

열저항 효과를 고려한 멤브레인식 LNG 저장탱크의 누설 안전성에 관한 연구

† 김 청 균 · 조 승 현 · 서 흥 석 · 홍 성 호 · 이 승 림** · 김 영 규** · 권 부 길**

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

*한국가스공사 연구개발원

**한국가스안전공사 가스안전연구원

(2004년 8월 2일 접수, 2004년 9월 17일 채택)

On the Leakage Safety Analysis of Membrane LNG Storage Tank With Thermal Resistance Effects

C.K. Kim · S.H. Cho · H.S. Suh · S.H. Hong* ·
S.R. Lee** · Y.G. Kim** and B.K. Kwon**

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

**R&D Center, Korea Gas Corp.*

***Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corp.*

(Received 2 August 2004 ; Accepted 17 September 2004)

요 약

본 연구에서는 멤브레인식 LNG 저장탱크의 누설 안전성을 목재와 PUF로 구성된 단열재 및 예응력 콘크리트(PC) 재질이 균일하다는 가정하에 열저항 평형온도 효과를 고려하여 유한요소법(FEM)으로 해석하였다. FEM 계산결과에 따르면, 목재와 PUF로 구성된 단열재 구조물은 누설 LNG에 의해 구조물 자체가 먼저 파손되므로 누설 안전성을 보장할 수 없다. 그러나, 내부탱크와 단열재가 동시에 파손되어도 외부탱크 PC 구조물은 강도 안전성을 확보하고 있으므로 누설 LNG를 최소 10일 정도는 안전하게 지연시킬 수 있어 멤브레인식 LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성은 확보될 수 있다.

Abstract - In this paper, the FE analysis has been presented for the leakage safety of the membrane LNG storage tank based on the thermal resistance effects between the insulation panel and prestressed concrete structure. The FEM calculated results show that the leakage safety of plywood and polyurethane materials does not guarantee any more due to a strength failure of the insulation structure. But the PC structure of outer tank may delay leaked LNG of 10 days even though the inner tank and insulation structure are simultaneously failed. This means that the membrane LNG storage tank may be safe because of the stiffness of the outer tank.

Key words : Membrane, LNG, Outer tank, Plywood, PUF, PC

1. 서 론

액화천연가스(LNG)를 저장하기 위한 초저온 탱크에서 가장 중요한 시스템 안전성을 우선적

으로 확보하고 나면, 저장탱크 운영에 관련된 효율성, 유지보수성, 관리성 등이 그 다음으로 중요한 관심의 대상이다. LNG 저장탱크를 건설할 단계에서 건설비, 공간효율, 환경 친화성

등은 LNG 시스템의 안전성 확보 비용과 함께 전체적인 총량 비용으로 나타난다.

석화연료(petroleum fuel)를 많이 사용하거나 급팽창하는 자동차로 인해 도시환경이 급속하게 오염되면서 환경개선의 필요성을 절실하게 느끼는 지역에서 LNG를 연료로 사용한다. 대기오염의 심각성은 대부분 대도시를 중심으로 일어나기 때문에 집중적인 대량 소비처는 회사의 수익성을 안정적으로 확보해준다. LNG의 대량 소비를 충족시키기 위해 LNG 회사는 LNG 저장탱크의 건설비와 안전성, 효율적 관리를 위해 100,000m³ 이상의 초대형 저장탱크 건설을 선호한다. 따라서, LNG 저장탱크는 인구 밀도가 높은 대도시 인근에 건설하는 것이 통례이다.

LNG 저장탱크에서 누설이 발생된다는 것은 탱크의 안전성에 심각한 영향을 미치는 중대한 사건으로 최고의 위험 신호이다. 따라서, 멤브레인 저장탱크에서는 -162℃의 초저온 액체가 안전하게 저장되도록 스테인레스 강판에 특별한 형상의 주름을 넣어서 제작한 멤브레인 패널을 용접으로 거대한 내부탱크(inner tank)를 건설한다[1,2]. 내부탱크를 구성하고 있는 멤브레인 패널은 LNG를 안전하게 저장하도록 설계되었지만, 불행하게도 멤브레인이 파손되는 경우는 -162℃를 보장하기 위한 단열재와 LNG가 접촉하게 된다. 그러나, 단열재 구조물이 LNG와 접촉하면서 누설 LNG의 복합하중에 의해 파손되면, 예응력 콘크리트(Prestressed Concrete: PC) 구조물인 외부탱크(outer tank)와 접촉한다. 최종적으로 외부탱크가 파손되면 내부탱크에서 누설된 LNG는 저장탱크 외부로 방출되면서 초대형 폭발 사고를 일으키게 된다.

본 연구에서는 국내 LNG 저장탱크의 설계자나 운영자에게 큰 관심의 대상이 되고 있는 140,000m³ 저장용량의 멤브레인식 초대형 저장탱크 구조물에 대한 누설 안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다. 멤브레인 LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성을 엄밀하게 해석하기 위해 본 연구에서는 내부탱크-단열재-외부탱크로 연결되는 구조물이 서로 접촉하는 조립 공간에 의해 발생하는 열저항 효과를 고려하였다.

2. 해석모델 및 해석조건

Fig. 1은 멤브레인식 LNG 저장탱크의 2차원

축대칭 유한요소해석을 위한 시스템 조립도를 보여주고 있다. 목재(plywood)와 폴리우레탄폼(polyurethane form: PUF)으로 구성된 단열재와 PC 구조물의 외부탱크에서 축대칭 4각요소는 13,748개, 절점은 17,075개를 각각 사용하였다. 또한, 멤브레인 패널에 사용한 축대칭의 선형요소 개수와 절점 개수는 2,610과 2,611이다. 여기서 멤브레인 저장탱크 시스템은 멤브레인 패널, 단열재(목재와 PUF), PC로 구성되며, 이들 구조물은 서로간에 접촉하면서 저장탱크 시스템으로 조립된다. 즉, 이들 구조물이 조립되는 과정에서 서로 접촉하는 공간에는 일정한 공기층을 형성하고 있다. 엄밀한 누설해석에서 이것이 열저항 효과(thermal resistance effect)로 고려되는 근거가 된다.

LNG 저장탱크에 작용하는 하중조건은 PC 구조물에 작용하는 10% 잔류압축구간의 예응력과 자중량 조건을 모두 고려함으로써 BS 7777[3]에 규정된 가스의 누설 안전성을 확보토록 하였다. 저장용량 140,000m³에 최고액위가 30.2m인 초대형 저장탱크에서 LNG에 의해 저장탱크에 걸리는 유체정압은 0.142MPa 정도이고, 정상적으로 작동하는 LNG 저장탱크의 가스압력은 0.029MPa인 것으로 알려져 있다. 또한, 저장탱크의 멤브레인 패널은 -162℃의 LNG 액체와 접촉하기 때문에 이것에 의한 초저온 온도하중을 상시적으로 받는다. 결국, LNG 저장탱크는 LNG에 의한 액압과 증발가스 압력, 초저온 하중 등을 항상 같이 받는 것으로 이들 복합하중을 고려한 해석을 하였다.

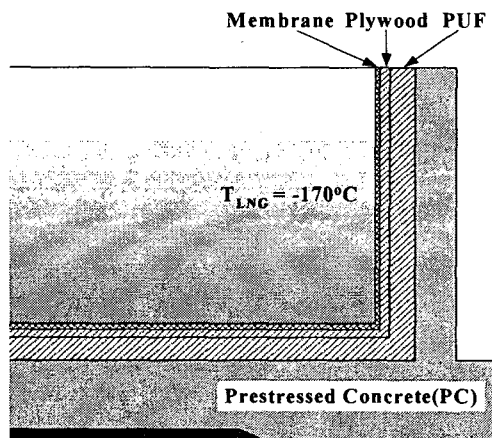


Fig. 1. FE analysis model of membrane LNG storage tank.

3. 누설해석 및 파손 프로세스

LNG 저장탱크에서 발생할 수 있는 미량의 누설도 허용되지 않도록 설계하지만, 만약 누설이 발생된다면 저장탱크를 중심으로 주변에 미치는 영향이 너무나도 크다. 따라서, 저장탱크에서 발생하는 누설이 어떠한 프로세스를 거쳐 파괴될 것인가에 많은 관심을 갖게된다.

누설 안전성을 검토할 수 있다. 만약, 그렇지 않으면 단열재와 PC와 같은 구조물 자체가 먼저 파괴되므로 누설 안전성은 확보될 수 없다.

본 연구에서는 LNG와 직접 접촉하는 2.0mm 두께의 멤브레인 패널 구조물이 파손되었다는 가정하에 LNG 누설액이 단열재 구조물을 파손하고, 최종적으로 PC 구조물을 파괴하면서 누설은 종료된다는 구조물 파손 시나리

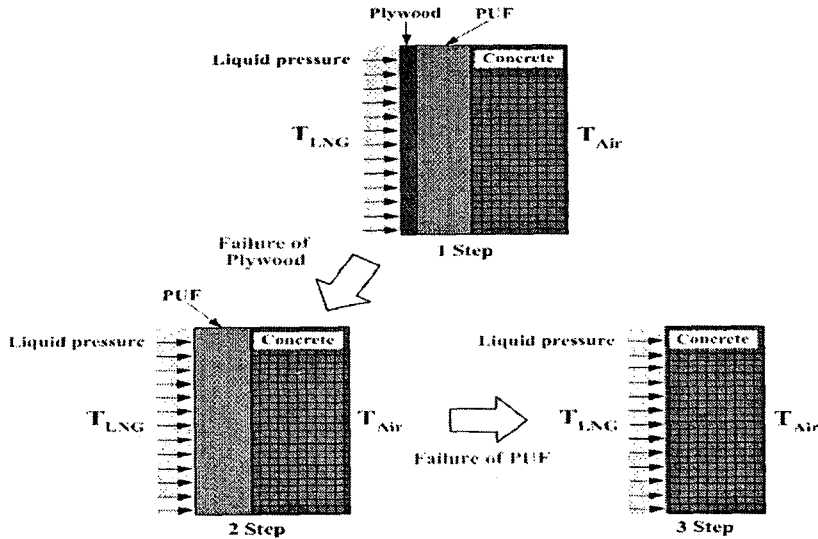


Fig. 2. Failure progressive mode of the insulation and outer tank structures by a leaked LNG.

내부탱크에 저장된 LNG가 외부로 빠져나가면 누설(leakage)이라 한다. 그러나, 초대형 LNG 저장탱크에 저장된 액체가 외부로 빠져나간다는 것을 실제로 누설 실험을 실시하기 전에는 현재까지 개발된 어떠한 이론적 해석법으로도 규명하기가 어렵다. 따라서, LNG 저장탱크에서 일어날 수 있는 누설의 정의를 열평형 해석법을 적용하여 누설 특성을 추정하고자 한다. 여기서 열평형 누설 해석법이란 -170°C 의 설계온도를 갖는 LNG가 구조물(단열재와 외부탱크)을 통과하는 시간, 즉 열평형에 도달하는 시간을 예측하여 누설 안전성을 예측하는 방법이다. 구조물의 측벽면 두께를 통과하는 열유동 해석에서 평형에 도달하는 시간을 예측하여 누설에 걸리는 시간을 컴퓨터 모델링을 통해 알아낸다. LNG 저장탱크 구조물이 누설 안전성을 확보하기 위해서는 우선적으로 그 구조물이 강도 측면에서 충분한 안전성을 확보해야

오이다. Fig. 2에서 제시하는 것과 같은 구조물 파손 프로세스를 보면, 내부탱크를 형성하는 멤브레인 패널이 1차적으로 파손되면서 2차적으로 단열재가 손상을 받고, 마지막으로 외부탱크인 PC 구조물이 파손된다는 프로세스를 보여주고 있다.

4. 열평형 누설해석

내부탱크가 파손되면서 발생한 누설 LNG가 저장탱크의 벽면을 따라 열유동이 일어나면 열평형 해석을 위해 저장탱크의 벽면 중간부를 선정하여 누설 모델링을 하였다. 정상적으로 운전되는 경우에 저장탱크의 누설 안전성은 충분히 확보되므로 열평형 운전조건은 내부탱크인 멤브레인 구조물에 $T_{LNG}=-170^{\circ}\text{C}$ 의 설계온도가 접하고, 외부탱크의 외벽면은 4계절 평균 온도인 $T_{AIR}=10^{\circ}\text{C}$ 로 유지된다는 LNG 저장탱

크의 시스템 설계를 Fig. 3과 같이 한다. 멤브레인식 LNG 저장탱크의 누설 안전성 해석을 위해 Fig. 3에서 보여준 모델에서 1차적으로 내부탱크인 멤브레인 구조물이 파손되면 -170°C 의 누설 LNG는 단열재(목재와 PUF)와 PC 구조물의 벽면을 따라 열유동이 순차적으로 일어난다.

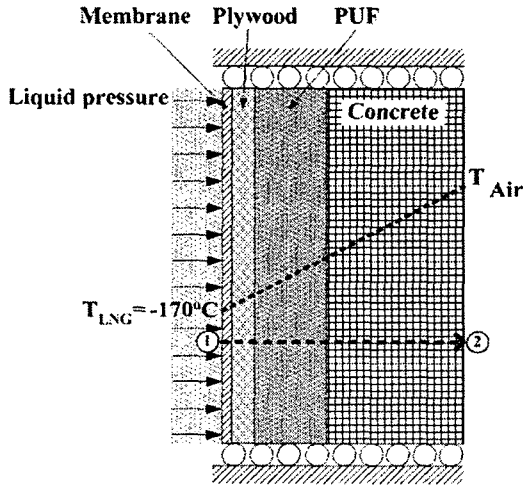


Fig. 3. Leakage model based on the thermal resistance analysis along the thickness of membrane LNG tank.

누설이라는 이상조건은 -170°C 의 LNG가 대기와 접촉하는 외부탱크 구조물에서 -170°C 의 평형온도가 감지되어야 누설이 실제로 발생하였다는 열유동 평형온도 조건이 성립된다. 여기에 누설 안전성 해석의 정확도를 높이기 위해 본 연구에서는 열저항 유동 해석법(thermal resistance flow analysis)이 고려되었다. 즉, 저장탱크 구조물의 벽면에서 LNG 누설에 의해 발생하는 열유동 문제를 해석하기 위해서 단열재와 콘크리트 외부탱크를 접촉 모델로 해석하고, 각각의 접촉 경계면에서 발생하는 열저항을 Fig. 4처럼 접촉면의 온도 저항성을 고려하기로 한다. 멤브레인 단열재 박스를 배열하는 과정에서 단열재는 밀봉결합이 아닌 접촉결합을 하기 때문에 이들 두 소재간에는 경계면이 완벽하게 접촉하지 않는다. 따라서, 이들 단열재 사이에는 항상 미소한 공간이 존재하고, 각 소재의 열전도와 접촉면적의 차이에 따라 열전달은 방해받기 때문에 접촉면의 열저항 문제를 본 연구에서 고려하였다. 즉, 유한요소해

석 측면에서는 이러한 열저항 특성을 고려할 수 없기 때문에 소재의 열특성과 형상요소에 따른 총합 열전달 계수를 고려한 접촉면의 열저항 문제로 열유동 차단효과를 반영하였다.

따라서, Fig. 4에서는 LNG 저장탱크의 벽면에서 발생하는 열저항 문제를 이상화시켜 누설 LNG에 의한 열전달 유동현상을 열평형 저항 해석모델로 나타내고 있다. 열저항 해석에서 누설된 LNG가 접하고 있는 단열재 목재에 -170°C 의 초저온 온도하중이 가해지면, 목재와 PUF 단열재의 경계 접촉면에서 전도 열저항에 의해 ΔT_1 의 온도차가 발생한다. 또한, PUF와 콘크리트 외부탱크 사이에도 전도 열저항에 의해 ΔT_2 의 온도차가 발생한다. 즉, 목재, PUF, PC 구조물 사이의 접촉 경계면에서는 열유동이 마치 단일체처럼 원활하게 흐르지 못하게 항상 열유동에 다른 저항을 받게 된다.

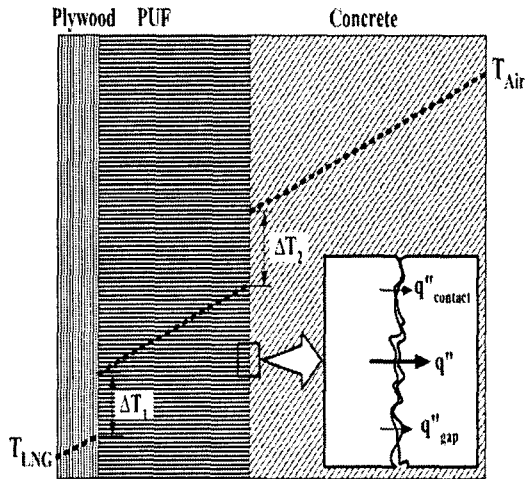


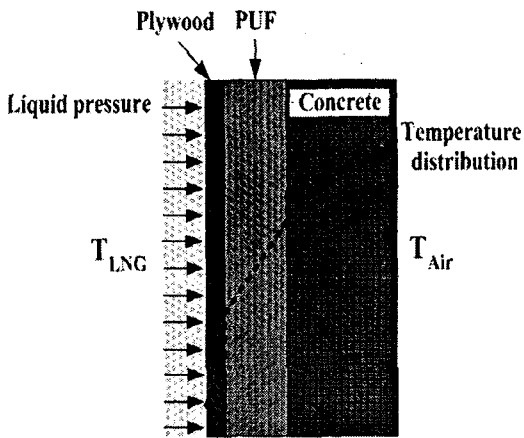
Fig. 4. Thermal resistance leakage analysis model of membrane LNG tank .

5. 해석결과

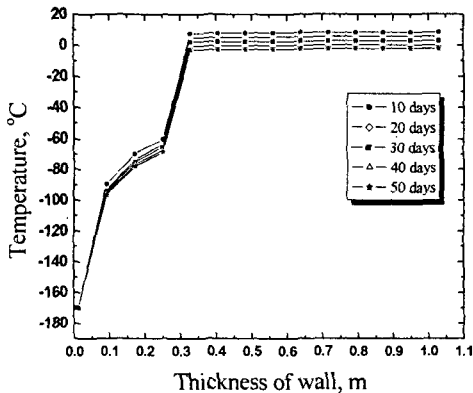
내부탱크를 구성하는 2.0mm 두께의 SUS 304L로 제작된 멤브레인 구조물이 운전중에 파손되었다고 가정을 하게되면, 누설 LNG는 목재와 폴리우레탄폼으로 구성된 단열재에 직접 접촉하면서 단열재 기능을 상실하는 위험한 상황에 도달한다. 연쇄적인 누설 불안정성 문제를 Fig. 2에서 제시한 누설 프로세스에 따라서 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC[4]로 검증하고자 한다.

5.1. 멤브레인이 파손된 모델

Fig. 3은 내부탱크로부터 LNG가 누설되었을 때 벽면을 따라서 발생한 열평형 온도분포를 시간에 따라 관찰하는 반경방향(①→②)을 보여주고 있다. 결국, 멤브레인 패널이 파손되면서 단열재 공간으로 향하는 누설 LNG는 우선 목재에 의해 모든 하중이 지지된다는 가정을 하고 -170°C 의 초저온이 외부로 빠져나가는 열유동 온도평형 해석을 수행한다.



(a) Fractured membrane panel and boundary conditions



(b) Temperature distributions along the plywood and PUF insulations and the PC structure

Fig. 5. Delayed leak time and equivalent temperature distributions by leaked LNG loads from the fractured inner tank along the wall thickness of membrane LNG tank.

누설 LNG를 목재에 의해 체류하는 시간을 Fig. 3의 ①→② 반경방향을 따라서 제시하였고, 누설된 LNG의 열평형 온도분포를 Fig. 5(a)에서 나타내고 있다. Fig. 5(b)의 해석결과에서 보여주는 바와 같이 목재와 PUF 사이의 열저항과 목재와 PC 외부탱크 사이의 온도분포는 소재가 바뀌는 접촉면에서 열저항을 나타내는 전형적인 열저항 점프현상(thermal resistance jump)이 발생한다. 목재와 PUF의 접촉계면에서 발생한 열저항에 의해 약 54°C 의 온도차가 발생하였고, 목재와 PC 구조물의 접촉계면에서는 약 43°C 의 온도차가 열저항에 의한 영향으로 나타났다. 이것은 작지 않은 열평형 온도의 점프현상으로 누설 해석에 많은 영향을 미친다.

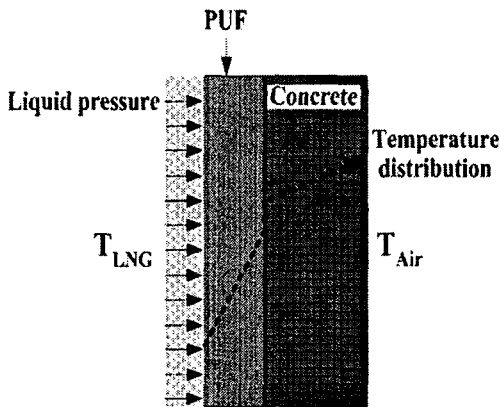
누설 안전성을 검토한 Fig. 5(b)의 결과에 의하면, 단열재 구조물이 충분한 강도를 확보하고 있다면 내부탱크에서 누설된 LNG가 단열재 공간으로 침입하여 50일 정도 경과해도 누설 안전성을 충분히 확보할 수 있다는 것이다. LNG 저장탱크 시스템에서 단열재 구조물이 누설 LNG의 유체정압과 온도하중 등을 견여주기만 한다면 정상적으로 작동하는 PC의 외기 온도 10°C 를 -1.3°C 로 떨어뜨리는데 50일 걸린다는 것으로 충분히 안전하다. 그러나, 누설 LNG가 목재에 직접 접촉하게 되면 목재는 강도부족으로 불과 수분만에 파손되므로 목재에 의한 LNG의 누설 안전성을 실제로는 확보될 수 없다.

5.2. 목재가 파손된 모델

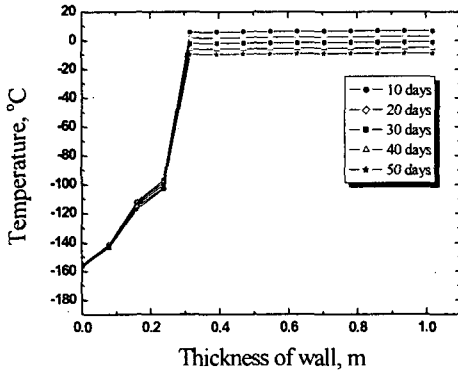
Fig. 6(a)는 누설 LNG의 복합하중에 의해 목재가 파손되었다고 가정할 경우, 누설액이 폴리우레탄폼(PUF)에 직접 접촉하면서 발생하는 누설문제를 열평형 유동법으로 누설문제를 해석하였다. LNG 누설액에 의해 목재는 파손되었지만, PUF는 아직 누설 LNG에 의한 복합하중을 충분히 견딘다고 가정한다.

누설 LNG가 PUF와 PC 구조물의 측벽면을 따라서 Fig. 3의 ①→② 반경방향으로 분포하는 열평형 온도 지연시간을 관찰한 것이다. Fig. 6(b)에서 누설 LNG가 PUF 구조물에 의해 LNG의 초저온 하중, 액압, 가스압 등과 같은 복합하중을 모두 담당하고, -170°C 의 초저온 액체가 PC의 외부로 빠져나가는 열유동 평형온도를 해석한 결과이다. Fig. 6(b)에서 PUF 단열재와 PC 구조물의 벽면을 따라서 관찰한 온도분포와 열평형에 도달하는데 걸리는 시간을 제시한다. 즉, -170°C 의 LNG가 PUF에 접촉하면서 PC의 10°C 상온조건에 도달하는데는

10일 정도가 걸리지만, PC 구조물의 외부온도가 -7°C 정도로 떨어지기 위해서는 50일 정도로 긴 시간을 필요로 한다. 여기에 우리가 통상적으로 LNG의 누설이라고 할 수 있는 $T_{\text{LNG}} = -170^{\circ}\text{C}$ 로 설정하게 되면, 이론적으로 무한대의 누설 지연시간을 확보하므로 안전하다고 할 수 있다. 그러나, 실제의 경우 누설된 LNG가 PUF 구조물에 닿게 되면 누설 LNG의 복합하중에 의해 PUF 소재는 순식간에 파손되므로 누설 안전성은 확보될 수 없다.



(a) Fractured plywood insulation and boundary conditions

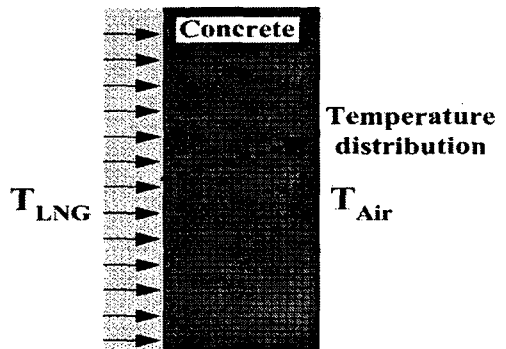


(b) Temperature distribution along PUF insulation and PC structure

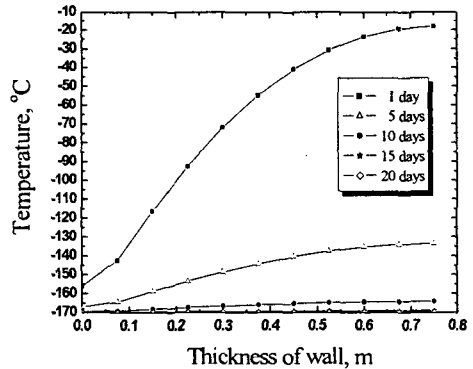
Fig. 6. Delayed leak time and equivalent temperature distributions by leaked LNG loads from the fractured plywood insulation along the wall thickness of membrane LNG tank.

5.3. PUF가 파손된 모델

PUF를 포함한 모든 단열재가 파손되면서 누설 LNG는 마지막으로 남은 PC 구조물에 의해 누설이 차단된다. Fig. 7(a) 모델에서는 PC 구조물에 의해 LNG 누설이 차단되는 열평형 온도 지연시간 결과를 PC의 벽면 두께를 따라서 제시하고 있다. 만약 PC 구조물이 누설 LNG를 완벽하게 차단하지 못하면, LNG 저장탱크의 폭발이라는 최악의 상황에 도달할 수 있다.



(a) Fractured plywood and PUF insulations and boundary conditions



(b) Temperature distribution along the PC structure

Fig. 7. Delayed leak time and equivalent temperature distributions by leaked LNG loads from the fractured plywood and PUF insulations along the wall thickness of membrane LNG tank.

Fig. 7(b)의 결과에 의하면, -170°C 의 누설 LNG가 PC 구조물과 처음 접촉하여 PC 콘크리트 구조물의 온도를 -17°C 로 떨어뜨리는 데는

1일 정도, -132°C 에 도달하는대는 5일 정도, -168°C 에 도달하는대는 15일 정도, 누설을 의미하는 -170°C 에 도달하는대는 20일 정도가 걸리는 것으로 계산되었다.

Fig. 8은 앞에서 해석된 결과를 요약한 것으로 단열재가 건전한 경우는 누설 LNG에 의한 피해가 없을 것으로 예상되지만, 실제로는 이들의 강도가 취약하기 때문에 현실적이지 못하다. 그러나, 외부탱크에 의한 누설 안전성은 우선 강도 안정성이 확보되고, 최소 10일 정도는 견디어 주므로 이 기간동안 안전조치를 취할 수 있어 안전하다는 것이다.

PC 구조물은 누설 LNG에 의한 모든 복합하중을 충분히 견디는 것으로 밝혀졌기 때문에 PC 구조물에 의해 누설 LNG를 차단하는 시간은 최소 10일 정도가 넘는 것으로 예상된다. 외부탱크 구조물이 누설 LNG를 10일 이상을 체류시키는 동안에 내부탱크에 설치된 1차펌프(primary pump)를 가동하게 LNG를 이웃한 저장탱크에 긴급하게 송출하고, 연계된 안전장치를 작동하면 LNG 저장탱크는 안전하게 보호될 수 있다.

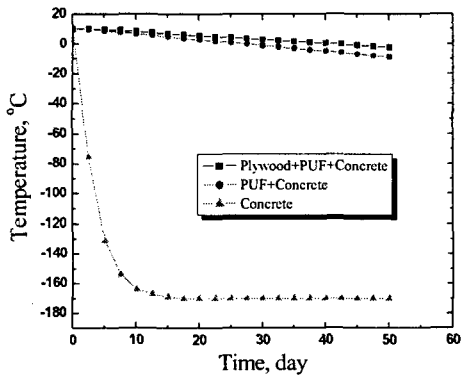


Fig. 8. Equivalent temperature distributions by leaked LNG loads as a function of the delayed leak time along the wall thickness of membrane LNG tank.

6. 결 론

본 연구에서는 멤브레인식 LNG 저장탱크의 누설 안전성을 고찰하기 위해서 단열재와 PC 구조물이 균일하다는 가정을 하고 유한요소해석으로 LNG 저장탱크의 누설 안전성 문제를 고찰하였다. 여기에 누설 안전성의 엄밀한 해석을 위해 열유동 온도 평형성을 고려하였다. 단열재인 목재와 PUF, 외부탱크인 PC 구조물 모두가 누설 LNG에 의해 발생하는 복합하중을 안전하게 담당한다는 가정을 하고, 누설 안전성 문제를 해석하였다.

누설 안전성 해석 결과에 의하면, 멤브레인 구조물이 파손함에 따라 발생하는 누설 LNG에 의한 온도하중과 액압하중 등은 목재와 PUF로 형성된 단열재 구조물을 쉽게 파손하므로 실제적인 누설 안전성을 확보하고 있지는 못하였다. 그러나, 최후의 구조물인 외부탱크는 이들 복합하중을 충분히 견디면서 최소 10일 이상 누설을 지연시키므로 초대형 LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성은 확보되었다고 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김청균, 홍성호 외, "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인의 유한요소해석," 대한기계학회 논문집, pp. 2797-2804, (1994)
- [2] 오병택, 홍성호 외, "LNG 저장탱크용 멤브레인 개발을 위한 유한요소해석," 한국가스학회 추계학술대회 논문집, pp. 35-44, (2001)
- [3] BS 7777 Part 8, pp. 16, (1993)
- [4] "MARC user's manual," Version K7.3, MARC Analysis Research Co., (1996)