을 합리적으로 평가하기 위해서는 극저온시 콘크리트의 물성 변화를 고려하여 온도해석 및 열응력해석을 수행해야 하며 또한 수밀성에 관련된 각종 설계기준들에 대한 부합성을 검토해야 한다.

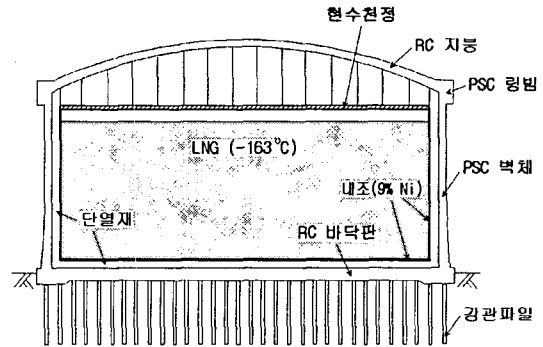


그림 3 완전방호식 지상식 LNG 탱크

* 정회원 · 대우건설기술연구소 토목연구팀 선임연구원
** 정회원 · 대우건설기술연구소 토목연구팀 수석연구원
*** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수

본 연구에서는 일반 유체저장탱크의 수밀성 설계와 비교하여 LNG 탱크 설계시 차별화될 수 있는 점들을 고찰하고, LNG 탱크의 프리스트레스트콘크리트(PSC) 벽체의 수밀성을 확보할 수 있는 합리적인 절차를 원환방향 프리스트레싱 텐던(이하 원환텐던)의 설계에 중점을 두어 제안하였다.

2. LNG 탱크의 수밀성 관련 설계기준

2.1 여유압축응력

여유압축응력은 프리스트레싱 텐던에 의해 도입된 압축응력 중 주요 설계하중을 상쇄하고도 남아 있는 여분의 압축응력이다. 이는 건조수축이나 온도변화 등에 대비하는 역할을 하며, 설계기준에 따라 10~20 kgf/cm² 이상의 여유압축응력을 도입하도록 하고 있다^{1,2)}.

2.2 여유압축구간

여유압축구간은 설계하중이 작용할 때에도 콘크리트 단면내에서 압축상태를 유지하고 있는 구간의 크기를 의미한다. 예를들어 prEN 265002³⁾의 경우 10 cm의 여유압축구간을 규정하고 있다. 이는 단면을 관통하는 균열을 방지한다는 의미에서 수밀성 확보와 중대한 관련이 있다.

2.3 균열폭

균열폭 규정은 유체저장탱크 뿐 아니라 일반 구조물의 사용성 평가에 가장 흔히 사용되어왔던 기준이며, 균열폭 계산방법 및 허용균열폭은 설계기준별로 차이가 큰 편이다. 허용균열폭의 경우 유체저장탱크나 PSC 구조에서는 보다 엄격한 기준을 적용하고 있는 예가 많다.

3. LNG 탱크의 수밀성 설계

3.1 수밀성 설계의 비교분석

유체저장탱크의 수밀성이나 기밀성을 확보하려면 위에서 언급된 여유압축응력, 여유압축구간 및 균열폭 규정을 함께 만족시키는 것이 바람직하다^{4,5)}. 이 중에서 여유압축응력은 텐던의 설계와 관련하여 가장 우선적으로 고려되어야 하는 사항이다.

기존의 LNG 탱크에서는 누출시 극저온에 의해 유발된 하중을 제외한 유체압, 내압 등의 설계하중을 상쇄하고 여유압축응력을 보유하도록 원환텐던을 설계하여 왔다(그림 2). 이 경우 LNG 탱크는 상온의 유체를 저장하고 있는 탱크의 텐던 설계와 동일한 절차를 따르게 된다. 이러한 기존 방법의 타당성 여부를 다음과 같이 고찰해 보았다. LNG의 누출 사고시 콘크리트 벽체는 LNG와 접하게 되므로 유체압과 더불어 극저온 온도하중이 작용하게 된다. 그런데, 텐던 설계시 유체압만을 고려하고 극저온 하중은 고려하지 않는 것은 실제 상황을 반영하지 못하며, 또한 모든 설계하중을 상쇄하고 추가의 압축응력을 도입한다는 여유압축응력의 본래의 의미에서도 벗어난다. 만약, 온도변화에 대비한다는 여유압축응력의 본래 개념을 확대해석하여 온도변화에 LNG의 극저온까지 포함된다면 본 방법이 옳지만, 원래 여유압축응력 규정은 상온 유체저장탱크 설계기준에서 비롯되었음을 고려할 때 여기에서 온도변화는 외

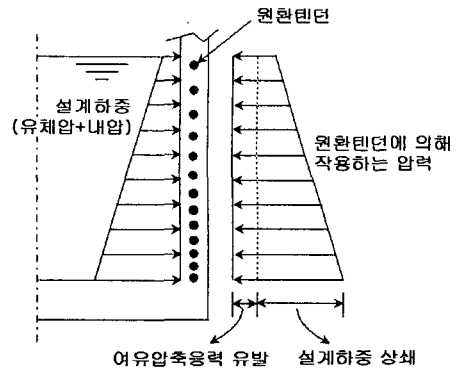


그림 2 LNG 탱크의 전형적인 원환텐던 배치

기온에 의한 일상적인 온도변화를 의미한다고 보는 것이 타당하다.

따라서, 기존 방식과 차별화되는 대안으로서 고려해 볼 수 있는 LNG 탱크의 수밀성 설계방법은 누출시 극저온 하중을 포함한 모든 설계하중을 상쇄하고 여유압축응력을 보유하도록 원환텐던을 설계하는 것이다. 즉, LNG의 극저온 하중도 주요 설계하중으로 간주하는 것으로서 여유압축응력의 본래의 의미에는 부합하는 개념이다. 하지만 유체압이나 내압과 같은 설계하중은 하중분포가 명확하여 이를 상쇄하는 텐던 배치를 그림 2와 같이 예비설계 단계에서도 비교적 간단한 계산을 통하여 구할 수 있지만, 극저온의 영향은 다소 불규칙하여 수계산으로 구하기 어려우므로 정밀한 구조해석을 수행해야 하며 또한 이를 상쇄하도록 텐던을 배치하는 데에도 좀 더 고도의 기법이 필요하다. 일반적인 LNG 탱크 벽체의 두께는 50~100 cm에 이르므로 설계기준과 비교하여 과도한 여유압축구간이 형성되는 비경제적인 텐던 설계가 될 우려도 있다.

위에서 고찰하였듯 LNG 탱크의 경우 어떠한 설계 개념을 쓰더라도 나름대로의 단점을 가지고 있어 일관성있는 텐던 설계를 수행하기는 용이하지 않다. 그러나, 기존 연구⁵⁾를 참조한다면 누출시 LNG의 극저온 하중에 의해 여유압축응력이 모두 소실되더라도 여유압축구간 및 균열폭 규정을 만족시킬 경우 수밀성은 확보된다고 볼 수 있다. 따라서, 추가적인 수밀성 관련 규정만 만족된다면 기존의 방식과 같이 LNG 탱크의 원환텐던을 일반 유체저장탱크처럼 설계하는 방식도 타당하며, 설계의 간편성 면에서는 더 권장할 만하다고 사료된다. 이는 본래의 여유압축응력 규정이 의도하였던 원환방향의 풀(full) 프리스트레싱을 LNG 탱크 설계에서 부분(partial) 프리스트레싱 개념으로 바꾸어 적용시킨 것으로 볼 수 있다.

3.2 균열단면 해석

LNG 탱크 벽체는 휨모멘트 M 과 더불어 축력 N 이 작용하는 PSC 부재에 해당되므로 다음과 같이 외력을 분리하여 해석하는 것이 개념상 간편하다⁶⁾.

$$N = N_1 + N_2 \quad (1a)$$

$$M = M_1 + M_2 \quad (1b)$$

여기에서 N_1 및 M_1 은 감압하중(decompression force)이라 하여 프리스트레싱에 의하여 단면에 도입된 콘크리트의 압축응력을 0으로 만드는 가상적인 하중이다. N_1 및 M_1 에 대해서는 비균열단면 해석을 수행하고, N_2 및 M_2 에 대해서는 인장측 콘크리트를 무시하는 균열단면 해석⁶⁾을 수행한다. 균열단면 해석에서 구한 중립축의 압축측 깊이가 여유압축구간에 해당하며, 또한 균열폭 산정시 일반적으로 필요한 철근의 응력 역시 같은 해석에서 얻을 수 있다. LNG 탱크의 경우 식 (1)을 변형하여 다음과 같이 축력 및 모멘트를 분리하여 적용할 경우 여유압축응력 및 LNG의 극저온의 영향을 좀 더 명확히 할 수 있다.

$$N_2 = N_p + N_{pr} + N_t + N_e \quad (2a)$$

$$M_2 = M_p + M_{pr} + M_t + M_e \quad (2b)$$

식 (2)에서 N_p , M_p 는 텐던에 의한 단면력 중 외력에 의한 단면력(N_e , M_e)을 상쇄하는 부분이며 N_{pr} , M_{pr} 은 여유압축응력에 의한 단면력이다. 한편 N_t , M_t 는 LNG의 극저온에 의한 단면력이다. 기존 방식대로 LNG 탱크의 원환텐던을 설계할 경우 N_p 와 N_e , 그리고 M_p 와 M_e 가 각각 상쇄된다.

3.3 수밀성 설계절차 제안

이상의 논의에 근거하여 그림 3과 같이 수밀성을 고려한 LNG 탱크의 설계 절차를 제안하였다. 여기에서는 LNG의 극저온에 의한 외력과 기타의 외력을 분리하여서 여유압축응력은 기타의 외력에 대해서만 설계됨을 명확히 하였다. 주된 검토 순서는 먼저 여유압축응력을 설계기준 이상으로 도입한 후 여유압축구간 및 균열폭을 검토하는 식으로 진행된다.

4. 결 론

본 연구에서는 완전방호식 지상식 LNG 저장탱크의 합리적인 수밀성 평가 및 설계 절차를 고찰하였다. 기존 LNG 탱크의 수밀성 설계의 분석결과 일반적인 유체저장탱크와 동일한 방법론을 대부분 따르는 것으로 파악되었다. 이러한 방법론을 포함하여 LNG 탱크의 수밀성 설계시 적용될 수 있는 대안을 제안하고 각각의 장단점을 비교 고찰하였다. 여유압축응력의 개념에 있어 LNG 탱크와 일반 유체저장탱크와의 차별성 여부가 주요 논의 대상인 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 LNG 탱크 벽체의 수밀성과 벽체 텐던 설계와의 관련성에 중점을 두어 LNG 탱크의 수밀성 설계절차를 제안하였으며, 여기에서는 LNG의 극저온에 의한 단면력과 기타 외력에 의한 단면력을 분리해서 고려하고 부분 프리스트레싱 방식으로 설계하여 효율성을 도모하였다.

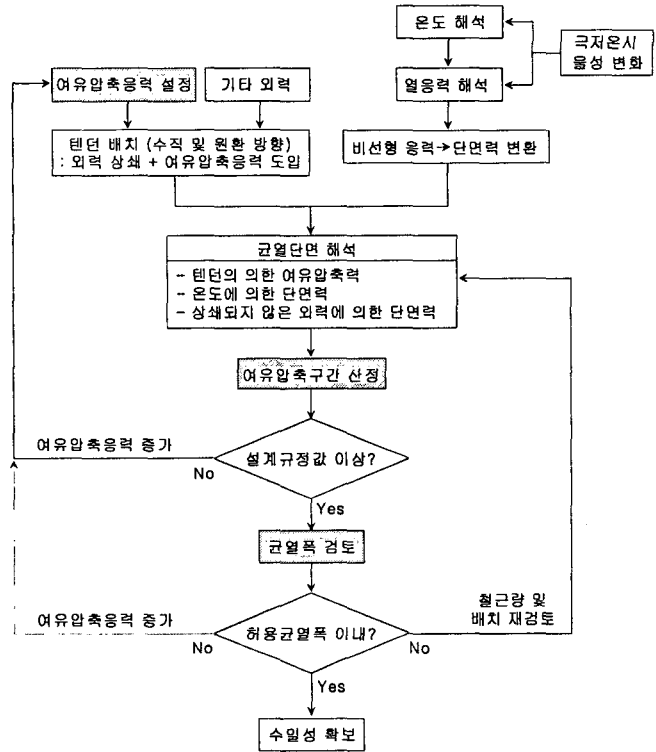


그림 6 LNG 저장탱크의 수밀성 설계절차

참고문헌

1. ACI 373R-97, "Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons," American Concrete Institute, 1997.
2. BS 7777, "Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service," British Standards Institution, 1993.
3. prEN 265002, "Specification for the Design, Construction and Installation of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures Between -5°C and -165°C," CEN TC 265, 2001.
4. Ghali, A. and Elliott, E., "Serviceability of Circular Prestressed Concrete Tanks," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 3, May-June 1992, pp.345-355.
5. Rashed, A., Elwi, A.E. and Rogowsky, D.M., "Reinforced, Partially Prestressed Concrete Water Tank Walls," *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 3, May-June 2002, pp.288-298.
6. Ghali, A., "Circular Storage Tanks and Silos," 2nd edition, E & FN Spon, 2000.