



## 열저항 효과를 고려한 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크의 누설 안전성에 관한 연구

†김청균 · 조승현 · 서흥석\* · 홍성호\* · 이승림\*\* · 김영규\*\* · 권부길\*\*

홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과, \*한국가스공사 연구개발원

\*\*한국가스안전공사 가스안전연구원

(2004년 8월 2일 접수, 2004년 9월 17일 채택)

## On the Leakage Safety Analysis of 9% Nickel Type 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\*\* · 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 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크에 대한 누설 안전성을 여러 가지 단열재와 코너 프로텍션, PC 구조물 사이에 존재하는 열저항 평형온도 효과를 고려하여 유한요소법으로 해석하였다. FEM 계산결과에 따르면, 파이버 글라스 블랭킷, 펄라이트 파우더, 셀룰러 글라스 단열재 등은 재질의 취약한 강도 때문에 누설 LNG에 의한 하중이 가해지면 단열재 자체가 파손되므로 누설 안전성을 보장할 수 없게 된다. 그러나, 내부탱크와 단열재가 동시에 파손되어도 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션(CP)과 예응력 콘크리트(PC) 구조물의 외부탱크는 LNG의 복합하중에 대하여 강도 안전성을 확보하고 있으므로, 누설 LNG를 최소한 10일 정도는 안전하게 체류시킬 수 있다. 따라서, 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크 시스템은 이들 두 가지 구조물에 의해 누설 안전성이 확보된다.

**Abstract** – In this study, the FE analysis has been presented for the leakage safety of 9% nickel type LNG storage tank based on the thermal resistance effects between insulation panels, corner protection and prestressed concrete(PC) structures. The FEM calculated results show that the leakage safety of fiber glass blanket, perlite powder and cellular glass insulators does not guarantee any more due to a strength failure of the insulation structure. But the corner protection and PC structure of outer tank may delay or sustain the leaked LNG of 10 days even though the inner tank and insulation structure are simultaneously failed. This means that 9% nickel steel type LNG storage tank may be safe because of a high strength of the corner protection and outer tank structures.

**Key words** : Leakage safety, LNG, 9% nickel type inner tank, Outer tank, Thermal resistance

### I. 서 론

국내외적으로 많이 건설되고 있는 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크는 멤브레인식 저장탱크에 비하여 간단한 설계, 단순한 시공성, 구조적 안전성 등으로 각광을 받고 있다. 후판의 9% 니켈강재로 제작한 내부탱크

(inner tank)는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG와 직접 접촉하고, 저장 LNG에 의한 유체정압(hydrostatic pressure)과 초저온 온도하중을 스스로 담당할 수 있도록 설계한 자립식이다. 이것은 주름 형상을 갖는 박판의 멤브레인 패널을 용접한 내부탱크가 하중을 직접 담당하지 못하고 앵커(anchor)에 의해 외부탱크(outer tank)로 전달하도록 설계된 일체형의 멤브레인식 저장탱크와는 크게 다르다.

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크는 모든 하중에 견

†주저자: ckkim@wow.hongik.ac.kr

딜 수 있도록 제작된 구조물로 외부탱크와는 별도의 안전성을 확보하고 있다. 따라서, 9% 니켈강재식 내부탱크는 LNG에 의해 발생하는 하중을 담당하도록 비교적 안전한 설계를 하였지만, 외부하중에는 거대 탱크의 특성상 취약한 측면이 있다. 그러나, 모든 하중(LNG의 액압과 가스압, 초저온 하중, 슬로싱 하중 등)이 내부로부터 발생하지, 외부로부터 발생할 가능성은 LNG의 누설에 의한 사고와 지진 하중 이외는 없다. 따라서, 9% 니켈강재식 저장탱크는 강도와 누설 안전성이 대단히 높은 탱크 시스템으로 제작된다.

140,000 m<sup>3</sup> 저장용량을 갖는 9% 니켈강재식 저장탱크는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 28.6m의 최고 액위를 채워도 상부에는 여유 공간을 확보하고 있다. 자립식 내부탱크의 초저온성을 안전하게 보장하기 위해서 셀 구조물의 외벽면에는 단열재 공간을 설치하고, 이 단열재의 외벽면을 감싸는 콘크리트 구조물의 외부탱크가 모든 하중을 최종적으로 담당하도록 설계한다. 외부탱크는 예응력 콘크리트(prestressed concrete: PC)로 제작된 1m 이상의 두꺼운 구조물로 BS 7777에서 추천하는 최소잔류압축응력 1.0 N/mm<sup>2</sup> 구간을 10% 정도는 확보하고 있어야 PC의 기계적 강도와 누설 안전성을 확보하게 된다[1]. 결국, 내부탱크와 외부탱크는 서로 독립적인 강도 안전성을 확보하고 있어 이중의 안전성을 확보하고 있다. 여기에 예상치 못한 사고로 내부탱크에 저장된 LNG의 누설이 발생하는 경우는 단열재 공간에 설치된 5.1m 높이의 코너 프로텍션(corner protection: CP)에 의해 누설 LNG가 체류하도록 설계되어 마치 방류둑(dike)과 같은 역할을 한다. 따라서, 9% 니켈강재식 저장탱크는 강도와 누설 안전성을 시스템적으로 갖추고 있다.

9% 니켈강재식 내부탱크에 걸리는 모든 하중은 멤브레인식 내부탱크처럼 외부탱크로 전달하는 것이 아니고 스스로 담당하는 자립형으로 강도 안전성을 독립적으로 확보하고 있다. 이러한 특성을 갖는 저장탱크에

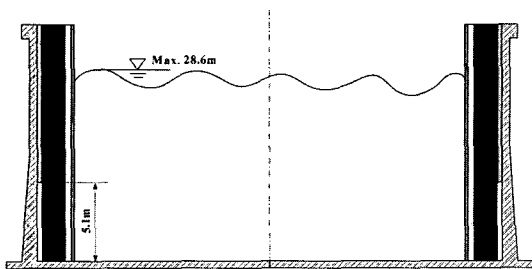


Fig. 1. 9% Nickel steel type LNG storage tank.

서 만약 사고가 발생하였다는 가정을 할 경우, 단열재와 외부탱크에 의해 차단될 수 있는 시스템의 누설 안전성 문제를 해석하고자 한다.

본 연구에서는 기존 연구[2]와는 다르게 단열재, 코너 프로텍션, PC 구조물은 조립과정에서 항상 접촉공간이 존재한다는 사실을 고려하였다. 즉, 접촉공간에 의한 열저항 효과를 고려하여 누설 안전성을 해석함으로써 보다 엄밀한 결과치를 얻고자 하였다. 따라서, 본 연구에서는 열저항 평형온도 개념과 유한요소해석을 연계한 9% 니켈강재식 저장탱크 시스템에 대한 누설 안전성을 해석하고자 한다.

## II. 해석조건 및 해석모델

내부탱크로 유입되는 열원을 차단하기 위한 단열재는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 코너 프로텍션(CP)이 설치된 5.1m 구간과 그 이상의 구간은 사용하는 단열재가 약간 다르다. 따라서, 누설 안전성 문제를 CP가 설치된 지역과 설치되지 않은 지역에 따라서 누설 안전성이 다르게 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 2에서 보여주는 것처럼, 내부탱크 하단부를 구성하는 파이버 글라스 블랭킷(fiber glass blanket: FGB), 펄라이트 파우더(perlite powder: PP), 코너 프로텍션(CP), 셀룰러 글라스(cellular glass: CG), 예응력 콘크리트(PC) 구조물(외부탱크)로 조립된 저장탱크 시스템에 대한 누설 안전성 해석을 수행하고자 한다. 여기서 단열재, CP, PC 등의 구조물을 조립하는 과정에서 상하

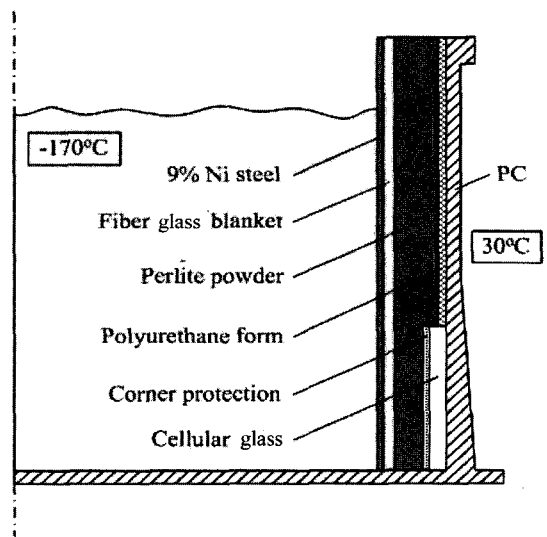


Fig. 2. FE analysis model of 9% nickel type LNG storage tank.

간 접촉에 의해 형성된 공기층의 열저항 현상을 고려해야 누설 안전성에 대한 해석이 보다 엄밀해진다.

본 연구에서 고려한 저장용량은 140,000 m<sup>3</sup>이고, 최고액위는 28.6 m인 초대형 LNG 저장탱크이다. 최고액위로 채워진 탱크에 걸리는 유체정압은 약 0.142 MPa이고, 정상적인 LNG 저장탱크의 가스압력은 0.029 MPa로 알려져 있다. 또한, 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크는 -162°C의 LNG 액체에 의해 접촉하기 때문에 초저온 하중을 상시적으로 받는다. 결국, LNG 저장탱크는 LNG에 의한 액압과 초저온 하중 등을 항상 받으므로 이들 복합하중을 동시에 고려하여 해석하였다.

### III. 파손 프로세스 및 열저항 평형온도

#### 3.1. 파손 프로세스

내부탱크가 폭발에 의해 손상을 받게되면 탱크는 순식간에 파괴되지 않고, 약간의 시간차를 두고 파손되는 경우는 누설된 LNG가 탱크의 바닥면을 따라서 먼저 고이게 된다. 그렇다면, 누설 LNG에 대한 안전성 고찰은 CP가 있는 지역에 대한 누설 안전성을 우선적으로 검토하는 것이 보다 합리적이라 생각된다. 따라서, 본

연구에서는 LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성을 탱크의 하단부에 설치된 5.1 m 높이의 CP를 중심으로 유한요소해석을 수행하고자 한다.

LNG를 저장하고 있는 내부탱크의 파손으로 LNG의 누설이 발생하였다고 가정할 경우, 누설 LNG로 인해 단열재와 외부탱크가 파손되는 진행과정을 예측한다는 것은 탱크 설계자와 운영자 모두에게 관심의 대상이다. 누설 LNG로 인한 탱크 구조물의 파손 프로세스를 정확하게 예측하면 설계 단계에서 안전장치의 설치와 작동 프로세스를 효율적으로 관리할 수 있는 시스템 구축이 가능해진다.

본 연구에서는 LNG와 직접 접촉하는 셸(shell)의 두께 25.1 mm를 갖는 9% 니켈강재식 내부탱크 구조물이 파손되었다는 가정을 한다. 그 이후로 내부탱크를 벗어난 누설 LNG가 단열재 구조물을 파손하고, 2차로 9% 니켈강재의 코너 프로텍션을 파손하고, 마지막으로 PC 구조물을 파괴하면서 저장탱크의 파손 시나리오는 종료된다. 즉, 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크가 파손되어 누설이 진행된다 할지라도 FGB, PP, CP, CG, PC와 같은 구조물이 누설 LNG에 의해 발생된 복합하중을 충분히 담당할 수 있을 정도의 강도를 갖고 있다면 누

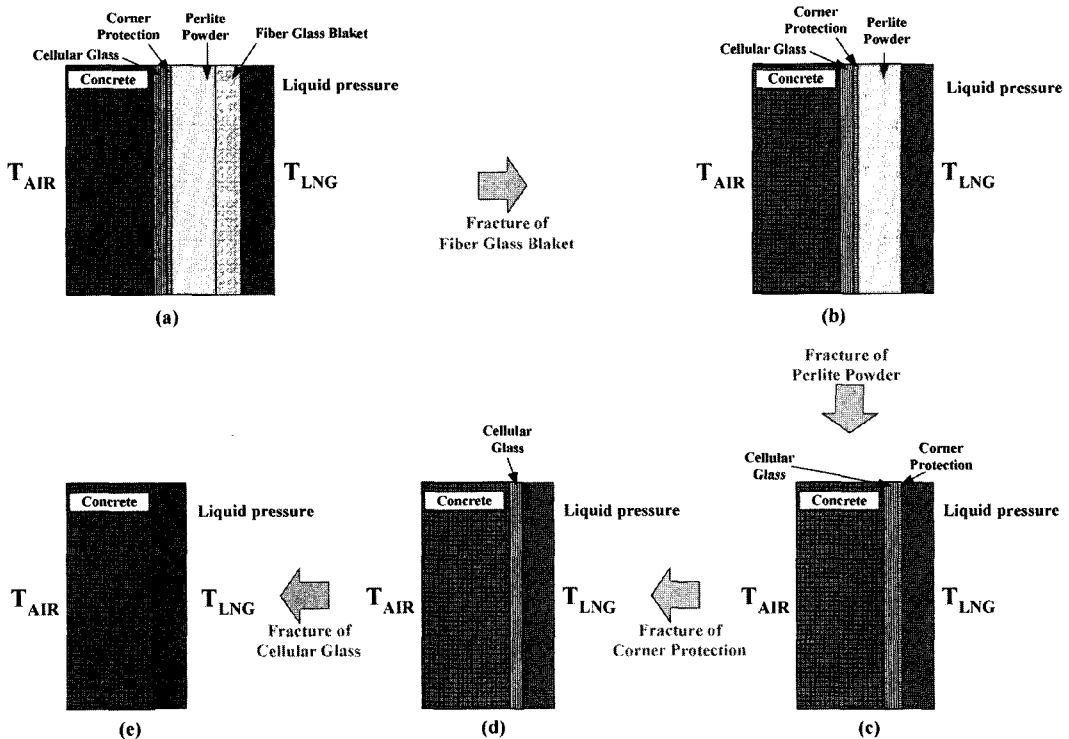


Fig. 3. Failure progressive modes of insulators or corner protection and outer tank structures by a leaked LNG.

설이 계속 진행되기가 어렵다. 만약 그렇지 않다면 단열재와 구조물이 파손되면서 누설은 Fig. 3의 파손 프로세스에 따라서 순차적으로 진행된다.

결국, LNG 저장탱크에서 콘크리트 구조물로 제작된 외부탱크가 파손하게 되면, 저장탱크는 폭발이 일어날 가능성이 대단히 높기 때문에 주변에 미치는 영향은 막대할 것이다. 따라서, 저장탱크 시스템의 누설 안전성 확보를 위한 구조물 설계와 통합 설비안전관리 시스템 설치의 중요성이 제기된다.

### 3.2. 열저항 평형온도 해석법

정상적으로 운전중인 저장탱크는 누설 안전성을 충분히 확보하고 있으므로 열평형 온도는 내부탱크에  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 설계온도가 접하고, 외부탱크의 외벽면에 4계절 온도의 평균인  $10^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는 LNG 저장탱크를 Fig. 2에서 보여주고 있다.

내부탱크에 저장된 LNG가 사고에 의해 외부로 빠져나가는 것을 누설(leakage)이라 한다. 그러나, 초저온 탱크에 저장된 LNG가 운전중에 누설하는 것을 실제로 경험한다는 것은 큰 사고로 연결되기 때문에 실험적으로 규명할 수 없다. 그렇다고 단열재와 코너 프로텍션(CP), PC 구조물을 통과하는 누설 현상에 대해 해석적으로 모델링할 수 있는 방법도 아직은 없다. 따라서, 본 연구에서는 LNG 저장탱크에서 일어날 수 있는 누설 문제를 열평형 온도 해석법으로 예측하고자 한다.

여기서 열평형 누설 해석법은 내부탱크에 저장된  $-170^{\circ}\text{C}$ (설계온도)의 LNG가 단열재, 코너 프로텍션, 외부탱크 등의 벽면을 따라 외부로 빠져나가는 시간, 즉 열평형에 도달하는 시간을 예측하여 누설 안전성을 예측하는 것이다. 탱크의 측벽면 두께를 통과하는 열유동 해석에서 평형온도에 도달하는 시간을 예측하여 누설에 걸리는 시간을 해석적으로 추정하고자 한다.

내부탱크 파손에 따른 누설 LNG는 외부로 방출하게 되는데, 이것을 이론적으로 직접 규명할 수 없으므로, 근사치 해석법으로 본 연구에서는 열저항 유동 해석법이 고려된 열평형 유동 해석법을 도입하고자 한다. 즉, 누설을 열유동 평형온도 측면에서 보면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 LNG가 단열재나 콘크리트를 통과하여 외부탱크의 외측면에서  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 온도가 감지되면 누설은 실제로 발생하였다는 것이다. 이것은 누설 LNG에 의한 열유동 평형온도 조건이 성립된 것이다. 여기서 열저항 유동 해석법(thermal resistance flow analysis)을 고려하면 누설 안전성의 해석결과에 대한 정확도를 더 높일 수 있게 된다.

열저항 유동 해석법은 LNG 누설에 의해 발생하는 저장탱크 벽면의 열유동 문제를 엄격하게 해석하기 위

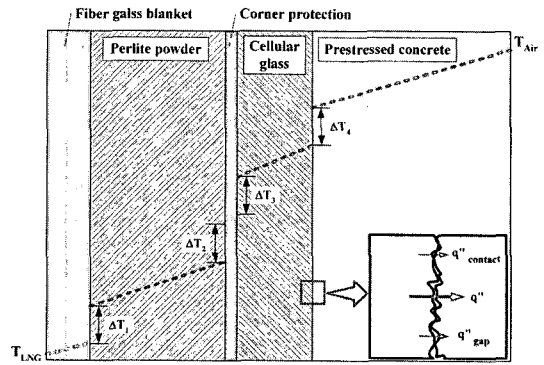


Fig. 4. Thermal resistance leakage analysis model of 9% nickel type LNG tank.

해서 단열재-CP-PC 구조물의 경계면에서 발생하는 열저항을 Fig. 4에서 제시한 모델처럼 접촉면의 온도 저항성을 고려한 것이다. 이들 구조물 상호간에는 단열재가 아닌 조립체이기 때문에 접촉계면에는 항상 미세한 공간이 존재하고, 이들 접촉소재의 전도성과 접촉면적의 차이에 따라 열전달은 늘 방해받기 때문에 접촉면의 열저항 문제를 고려하였다.

유한요소해석(FEM)에서 이러한 접촉 열저항 특성을 고려할 수 없기 때문에 소재의 열특성과 공간 존재에 따른 총합 열전달 계수를 고려한 접촉면의 열저항 문제로 열유동 차단효과를 반영하였다.

Fig. 4에서는 접촉벽면에서 발생하는 열저항 문제를 이상화시켜 누설 LNG에 의한 열유동 현상을 열저항 해석모델로 나타내고 있다. 누설된 LNG가 접하고 있는 파이버 글라스 블랭킷(FGB)에  $T_{LNG} = -170^{\circ}\text{C}$ 의 온도하중이 가해지면, FGB와 펄라이트 파우더(PP)의 경계 접촉면에서 전도 열저항에 의해  $\Delta T_1$ 의 온도차가 발생한다. 또한, PP와 코너 프로텍션(CP)의 경계 접촉면에서는 전도 열저항에 의해  $\Delta T_2$ 의 온도차가, CP와 셀룰러 글라스(CG)의 경계 접촉면에서는 전도 열저항에 의해  $\Delta T_3$ 의 온도차가, CG와 예음력 콘크리트(PC)의 경계 접촉면에서는 전도 열저항에 의해  $\Delta T_4$ 의 온도차가 각각 발생한다고 가정한다. 결국, 내부탱크의 파손에 따른 누설 안전성 해석에 FGB, PP, CP, CG, PC 구조물의 열전도 특성과 이들 구조물 사이의 접촉 경계면에서 지연되는 열저항 유동 문제를 고려함으로써 누설 안전성 해석 데이터의 신뢰성을 높이고자 하였다.

## IV. 해석결과

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크는 Fig. 2에서 보여

주는 것처럼 단열재, CP와 PC 구조물로 구성되어 LNG를 안전하게 저장하고 있다. 그러나 예상치 못한 사고로 내부탱크 구조물이 파손되어 누설 LNG가 파이버글라스 블랭킷(FGB) 단열재에 직접 닿게 되면서 Fig. 3에서 제시한 탱크의 파손 프로세스에 따라 누설이 진행된다.

본 연구에서는 코너 프로텍션(CP)이 있는 저장탱크의 하단부에 대한 누설 안전성 문제를 비선형 유한요소해석 프로그램 MARC[3]로 검증하고자 한다.

#### 4.1. 내부탱크가 파손된 모델

Fig. 3(a)에서 보여준 것처럼 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크가 파손되면서 FGB 단열재가 누설 LNG의 모든 하중을 담당할 것이라는 가정을 하고,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 외부로 빠져나가는 열유동 평형온도를 해석하였다.

Fig. 5의 해석결과는 내부탱크로부터 LNG가 누설되었을 때 벽면을 따라서 발생한 열평형 온도분포를 보여주고 있다. 즉, 누설 LNG의 모든 복합하중이 FGB 단열재에 작용한다고 가정을 할 경우 FGB-PP-CP-CG-PC 구조물에 분포하는 열평형 누설 안전성에 대한 해석결과이다.

Fig. 5의 결과에 의하면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 누설되어  $10^{\circ}\text{C}$ 의 상온조건에 도달하는 데는 약 10일이 걸리지만, 여기서  $3.7^{\circ}\text{C}$ 를 더 낮추어  $6.3^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 데는 50일 정도가 걸리는 것으로 보아 해석적 측면에서 누설 안전성은 충분하다는 데이터이다. 그러나, 누설 LNG의 복합하중이 FGB 단열재에 모두 가해지게 되면 FGB는 강도부족으로 금방 파손되어 FGB에 의한 LNG

의 누설 안전성은 실제적으로 확보할 수 없게 된다.

#### 4.2. FGB가 파손된 모델

Fig. 3(b)에서 보여준 것처럼 파이버글라스 블랭킷(FGB) 단열재가 누설 LNG의 액압과 초저온 하중과 같은 복합하중에 의해 파손되면서 펄라이트 파우더(PP) 단열재에 의해 모든 하중이 지지된다는 가정을 하고,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 벽면을 따라서 빠져나가는 열유동 평형온도를 해석하였다.

FGB 단열재를 파손한 LNG가 누설되었을 때 벽면을 따라서 발생한 열평형 온도분포를 보여주고 있다. 즉, 누설 LNG의 모든 복합하중이 PP 단열재에 작용한다고 가정할 경우 PP-CP-CG-PC 구조물에 분포하는 열평형 누설 안전성에 대한 해석결과를 Fig. 6에서 제시하고 있다.

Fig. 6의 결과에 의하면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 누설되어 대기중 온도인  $10^{\circ}\text{C}$ 의 열평형에 도달하는 데는 약 10일 걸리지만, 여기서  $8^{\circ}\text{C}$ 를 더 낮추어  $2^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 데는 50일 정도가 걸리는 것으로 보아 해석적 측면에서 누설 안전성은 충분한 것으로 판단된다. 그러나, 누설 LNG의 복합하중이 PP 단열재에 직접 가해지면 PP는 강도부족으로 금방 파손되므로 PP에 의한 LNG의 누설 안전성은 보장할 수 없다.

#### 4.3. PP가 파손된 모델

Fig. 3(c)에서 보여준 것처럼 펄라이트 파우더(PP) 단열재가 누설 LNG의 복합하중에 의해 파손되면서 코너 프로텍션(CP) 구조물에 의해 모든 복합하중이 지지된다는 가정을 하고,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 벽면을 따

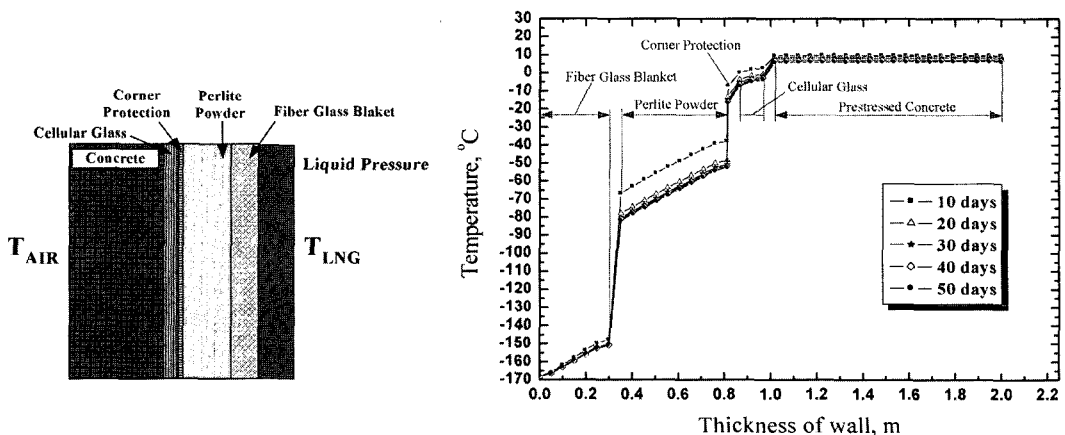


Fig. 5. Delayed leak time of the leaked LNG and equivalent temperature distributions along the wall thickness of FGB, PP, CP, CG and PC structure by leaked LNG loads from the fractured inner tank.

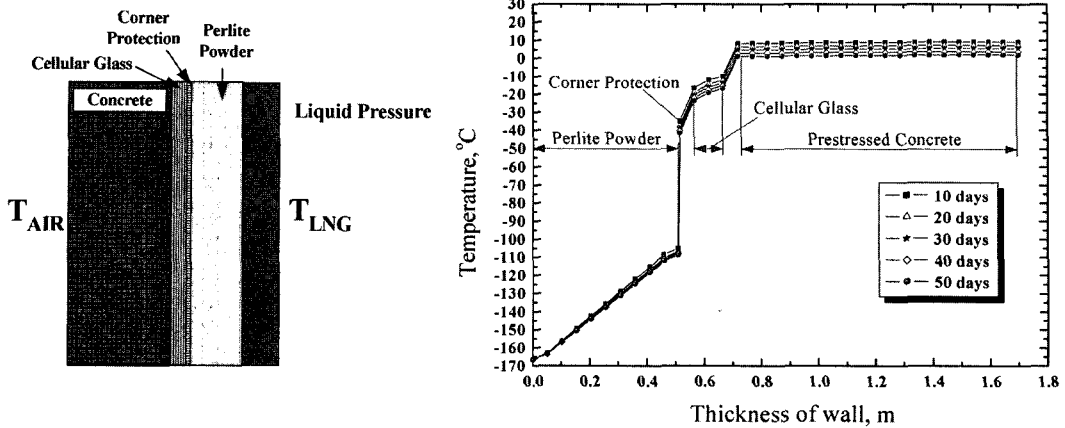


Fig. 6. Delayed leak time of the leaked LNG and equivalent temperature distributions along the wall thickness of PP, CP, CG and PC structure by leaked LNG loads from the fractured insulator of the fiber glass blanket.

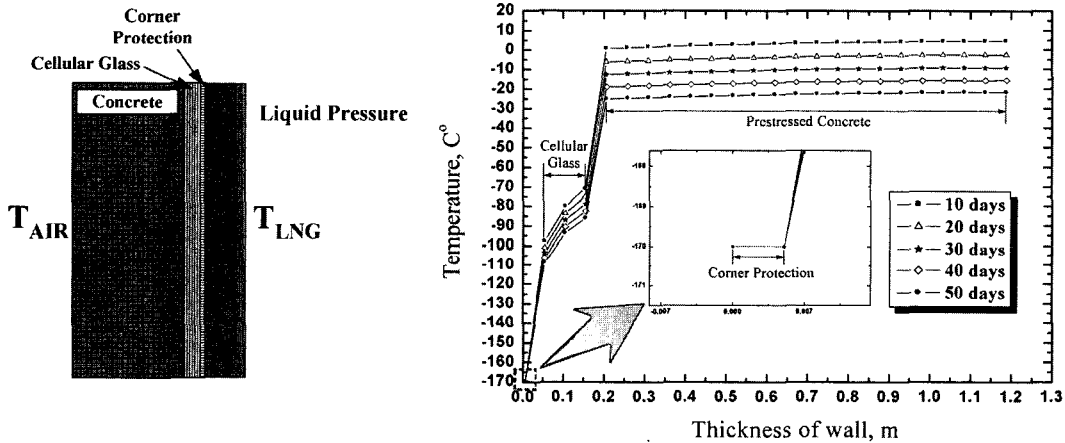


Fig. 7. Delayed leak time of the leaked LNG and equivalent temperature distributions along the wall thickness of CP, CG and PC structure by leaked LNG loads from the fractured insulator of the perlite powder.

라서 빠져나가는 열유동 평형온도 해석을 수행하였다. 여기서 코너 프로텍션(CP)은 5.0 mm 두께의 9% 니켈강재로 5.1 m 높이까지 제작한 초대형 저장탱크로 누설 LNG를 잠시동안 체류시키는 역할을 한다.

Fig. 7의 해석결과는 PP 단열재를 파손한 LNG가 계속 누설이 진행되면서 반경방향으로 발생한 열평형 온도분포를 보여주고 있다. 즉, 누설 LNG의 모든 복합하중이 PP 단열재에 작용한다고 가정할 경우 CP-CG-PC 구조물에 분포하는 열평형 누설 안전성에 대한 해석결과이다.

Fig. 7의 결과에 의하면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 누설되어  $5^{\circ}\text{C}$ 의 열평형 상태에 도달하는데는 약 10일 걸리지만, 여기서  $33^{\circ}\text{C}$ 를 더 낮추어  $-32^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는데

는 50일 정도가 걸리는 것으로 보아 해석적 측면에서 누설 안전성은 충분하다. 여기서, 누설 LNG의 복합하중을 CP 구조물에 가해도 CP는 강도를 확보하고 있으므로 5.1 m의 높이까지는 CP에 의한 LNG의 누설 안전성을 보장할 수 있다. 결국, CP는 열전도성이 우수한 5 mm 두께의 9% 니켈강재로 제작되었기 때문에 열전도 평형온도 해석 측면에서 누설을 지연시키는 효과는 없지만, 강도 안전성이 확보되었으므로 누설을 안전하게 차단하는 효과는 충분하다.

#### 4.4. CP가 파손된 모델

Fig. 3(d)에서 보여준 것처럼 코너 프로텍션(CP)이 누설 LNG의 복합하중에 의해 파손되면서 셀룰러 글라스

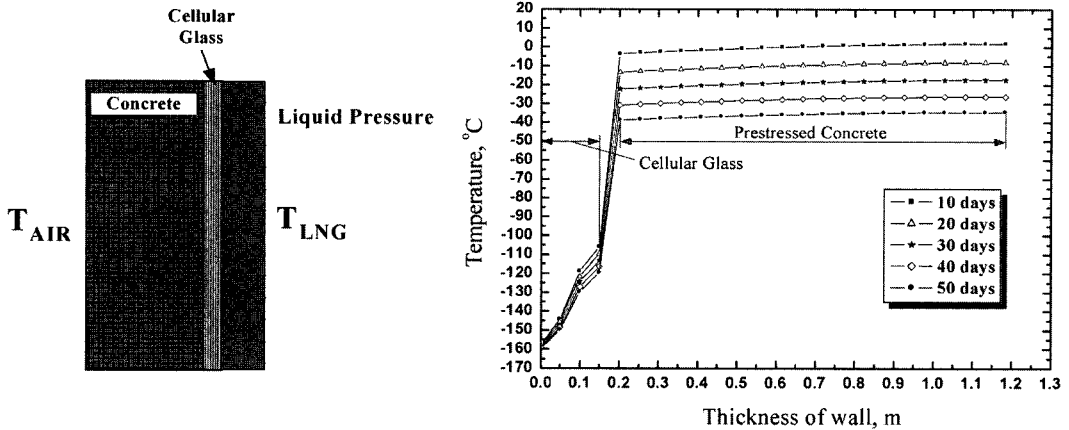


Fig. 8. Delayed leak time of the leaked LNG and equivalent temperature distributions along the wall thickness of CG and PC structure by leaked LNG loads from the fractured insulator of the corner protection.

(CG) 구조물에 의해 모든 하중이 지지된다는 가정을 하고,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 LNG가 벽면을 따라 빠져나가는 열유동 평형온도를 해석하였다.

Fig. 8은 9% 니켈강재의 CP 구조물이 파손하면서 LNG가 누설되었을 때 벽면을 따라서 발생한 열평형 온도분포를 보여주고 있다. 즉, 누설 LNG의 모든 복합 하중이 CG 단열재에 작용한다고 가정할 경우 CG-PC 구조물에 분포하는 열평형 누설 안전성을 해석한 결과이다.

Fig. 8의 해석결과에 의하면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 누설되어  $3^{\circ}\text{C}$ 의 열평형 상태에 도달하는 데는 약 10일 걸리지만, 여기서  $38^{\circ}\text{C}$ 를 더 낮추어  $-35^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는 데는 50일 정도가 걸리는 것으로 보아 해석적 측면에서 누설 안전성은 아직도 충분하다고 할 수 있다.

그러나, 누설 LNG의 복합하중이 CG 단열재에 가해지게 되면 CG는 강도부족으로 금방 파손되므로 CG에 의한 LNG의 누설 안전성은 확보할 수 없다는 결론이다. 따라서, 코너 프로텍션이 파손된 모델에서는 누설 안전성을 확보할 수 없게 된다.

#### 4.5. CG가 파손된 모델

Fig. 3(e)에서 보여준 것처럼 셀룰러 글라스(CG) 단열재가 누설 LNG의 복합하중에 의해 파손되면서 예응력 콘크리트(PC) 구조물에 의해 모든 하중이 지지된다는 가정을 하고,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 벽면을 따라서 빠져나가는 열유동 평형온도에 대한 연구이다.

CG 단열재가 파손되면서 LNG가 누설되었을 때 PC 벽면을 따라서 발생한 열평형 온도분포를 보여주고 있

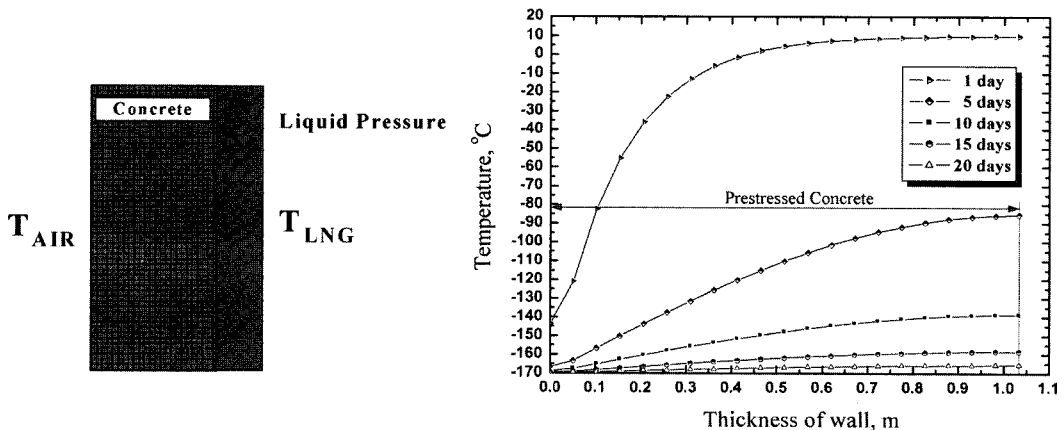


Fig. 9. Delayed leak time of the leaked LNG and equivalent temperature distributions along the wall thickness of the prestressed concrete structure by leaked LNG loads from the fractured insulator of the cellular glass.

다. 즉, 누설 LNG의 모든 복합하중이 PC 구조물에 작용한다고 가정할 경우 PC에 분포하는 열평형 누설 안전성에 대한 결과를 Fig. 9에서 제시하고 있다.

Fig. 9의 결과에 의하면,  $-170^{\circ}\text{C}$ 의 LNG가 누설되어  $10^{\circ}\text{C}$ 의 열평형 상태에 도달하는데는 약 1일 걸리지만,  $-166^{\circ}\text{C}$ 에 도달하는데는 20일 정도가 걸리는 것으로 보아 해석적 측면에서 누설 안전성은 충분하다. 여기에 누설 LNG의 복합하중이 예응력 콘크리트(PC) 구조물에 직접 가해진다고 해도 PC 구조물의 기계적 강도는 충분하므로 내부탱크 파손에 따른 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크의 누설 안전성은 PC에 의해 비로소 보장될 수 있게 된다.

결국, Fig. 3의 파손 프로세스를 따라서 해석한 누설 안전성은 단열재, 코너 프로텍션, 콘크리트 구조물 모두가 강도 측면에서 누설 LNG의 복합하중을 담당할 수 있다는 가정을 하면, LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성은 충분하다는 해석 데이터를 확보할 수 있다. 그러나, 단열재 구조물은 강도가 대단히 취약하기 때문에 누설 LNG에 의해 파손되므로 누설 안전성은 보장할 수 없다. 따라서, 5.0 mm 두께의 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션은 누설 LNG를 5.1 m까지는 체류시키는 역할을 충분히 한다. 여기에 외부탱크인 예응력 콘크리트 구조물은 기계적 강도를 만족하므로, 누설 안전성은 충분히 확보한 것으로 나타났다. 따라서, 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크의 시스템적 누설 안전성은 이론적으로 볼 때 충분한 것으로 생각된다.

## V. 결 론

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크가 파손되면서 발생되는 LNG 저장탱크의 누설 안전성을 고찰하기 위해서 단열재, 코너 프로텍션, 예응력 콘크리트(PC) 재질이 균일하다는 가정을 하였고, 열저항 평형온도 해석을 고

려한 FEM으로 LNG 저장탱크의 누설 안전성을 고찰하였다. 여기서 단열재인 파이버 글라스 블랭킷, 필라이트 파우더, 셀룰러 글라스와 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션, 예응력 콘크리트 구조물 모두가 누설 LNG에 의해 발생하는 모든 복합하중을 안전하게 담당한다는 가정을 하고, 누설 안전성 문제를 해석하였다.

누설 LNG와 접촉하는 단열재나 구조물의 누설 안전성을 검토하기 위해서 여러 가지 파손 프로세스를 가정하였다. 즉, 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크에서 내부탱크가 파손되었다는 가정할 경우 누설 안전성은 단열재, 코너 프로텍션, 콘크리트 구조물 모두가 누설 LNG의 복합하중을 담당할 수 있다는 가정을 하면, LNG 저장탱크 시스템의 누설 안전성은 충분하다는 해석결과를 확보할 수 있다. 그러나, 실제의 단열재는 강도가 대단히 취약하기 때문에 누설 LNG에 의해 모두 파손되므로 누설 안전성은 보장할 수 없다.

그렇지만, 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션(CP)은 강도와 누설 LNG를 체류하는 안전성을 확보할 수 있다. 여기에 외부탱크인 PC 구조물의 기계적 강도는 충분하므로 누설 안전성은 최소한 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, 열저항 평형온도의 영향을 고려한 유한요소해석 결과에 의하면, 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크에 대한 누설 안전성은 확보되었다 할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] BS 7777 Part 8, pp. 16, (1993)
- [2] 김청균, 조승현, “완전 밀폐형 PC 구조물의 누설 안전성에 관한 연구”, *한국가스학회지*, 5(4), 85-91, (2001)
- [3] “MARC User's Manual”, Version K7.3, MARC Analysis Research Co., (1996)