



Membrane Type 화물탱크의 설계 및 생산기술

- 대우중공업편

배재류, 배영수 <대우중공업 선박설계연구실>

1. 일반

대우는 1989년 LNG(Liquified Natural Gas)선 개발 계획을 마련하고 경제성 분석을 통하여 "Gaz Transport"(GT) Type의 Membrane형 LNG선을 개발하였다. GT type은 독립 Tank Type인 Moss형에 비하여 탱크 안정성 성능만 뒤질 뿐, 건조비, 유지비, 바람의 저항 최소화, Bridge의 시야 확보로 인한 운항성, 조종성, 탱크 용량 등에서 뛰어난 것으로 평가되어 대우의 개발 선종으로 선정하였다. 또한 "Technigaz"(TGZ) Type의 Membrane 형 건조 기술도 개발하여 두 가지 선형의 건조 능력을 모두 가지게 되었다.

본 자료에서는 한국가스공사가 발주하여 '96년 8월 대우가 2척을 수주한 138Km³ LNG선을 중심으로 작성하였다.

2. LNG선 설계 기술 분야

대우 138Km³ LNG선 설계는 Basic & Hull Structure, Cargo Handling & Hull Outfitting, Cargo Containment, Accommodation, Engine Room, Electric & Automation Part별로 수행한다.

LNG선의 설계에 투입되는 인력은 초기, 상세 및 생산 설계 분야에 200여명 예상되고 설계 소요 시수도 일반 상선의 3배정도 예상된다. 설계

소요 기간도 15개월 정도로 타선종에 비하여 길며, 특히 기장, 선장, 전장 분야 등 의장 설계에 많은 설계 인력과 기간이 필요하다.

2.1 138K LNG선 기본 설계 특징

대우의 GT Type LNG선은 일반 Tanker와 달리 주요목(Main Dimension)상 다른 특징적인 요소들을 찾을 수 있다. LNG선은 Cargo Volume 확보 차원에서 높은 Depth를 가지며, 재화 화물의 낮은 비중의 특성상 낮은 흘수를 갖는다. 높은 Depth에 상대적으로 낮은 흘수는 풍압 면적을 증가시켜 의장수가 증가하고 안벽 계류에 대한 해석도 필요하다.

Speed 측면에서 일반 Tanker에 비하여 작은 폭비와 작은 C_B로 저항 관점에서 유리하지만 기관실쪽 화물창(No.4 Tank)의 일정한 형상 도출의 어려움으로 선형 결정에 고기술이 필요하다. 그리고 선형 결정시 Bow Thruster, Scoop Cooling System 및 Inclined Shaft에 의한 속도 손실을 고려해야하고, Model Test 수행시도 이들 항목에 대한 충분한 검토가 필요하다.

경하 중량 측면에서 LNG선은 일반 Tanker선에 비하여 무거운데, 이는 Double Deck, Insulation, 높은 Depth로 인한 Hull Weight, Engine Room 내 보일러/Reduction Gear 및 Cofferdam Bulkhead의 설치로 인한 Weight 증가가 주원인이기 때문이다.

진동 측면에서 LNG선은 기진력이 Propeller

밖에 없어 작지만, 기준치에서 일반 상선에 비하여 상당히 엄격한 요구(설계 목표 : 1.5mm/sec, 실제 허용치 4mm/sec)를 하고 있다.

대우가 개발한 138K³ LNG선의 일반 배치도 (General Arrangement)의 특징을 보면 다음과 같다.

- Deck상에 Boil Off Gas의 Compression을 위한 Compressor Room 및 Motor Room 설치
- Manifold의 Gas Line을 OCIMF 규정에 맞춰 L.O.A의 Center로부터 ±3m이내에 설치
- 각 Tank에 Cargo Pump 및 Tank Access용으로 Liquid Dome 설치, Boil Off된 Gas 배출용으로 Gas Dome 설치
- Shaft Center Line이 경사(6/100)지게 설치 (Condenser가 Turbine 밑에 설치되기 때문)
- 각 화물창 사이 및 양 끝단에 Cofferdam이 설치되고 Cofferdam내에 일정 온도(5℃) 유지를 위하여 Heating Coil을 설치
- Trim과 Heel 조절용으로 선수에 Ballast Tank (Port & Starboard) 설치
- 기관실내 Gas Oil Storage Tank 설치 (화물창을 Cooling Down 시키기 전 Gas Oil을 태운 배기 가스를 정제 후 화물창에 넣어 산소 용존량을 줄이고 Inert Gas(N₂) 주입이 쉽게 함.)

2.2 대우 138K LNG선의 구조 기술의 특성

대량의 극저온 화물을 고속으로 운송하는 Membrane Type LNG선을 개발하면서 구조적 안정성을 보장하기 위해 일반 Tanker에서 수행하는 구조 안정성뿐만 아니라 다음과 같은 구조 안정성을 추가로 검토하는 기술 개발 들을 수행하였다.

- 저온에서의 선체 재료의 안전성
- 화물창의 Leakage 방지
- Sloshing 하중에 대한 선체 및 부가물의 안전성
- Insulation Box 및 INVAR Membrane의 구조 안전성
- 선체 구조 및 INVAR Membrane의 피로 안전성

LNG선은 운송 화물의 특성상 저온에서 선체 재료의 안전성을 보장해야 한다. Membrane Type LNG선은 Primary Insulation Box의 손상으로 인해 선체 구조 부재에 낮은 온도가 분포하는 상황까지 견딜 수 있는 높은 인성을 갖는 재질을 배치 할 필요가 있다. 이를 위해 선체 주요 부재의 열 전달 영향까지 고려한 보다 상세한 온도 분포 해석을 수행하여 선체 구조 부재의 적절한 Steel Grade를 선정하였다. Fig.1은 대우에서 수행한 선체 온도 분포 해석 결과이다.

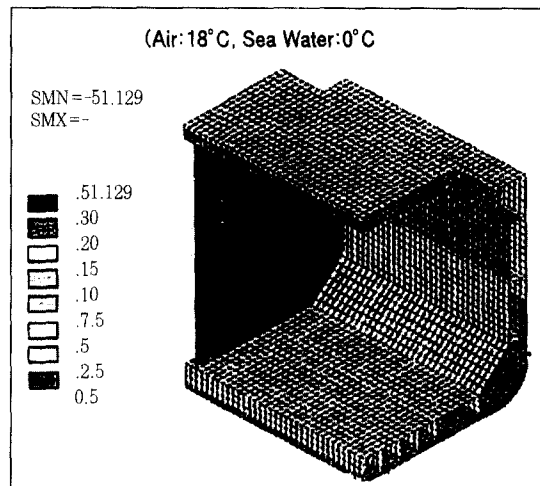


Fig. 1 138K LNG Hull temperature distribution

그리고 선체의 운동 고유 주기와 다양한 화물 적재 상태에서 화물창의 고유 주기가 일치하는 상황, 즉 공진의 위험성에 대한 사전 점검을 통해 공진 발생 가능한 경우에 대한 정보를 제공하는 S-loshing 해석을 수행하였다. 이어 최악의 경우 발생된 공진의 경우에도 화물에 의해 선체에 작용하는 압력을 계산하여 선체 구조 및 Insulation Box의 강도를 보장하도록 하였다. 한편 Sloshing에 의해 발생하는 충격 압력이 Pump Tower 등의 부가물에 작용했을 때의 상황에서 부가물의 구조적 안전성을 보장하기 위해서 필요한 Sloshing 압력을 이용한 시간 영역에서의 구조 해석도 수행하였다.

또한, 화물창의 Leakage 방지를 위해서 Crack



발생이 우려되는 부위에 대해 피로 해석을 수행하였다. INVAR Membrane의 Weld Joint 및 INVAR Membrane의 선체와 연결 부위(Anchoring Flat Bar) 뿐만 아니라 선체 부재의 Hopper 주위와 같은 주요 Knuckle 부위에 대한 피로 해석을 수행하여 대우 개발 Membrane Type LNG 선의 안정성을 검증하였다.

2.3 의장 System 개발

LNG선의 의장 시스템은 대부분 Cargo Handling System을 주축으로 Piping, Machinery, Electric & Automation 분야 등 일반 선종에 비해 많은 시스템이 있는데, 이 때문에 많은 설계 인력/시수/기간이 요구되고 Maker 등과의 기술 협력도 긴밀히 이루어져야 한다.

LNG선의 의장 System에 많은 기술 개발비를 투자하여 많은 기술 개발 성과를 얻었지만 여기서는 LNG선의 IAS(Integrated Automation System)에 대해서만 서술하고자 한다.

LNG선은 지속적으로 화물의 증발이 일어나 폭발성의 위험이 있기 때문에 화물창의 온도, 압력 및 누설 여부를 계속 감시해야 하고, 항해 중에도 Gas Compressor 및 Heat Exchanger 등을 작동 시켜야 한다. 이에 기관실 및 화물 구역에 설치되는 모든 장비의 상태 감시와 원격 제어 및 자동 운전은 통합형 자동화 시스템(IAS)을 통해 모든 기능들이 유기적으로 연결되어 있다.

그리고 IAS에서는 일반적인 Cargo 및 E/R Control 기능뿐만 아니라 Ship Performance, Ship Board Management, Ship Operation Report, Loading Computer Interface 기능이 하나로 통합되어 있다. 또한 IAS는 Control, 통신 기능들에 Redundancy 기능이 있어 하나의 System의 고장시 다른 Back-up System이 자동적으로 그 역할을 대체할 수 있도록 되어있다.

이러한 IAS의 Main System은 선실에 마련된 중앙 제어 통제실(Centralized Administration & Control Center : CACC)에 설치되어 한 장소에서 Cargo System과 기관실 System을 동시

에 관리할 수 있으며, 기관실, Bridge 및 주요 선실 구역 등에는 Sub Control Station과 Monitor가 있다. CACC에는 IAS와 함께 Boiler Control Panel, Turbine Control 및 Cargo 용 Custody Transfer System 등과 같은 선박의 모든 주요 System 제어 장치가 함께 설비되어 있다.

IAS는 국산화가 되어 있지 않아 고가의 장비를 외국 Vendor로부터 구입해야 하고, 기술도 부족하여 설계 및 시운전 단계에서 혼선이 예상되기에 따라 선박 인도 일정에도 영향을 미칠 수 있다. 이에 대응은 LNG선 IAS 시스템의 기본 알고리즘을 개발하고, 실제 가장 많이 사용되는 Hard Ware(H/W) 및 Soft Ware(S/W)를 이용하여 실제 작동 시스템 구축하는 단계에 있으며, 차후 Project부터 척 당 수백만 달러의 장비 가격을 절감할 수 있을 것이다. Fig. 2는 대우가 개발중인 IAS의 개념도이다

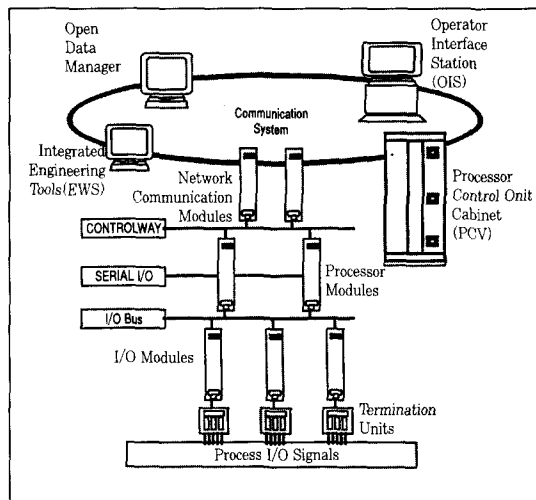


Fig. 2 138K LNG integrated automation system configuration

3. LNG선 생산 기술 분야

대우는 1989년부터 LNG선 건조에 대한 본격적인 기술 개발을 수행하면서, LNG선 생산 기술의 핵심인 Cargo Tank의 제작 기술 확보에 심혈을 기울였다. Membrane Type LNG선의 Cargo

Tank 제작 주요 기술은 다음과 같다.

- Insulation Box/Panel 제작 기술
- Insulation 및 Membrane 설치 기술
- Membrane 가공 및 용접 기술

생산 기술의 확보를 위해 6개의 Cargo Tank의 Mock-up을 1:1의 Model로 제작하였다. 또한 KGC 3호선 건조를 위해 Gaz Transport Type 생산 기술 확보에 주력하여 직접 생산에 필요한 Insulation Box 및 Membrane 가공 및 용접 장비 등 생산 설비를 불란서의 Legrand, ERI, Duarib 및 Italy의 SCM사 등으로부터 기술 도입하였다. 이에 KGC 3호선을 한진과 공동으로 성공리에 건조할 수 있었고, KGC 3호선 건조 이후에도 대우는 생산 기술 개발을 지속적으로 수행하여 왔다.

현재는 특허가 걸려 있는 부분을 제외하고 자체 기술을 확보하여 Insulation Box 자동 조립 설비 및 Membrane 가공 및 용접 장비 등 생산에 필요한 설비를 국산화 개발에 성공하여 보다 효율적이고 경제적인 생산 기술을 확보하였다.

4. LNG선 요소 기술 개발

1990년 이후 LNG선의 요소 기술에 대한 연구 개발을 기술연구소를 중심으로 관련 부서와 공동으로 "전사 기술 전략" 개발 체계 하에서 수행해 왔다. 대우의 LNG선 기술 개발의 특징은 요소 기술을 먼저 개발하고, 완료된 요소 기술을 대우의 수주 LNG선에 실제로 적용시켜 LNG선의 초기 설계 단계부터 해석 기술들을 적용시키는 것이 특징이다.

4.1 확보 요소 기술 분야

대우 LNG선의 설계 및 생산은 기술 도입/용역 사로부터 어느 정도의 기술 자문만 받아 대우에서 직접 설계를 하기 때문에 기술 용역사 및 Maker 등을 상대로 주도적으로 설계를 추진할 수 있다. 개발한 주요 요소 기술들을 소개하면 다음과 같다.

1) Sloshing Analysis

Membrane Type LNG선은 화물창의 형상이 8각형이라 화물창 내의 유체의 유동에 의한 충격량이 크고, Sloshing에 의한 Pump Tower의 손상보고도 있다. 선체 운동과 화물창 내 액체 유동의 공진 가능성 검토를 검토하였고, 아울러 자체 개발한 프로그램을 이용하여 충격 압력을 계산하였으며 DNV와 공동으로 실험도 수행하였다.

2) Fatigue Analysis

LNG선은 구조 설계 때 위험 화물 운송의 영향을 고려하여 타선종에 비하여 안전 계수를 많이 주어 피로 측면에서 유리하다. LNG선의 Fatigue 해석을 BV 와 DNV 의 Rule Requirement에 따라 수행했는데, 가장 Critical한 부분인 Longitudinal과 Bracket 사이 및 종격벽의 Knuckle 부위의 용접부에서도 충분한 Fatigue Life 갖도록 하였다.

3) LNG Pump Tower Analysis

LNG Pump Tower는 화물창내 설치되는 구조물로서 LNG의 양/하역, Volume 및 비중 측정에 필수적이다. Pump Tower에 대하여 급격한 온도차에 의한 응력 해석, Sloshing Pressure에 의한 Dynamic Analysis, Pump Motor의 구동시 Torque에 의한 해석 등을 수행하였다.

4) LNG Insulation Panel Analysis

극저온 온도하에서 화물의 안정을 도모하고 선체의 구조물의 온도를 유지하는 역할을 하는 것이 Insulation Box이다. Insulation Box의 구조 해석을 통해 Box의 안전성을 검증하였다.

5) Calculation of 3-D Hull Temperature Distribution and BOR

LNG선은 경제성 관점의 BOR(Boil Off Ratie) 계산, 안전성 관점의 선체 Steel Grade 선정 및 보온재 선정의 적정성 확보를 위해서 선체 온도 분포 계산을 해야한다. 주요 부재의 영향을 고려한 LNG선의 온도 분포를 계산하여 선체 구조 도면에 적용하였다.

6) Cofferdam Heating Coil System

LNG선의 Cofferdam 내의 온도는 화물창의



온도 영향으로 Heating 하지 않으면 -40°C 내외가 되는데, Cofferdam 및 화물창을 구성하는 BHD는 구조 부재로서 허용 강도를 만족하는 설계 온도는 5°C 이므로 Cofferdam내의 Heating이 필요하다. Cofferdam 내에 필요한 Heat Flux와 Heating Pipe의 길이 산정 및 효율성을 계산하였다.

7) Structural Analysis of Anchoring Flat Bar

화물창과 Inner Hull을 연결하는 Anchoring Flat Bar에 대한 허용 변위와 피로 해석을 계산하여 Anchoring Flat Bar 이면의 생산 지향적인 Bracket 보강 방법을 검토하였다.

8) Vibration Analysis

LNG선의 진동은 주기가 Steam Turbine을 사용하기 때문에 주기에 의한 기진력이 작으므로 Propeller에 의한 기진력 등에 의한 선체 진동 해석을 하였고 설계에 반영하였다.

9) IAS(Integrated Automation System)

LNG선은 대규모의 Control & Monitoring System이 사용되는데 약 3,000개 정도의 입출력수로 구성된다. 그 구성은 분산형 구조를 가진 DDCS(Distributed Digital Control System)로 최신의 32 Bit Computer를 사용하고, 각 System 및 장비의 상태 감시를 위해 출력되는 신호는 Process Station 또는 별도의 Computer에 의해 작동되도록 되어 있다. LNG선의 IAS System의 자체 설계 기술을 개발 중에 있다.

10) Heat & Material Balance for Steam Turbine

LNG선의 주추진 기관과 발전 등에 사용되는 증기 기관의 설계시에는 각 장비들간의 상호 작용과 전체 연료 소모량에 미치는 영향 등을 파악하기 위한 열 및 물질 정보의 계산이 필수적이다. 범용 Soft Ware(S/W) HYSIS와 Excel 프로그램을 이용한 간편하고도 계산의 신뢰도가 높은 Program을 개발하였다.

11) Scoop Cooling System

LNG선은 Steam Turbine System의 Steam을 냉각하기 위하여, 보통 항해중인 선박의 선속에 의해 야기되는 동유체력을 이용하는 Scoop

Cooling 방식을 사용한다. Scoop Cooling System의 성능 계산, 성능 향상을 위한 부가 장치 및 선체에 미치는 저항 등을 계산하였다.

12) In-pipe Surge Analysis

LNG선은 화물 하역중 비상 상황 발생시 Pump를 정지시키고 ESD(Emergency Shut Down) Valve와 Stop valve를 폐쇄시킬 때 관내 유체의 급격한 속도 변화로 압력 상승을 유발시켜 비정상 유동 상태인 Surge 현상이 발생한다. Surge 현상을 최소화 할 수 있는 방안과 압력파의 맥동을 피하기 위한 해석을 수행하였다.

13) LNG Pipe Stress Analysis

LNG선은 LNG Pipe의 응력 해석으로 Pipe System의 자체 및 Support 강도의 유지와 함께 각종 기기/장비에 미치는 반력의 크기를 확인해야 한다. 온도 변화에 의한 Pipe의 수축 및 Pipe 연결부에서 발생하는 응력 집중 현상에 대하여 계산하여 안정성을 검증하였다.

14) TGZ-LNG Type Automatic TIG Arc Welding

대우는 TGZ Type LNG선의 TIG 자동 용접기를 개발하였는데, Corrugated Part를 추적할 수 있는 Vision Sensor 기술과 용접 대차 기술을 자체 개발하여 TGZ Type의 LNG선 수주시 우수한 용접 품질 향상과 M/H를 절감할 수 있게 되었다.

15) Fatigue Analysis of INVAR Steel Lap Joint

GT Type LNG선의 화물창은 Lap 이음부, Seam 이음부, Edge-Flange 이음부에 의해 조립되는데, 이중 Lap 이음부는 구조적으로 가장 취약한 이음부로서 피로 안전성 측면에서 매우 중요하다. 용접 재료를 사용하지 않는 자동 TIG 용접을 INVAR/SUS 용접부의 피로 강도에 미치는 허용 응력에 관하여 해석과 시험을 수행하여 IMO의 용접 피로를 만족하는 결과를 얻었다.

16) Backhand Welding of GTAW for INVAR

생산성 향상을 위하여 Filler Metal이 없는 수동 TIG 후진 용접법에 대한 기술 개발을 하여 GT사의 허용 기준을 만족하는 결과를 얻었다.

17) Stainless Steel Pipe Butt Welding

Stainless Steel의 Pipe는 박판으로서 용접열에 의한 수축 현상 즉 함몰 현상이 발생한다. 최적의 용접 조건을 찾아서 함몰 현상을 방지하는 시공 기술을 확보하였다.

4.2 향후 LNG선 기술 개발 항목

대우는 LNG선의 고유 모델의 개발을 위해 수주 호선의 긴급 수행 설계/생산 기술 개발 외에도 향후 독자 설계와 생산을 위한 기술 개발 과제를 발굴하여 연구 개발을 수행/준비중이다.

- LNG선 및 저장 탱크용 Membrane의 대우 Type 개발
- Sloshing에 의한 방열 상자의 파괴 해석
- Cargo Pipe Unit 구성 방안
- Cargo Machinery Room Unit 구성 및 설치 방안
- Hold내 족장 최적 설치 연구
- 화물창의 밀폐 실험
- Cargo Pipe 내부 Camera Inspection 기법

5. 결언

국내 LNG선의 발주에 힘있어 국내 주요 조선소들이 LNG선 건조 실적을 쌓을 수 있게 되었

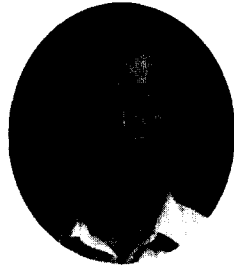
고, 이를 바탕으로 해외의 LNG선 신조 입찰에도 당당히 참석할 수 있게 되었다.

그러나 고부가 가치선의 대표격인 LNG선의 건조를 위한 설계 기술, 생산기술 및 기자재 국산화 등에는 기술 자립도가 낮아 아직도 많은 기술료를 지불하고 선박을 건조하고 있는 실정이다. LNG선을 비롯한 고부가 가치선의 독자 기본 설계와 생산 기술을 확보하기 위하여 선진 조선소에서 이 전을 기피하는 설계 및 생산의 핵심 요소 기술의 독자적인 개발이 필요하다.

또한, 그동안 국내 조선소간에 국적선 수주를 위해 경쟁이 치열하였는데, 이제는 일반 상선에 대해 각 분야별로 기술 협력 체계가 잘 진행되는 것처럼 LNG선 분야에서도 기술 협력 체계가 구성되어 각 조선소별로 축적한 기술을 공유함으로써, 향후 해외 LNG선 신조 Project에서 국내 조선소들이 힘을 합쳐 경쟁력 있게 대처해 나갈 수 있기를 기대한다.

참고 문헌

- [1] 최성락, "LNG 운반선에 관한 소개", 조선공업협회보, 3월호, 1995, 한국조선공업협회
- [2] IGC Code, 1993, IMO



배 영 수

- 1955년 7월 20일생
- 1992년 미시간대 대학원(박사)
- 1977년~현재 대우중공업 선박설계연구실 연구위원



배 재 류

- 1961년 2월 25일생
- 1985년 서울대 조선공학과
- 1985년~현재 대우중공업 선박설계연구실 선임연구원
- 관심분야: LNG선, LNG 육상 저장 Tank