



# 球型 화물 탱크 LNG선의 설계 및 생산 기술

이 철 회 <현대중공업 특수선계획부>

## 1. 서언

지금은 조선 관계자들이 친숙한 용어가 된 LNG 선이지만 1970년대에는 단어의 뜻을 꼭 설명을 해야 할 정도로 국내 조선업계에는 낯설은 선종이었다. 건조기술 도입 당시 모스사에서 소개한 LNG 선 제작과정 영화를 보고 球型 탱크의 그 중후한 모습에 압도되어 외경(畏敬)스럽기까지 했다. 그때 꿈으로만 생각되던 LNG선이 우리의 손으로 3척이나 성공적으로 건조하여 자국(自國)의 에너지를 나르는데 주역할을 하고 있어 현대중공업의 한 일원으로써 자부심과 함께 그동안 LNG선 건조에 전담해온 결과에 새삼 만족해 한다.

우리의 LNG선의 성공적인 건조까지는 오랜 기술 축적기간을 가졌다. 당사의 LNG선 건조기술은 Membrane Type부터 시작하였다. 1977년 프랑스의 가즈 트랜스포트(GT)사, 1978년에는 프랑스의 테크니가스(TGZ)사로 부터 LNG선에 대한 기술을 도입한 이후 양사의 멤브레인형 LNG선인 모캡(MOCK-UP) 모델탱크를 제작 완료 했으며 모스 球型방식 LNG선은 1982년 모스(KM)사와 이에 대한 건조기술을 도입했다. 한편, LNG선 건조의 전(前)단계라 할 수 있는 LPG선(-48℃) 및 에틸렌 운반선 (-104℃)등 17척을 성공적으로 건조하여 인도함으로써 본격적인 LNG선 건조에 대비하여 저온화물에 대한 기술 축적을 하였다.

지금까지 당사에서 LNG선을 건조하기 위해 연구하고 개발한 오랜 과정을 단계별로 요약해 보면 다음과 같다.

### 제 1 단계(1975~1984/5)

LNG선 기술도입 및 R&D를 통한 기초기술 개발기 (GT, TGZ 멤브레인선 기술도입, 모캡(Mock-Up) 탱크제작, NWSP 등 해외입찰참여)

### 제 2 단계(1985~1987/8)

LNG선 생산기술개발 및 LPG선 건조를 통한 LNG선 건조기술 축척기 (각종 LPG, 에틸렌선 17척 인도)

### 제 3 단계(1988~1990)

LNG선 설계, 생산기술의 정착 및 생산 설비 투자기 (기술자 연수 및 훈련, LNG 탱크 제작공장 건설)

### 제 4 단계(1990~현재)

LNG선 실제 건조기 (1,2,4호 LNG선 건조 및 6,9호선 수주)

## 2. 球型화물탱크 LNG선의 설계

기본설계는 지금은 자체 설계가 가능하나 1994년 국내 첫 LNG선 건조선인 "Hyundai Utopia"의 기본설계는 모스사와 공동으로 개발했다. 자체 건조 기술능력이 없을 때 관련 업체의 횡포나 해외 동종업체의 견제는 말 할수 없을 정도로 심하다. LPG선 및 에틸렌선의 건조 경험은 첫 LNG선 건조시 설계와 생산의 많은 참조와 기초가 되었다.



## 2.1 설계 개념

모스방식 LNG 화물탱크는 IMO가스코드(IGC)에서 독립형 탱크 "Type B" 방식으로 분류된다. Type B 방식은 완전한 2차방벽이 요구되는 Type A나 Membrane 방식과는 달리 파랑하중계산, 응력해석, 피로균열 발생해석, 파괴역학해석, 열응력해석 등 최신의 이론적, 실험적 강도평가를 통하여 취성파괴가 일어나지 않는다고 증명된 Tank로서 Tank의 부분적인 파괴로 인한 누출 LNG를 일정기간 저장할 수 있는 부분 2차방벽만 설치한다. 따라서, Type B Tank의 안전성 평가는 엄밀한 파괴, 파괴 강도해석이 관건이 되며 Type B Tank로서 인정받기 위해서는 정교한 해석기술을 통해 검증과정이 필수적으로 요구된다.

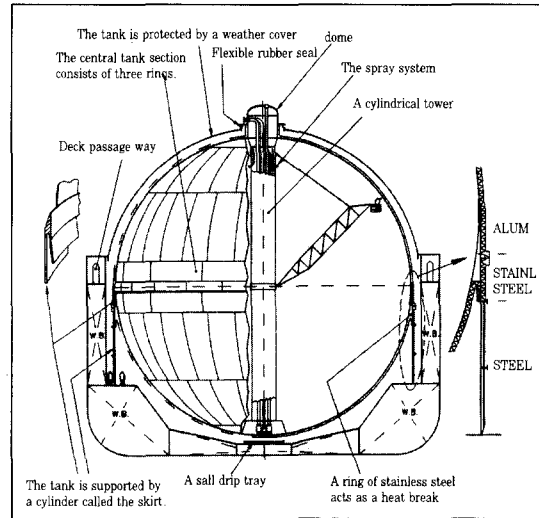
이방식의 설계개념은 파괴전 누출 (Leak Before Failure) 이라고 칭하는데 이 개념은 Tank 피로균열의 진전에 의해 취성파괴가 이르기 훨씬 전에 균열발생을 감지하고 LNG누설에 대한 안전대책을 수립한다는 것으로 이를 만족키 위해서는 Crack이 탱크외판에 발생하는 경우 화물유출을 최초로 탐지한 후 15일 동안은 급작한 대 파괴가 일어나지 않도록 계산으로 증명 되어야 한다.

## 2.2 설계 특성

구형화물 탱크의 형상은 기하학적으로 가장 안전한 耐壓力 용기이며 선체와 탱크가 분리되어 있어 충돌이나 좌초시 가장 안전한 구조이다. 또한 탱크내에는 보강재가 없어 Crack 발생을 최소화한다. 알루미늄 합금 탱크판의 두께는 30mm-60mm로써 후판이며 조선소의 일상업무적인 용접 작업이므로 숙련된 인력의 확보가 용이하다.

탱크는 적도부에서 원통형 스킨에 의해 지지되는데 스킨은 파운데이션 갑판에서 선체와 연결되어 있다. 스킨은 열효율과 냉각시 탱크의 수축을 흡수하는 스킨의 능력을 개선시키기 위해 3가지 재질 즉 알루미늄 합금, 스텔레스강 그리고 강철이 사용된다. 알루미늄 합금과 스텔레스강 사이에는 STJ (Structural Transition Joint)가 배치되어 異種간 금속을 연결시켜 준다

(그림1 참조).



〈 그림 1 〉 球型화물탱크 형상

## 2.3 설계 평가

LNG선의 타당성과 승인을 위해 당사에서 수행한 구조해석은 다음과 같다 (그림2 참조).

- 선체운동계산 (Ship Motion Analysis)  
선체운동에 기인한 수직, 종 및 횡방향 가속도가 결정된다.
- 3차원 유한 요소 모델 (Global 3-D Finite Element Model)  
파운데이션 구조, 이중저와 선체에서의 화물탱크 하중, 바ラスト 및 해수압으로 인한 높은 응력 부위를 확인하고 선체의 변위에 기인한 화물탱크와의 상호응력 (Interactive Stress)을 결정한다.
- 화물 탱크 유한 요소 해석 (Cargo Tank Finite Element Analysis) 스킨의 온도 분포 계산 및 화물탱크의 최대 인장 및 압축 응력 해석을 수행한다.
- 적도대 단면해석 (Equatorial Profile Analysis)  
구형 탱크와 스킨을 연결하는 적도대는 형상의 불연속으로 인한 응력 집중 부위를 갖고 있

- 으므로 상세 응력 분포를 계산한다.
- 스커트 연결부위 해석 (Skirt Transition Joint Analysis)
 

異種금속으로 이루어진 STJ의 응력분포 및 STJ 부재사이의 스캘럽에 대한 응력 집중을 계산한다.
  - 스커트 좌굴해석 (Skirt Buckling Analysis)
 

스커트에 규정된 건조 오차를 고려하여, 수치적, 해석적 방법을 통한 스커트 구조 좌굴 강도를 계산한다.
  - 선체 비틀림 해석 (Torsion Analysis of Hull)
 

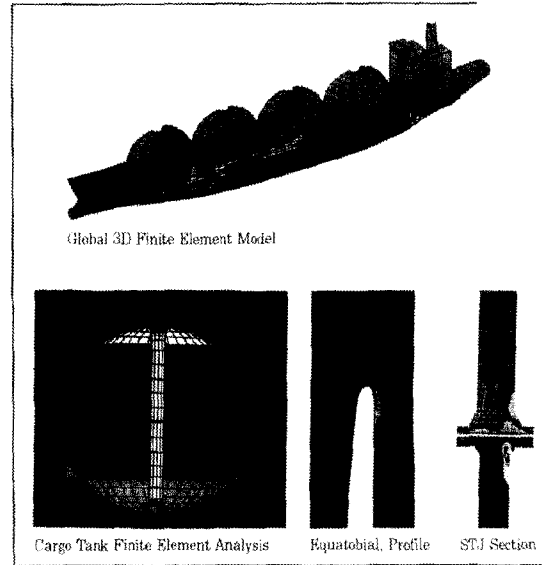
회전모멘트와 종방향 굽힘 모멘트에 의한 선체의 응력 및 탱크카바 평가시의 경계조건을 계산한다.
  - 탱크 카바의 평가 (Assessment of Tank Covers)
 

당사의 자체 Design 인 화물탱크 카바는 Bending, 비틀림과 선체의 복합적인 변위에 대한 반응의 관점에서 평가 된다.
  - 피로/CRACK 전파/누출율 (Fatigue/Crack Propagation/Leak Rates)
 

이 평가의 목적은 다음 사항들을 확인함으로써 높은 안전도를 확보하는 것이다.

첫째 Miner 법칙에 의해 표시되는 피로 누적 계수 (Fatigue Usage Factor)가 낮을 것 (보통 0.5이하), 둘째 비파괴 검사에 의해 탐지되지 않을 수 있는 조그만 결함이 예상되는 선박의 수명동안 격납구조의 두께를 통하여 전파되지 않을 것, 셋째 Crack이 탱크를 관통하는 경우 일지라도 그 누출량이 Code에 규정된 15일에 걸쳐 수용되고 조절되어야 할 것등이다. Drip Pan의 필요한 크기는 누출율에 의해 결정된다.
  - 선체의 온도계산 (Calculation of Hull Steel Temperature)
 

선체 구조에 대한 강제등급을 결정하기 위하여 최저 설계 온도를 정하는데 이는 적절한 열전달 계수를 사용하여 인접공간의 유체 온도로부터 계산된다.



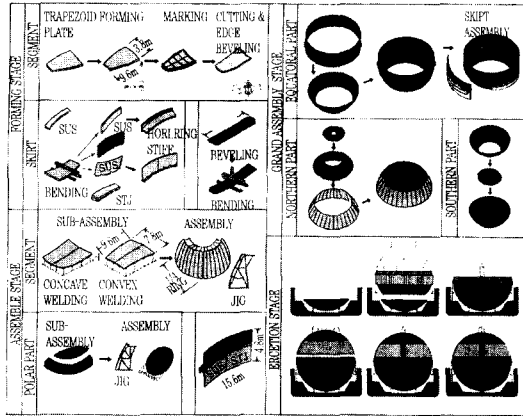
〈 그림 2 〉 구조해석

### 3. 球型 화물탱크의 생산기술

LNG선 건조의 핵심인 화물탱크 건조기술은 기존의 설비를 충분히 활용할 수 있으며 가장 경제적인 옥외 조립방법을 채택했다.

탱크는 3분할 건조법을 채택하였으며 각 분할 조립 부분(Section)은 배에서 일체 조립 되도록 하였다. 1/4 링(Ring) 조립까지는 옥내에서 하고 링 및 블록은 PE장의 바람막이 내에서 용접하고 탑재 용접은 탱크 카바를 덮은 후, 용접하여 옥내와 같은 조건이 되도록 하였다(그림 3 참조). 알루미늄판을 球형상으로 만들기 위한 成型은 광폭의 AI판 가공이 가능하고 精度 유지가 쉬우며 생산성이 높은 핫 포밍 방법을 채택하였다.

알루미늄(Al) 합금의 용접은 일반 구조용 강재와는 달리 활성이 높고, 열전도율이나 열팽창계수가 매우 크기 때문에 용접부에는 결함이 발생되기 쉽다. 후판 알루미늄 합금의 용접시 문제점으로 대두되고 있는 것은 기공, 용입 및 용융불량 및 고온 균열등이다. 용접조건, 용접재료 및 용접환경등을 동시에 고려한 용접설계를 통해 용접부의 결함 발생 원인을 제거 했다.



〈그림 3〉 화물탱크 제작법

LNG 탱크 용접은 크게 대전류 미그(Mig)와 자동 미그용접에 의하여 실시된다. 두께에 따라 대전류 미그 기법은 400 - 850 암페어 범위의 전류를, 자동미그의 경우에는 200 - 300 암페어의 전류범위에서 용접이 실시된다. 대전류 미그기법을 적용하면 약 70 mm의 후판 Al 합금까지도 양면 1 패스 용접으로 시공할 수 있어 생산성 향상에 크게 기여한다. 따라서 6.9호선의 탱크건조공법은 대전류 Mig 용접 적용 범위를 넓히는 공법으로 개선했다. 한 탱크당의 용접장은 약 2,000M이며 100% 자동 용접이 적용된다.

#### 4. 球型 화물탱크의 방열

LNG 탱크주위를 외부 침입열에 의한 화물의 증발을 막기 위해 단열이 시공된다.

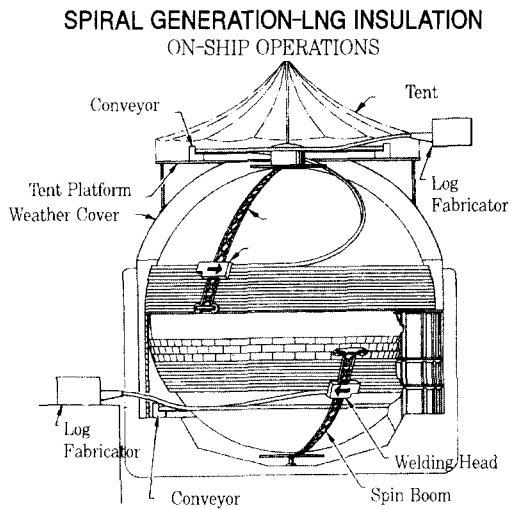
일일기화율 0.15 퍼센트를 보증 할 수 있는 보냉재를 선정하고 가장 확실하고 자동화된 Spiral Generation 방식을 선정했다(그림 4 참조).

나선형 방열방식은 그림과 같이 전체 방열면적의 약 85%를 마치 팽이줄을 연속적으로 감아놓은 것같이 자동화된 기계에 의해 작업이 연속적으로 이루어지기 때문에 다른 방열 시스템보다 작업공수가 현저히 절감되며, 자동화 작업으로 인해 품질 관리면에서 뛰어난 특성을 갖고 있다. 특히, 나선형 방열방식의 구조는 본선 운항중의 안정을

위하여 특수구조를 가지고 있다. 만약 화물탱크로부터 LNG가 누출되어도 LNG 탱크의 표면과 보온재는 전혀 접촉되어 있지 않기 때문에 누출된 가스가 방열재와 탱크 사이를 통과하여 탱크 아랫부분에 설치되어 있는 임시 저장용 소형용기(Drip Pan)로 안전하게 흘러내리도록 함으로써 방열재의 파괴를 일으킬 염려가 없다.

또한 운항중에도 방열재와 탱크표면 사이로 불활성 질소를 지속적으로 공급, 순환시켜 어떠한 가스누출도 감지할 수 있는 안전감지장치(Gas Detector)가 부착되어 있다. 방열재는 폴리스티렌(Polystyrene)이 사용되며 방열두께는 250mm로 되어 있고 최대 일일증발율을 0.15%로 하고 있다.

한편 보냉공사의 작업공법을 개선하여 차후호선부터는 Deck에서 Insulation을 상부로 공급하도록 함으로서 Tent 설치로 인한 불편함을 없앨 예정이다.



〈그림 4〉 화물탱크의 방열

#### 5. 선형개발 및 의장

선형의 개발은 수조시험을 이용한 각종 모형시

험을 수행하며 동일한 크기의 4 탱크를 설치 해야 하는 특성 때문에 비대해지는 선형을 최적화하고 풍압대책, 복원성대책 및 고속 선속에 적절한 소요 마력을 구하였다.

### 5.1 화물 취급 장치

LNG선에서 화물을 직접 취급하는 장치는 LNG 탱크내의 펌프설비와 알루미늄 배관, 상갑판상의 LNG 관련 스테인레스 배관 그리고 가스 콤프레셔실로 구성되어 있다.

본 장치의 설계와 설치는 25년 운항상의 안전성 확보에 최대 주안점을 두고 계획되었다.

모든 설비는 적하항인 인도네시아, 말레이시아, 카타르, 오만 그리고 양하항인 평택과 인천 LNG 인수기지의 설비에 부합되도록 설계되었을 뿐만 아니라 기타 전세계의 적, 양하항의 입출항에도 문제가 없도록 고려되었다. 배관설계의 주요 항목을 들면 초저온 배관의 열응력 해석, 초저온 배관의 용접설계, 초저온 돔 노즐부 응력 설계, 초저온 잠수 펌프의 수격현상해소 등이다.

### 5.2 주 기관 장치

당사에서 日本의 미쯔비씨와 기술제휴하여 국산화에 성공한 주 추진장치는 LNG 탱크로부터 증발되는 가스와 기름을 동시에 추진연료로 사용하는 가장 안전하고 신뢰성이 있는 스팀 터빈 구동방식을 채택하였다. 동 추진장치는 LNG의 증발율(Boil Off Rate)을 최적화 한 것으로서 강제 증발 장치를 적용하여 소모연료를 최대한 절약하게 하였다. 스팀터빈의 건조는 과거에 건조한 14척의 스팀 터빈선에 대한 풍부한 경험을 바탕으로 시스템의 최적화 설계를 수행하며 Heat Balance 계산은 자체 개발한 전산 프로그램으로 수행한다.

보일러는 종래의 가스/기름을 같이 사용하는 방식에 추가하여 항해시 가스만 사용 가능하도록 되어 있다. 또 연소제어장치(A.C.C)는 컴퓨터 제어에 의해 LNG 탱크 내압을 일정하게 유지하도록 하면서 가스를 연소하는 장치 (Total BOG System)를 내장했다.

### 5.3 시스템

조타실(Wheel House) 바로 밑에 위치한 C.A.C.C (Centralized Administration and Control Centre)에서는 기관실 및 화물 관련 주요 기기의 모든 감시/제어가 가능하고 하역 중의 화물부 제어를 제외하고는 모두 무인화 조작이 가능하도록 되어있다. 이들의 원격조정은 종래의 미믹(Mimic) 다이어그램 상의 조작에서 컴퓨터(CRT)를 이용하는 키보드 조작으로 개선했다.

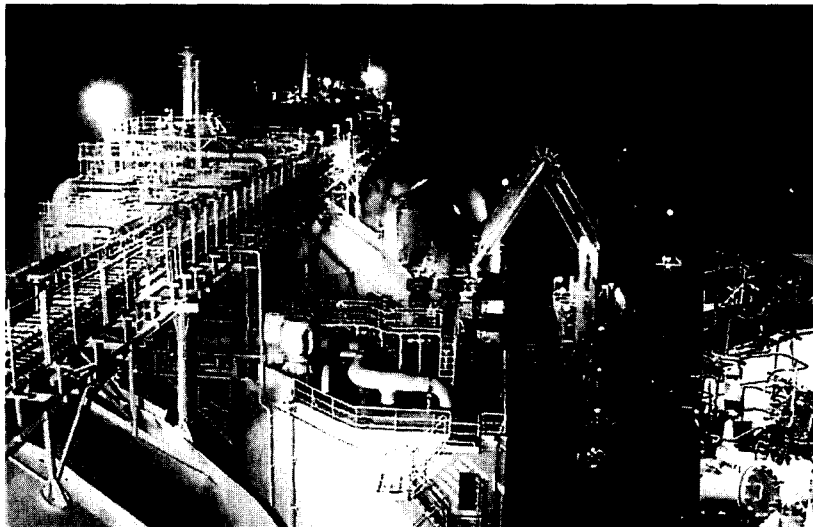
C.A.C.C 에는 다음과 같은 시스템으로 구성되어 있다.

- I.A.S (Integrated Automation System) : IAS는 집중감시, 분산 제어형의 프로세스 컴퓨터 시스템이며 IAS의 구성은 기관부와 화물부로 나누어 각각에 대하여 4개의 칼라 VDU와 2개의 키보드를 중심으로한 워크 스테이션과 입출력 제어장치 및 콘트롤러를 내장한 프로세스 스테이션으로 구성하였다.
- S.M.S (Shipboard Management System) : SMS는 항해기록의 작성, OFF LINE에서는 바코드 시스템에 의한 예비품 관리, 기기류의 보수 관리, 선내 사무처리 및 각종 데이터를 인공위성을 통하여 육상으로 전송시키는 기능을 갖는 컴퓨터 시스템이다.
- CTS (Custody Transfer System) : CTS는 적하시와 양하시의 정확한 LNG량을 측정하기 위해 LNG의 레벨, 압력 및 온도를 측정하여 LNG량을 정확하게 환산하는 컴퓨터 시스템이다.

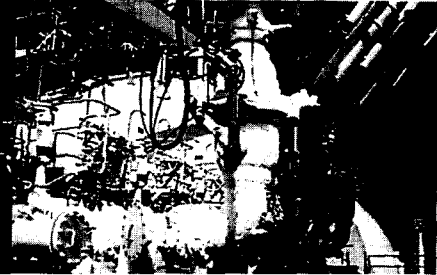
### 5.4 가스 시운전

LNG선의 또 하나의 특성은 배의 기본 성능을 주로 테스트하는 시운전 후에 직접 LNG를 사용해서 화물관련 장비를 테스트하는 가스 시운전이 있다(그림 5 참조).

당사에서는 가스 시운전시의 완벽을 기하기 위하여 첫 건조선인 Hyundai Utopia 호선은 가스 시운전 수행 이전 액화질소(-196℃)로서 저온 테스트를 실시하여 화물 취급설비의 안전성을 확인



〈그림 5〉 Gas Trial 장면

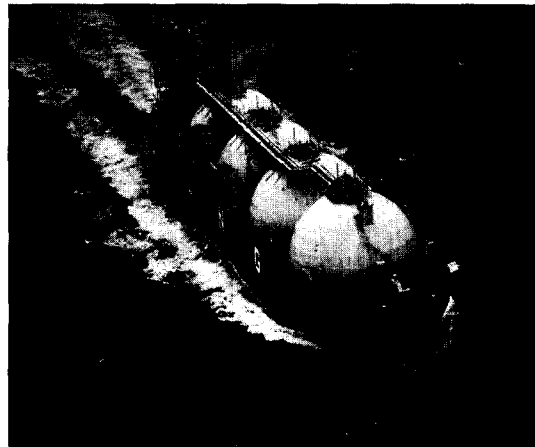


했다. 가스 시운전 중에는 증발가스 연소 시험을 포함하여, 호울드 내 방열에 대한 상태(Cold) 점검과 모스 방식의 장점 중 하나인 압력 양하 시험도 실시했다.

## 6. 결 언

국내 최초의 LNG선을 건조한 우리는 끊임없는 자체 기술개발을 통해 최선을 다하여 6.9호선을 성공적으로 건조할 것이다. 현대중공업은 2개의 자체 연구소와 관련 전문가들의 노력으로 대형화 추세에 따른 선형개발, 탱크의 경제적 건조를 위한 지속적인 공법개발 및 주기관과 저온화물 취급 장치의 최적화 등의 연구개발을 통해 기술 축적을 해나갈 것이다.

더불어 국내 뿐 아니라 해외 LNG선 수주에도



〈그림 6〉 국내 첫 LNG선 HYUNDAI UTOPIA 호

적극 참여하여 우리의 건조기술을 과시하고 고부가가치선 건조에 더욱 매진해 나갈 것이다.



## 이철희

- 1950년 11월 1일생
- 1975년 부산대학교 조선공학과 졸업
- 1975년~현재 현대중공업 기본설계실 부장
- 관심분야: 개스선의 기본설계