



LNG선의 역사 및 Type별 특성

양홍종, 이세동 <한국선급 LNG 기술반>

서론

청정에너지로 표현되는 LNG의 수요는 국내외 모두 매우 빠른 속도로(폭발적으로라는 말은 쓰지 않는 사람도 있음) 증가할 것으로 예상하는데, 우리 나라의 LNG에 관련한 역사를 더듬어 보면 1983년 한국가스공사 발족을 시작으로 1986년 초에 평택 인수기지가 건설되어 같은 해 10월에 *Golar Spirit*호에 의하여 최초의 LNG가 도입되었다.

우리 나라의 LNG운반선 건조는 LNG 도입시기보다 훨씬 전부터 준비되어 왔고, 1990년대 초에 비로소 실현되어 현재 4호선인 *Hyundai Greenpia*까지 인도되었다. 이로써 우리 국적선에 의한 LNG 도입은 구체화되어, 현재 후속 5호선에서 10호선까지 발주되었고 조만간 11호선에서 15호선까지의 5척의 발주도 기대되는 바, 이 시점에서 LNG 해상수송에 관한 역사와 LNG선 Type별 특성을 간략하게나마 살펴보는 것은 의의가 있다고 하겠다.

LNG선의 역사

LNG 해상수송의 역사는 여타 다른 산업에 비하여 짧은 편이다. 그리하여 혹자는 LNG의 해상수송을 젊은 산업(Young industry)이라고도 표현하는데, 그 짧은 역사에 비하여 빠른 성장과 또한 안전한 발전을 하여온 것이 이 산업의 특징이라고 하겠다.

LNG의 해상수송 역사를 짚어보는데는 LPG의 해상수송 역사와 비교하여 보는 것이 의미가 있을 것 같다. LPG 해상수송은 *Aquinita*라는 선박에 압력탱크를 이용하여 처음으로 시도되었는데 이 시도는 선박의 좌초로 실패하고 말았다. 그리하여 1934년에 *Megara*라는 oil tanker에 cylindrical tank를 설치하여 propane과 butane을 운송하였는데 이를 LPG 해상수송의 시초로 보면 되겠다. 한편 LNG는 1950년대에 와서 해상수송이 논의되었고 또한 해상수송에 성공하였는데 그러고 보면 LPG 해상수송보다는 20년이상 늦게 시작되었다고 하겠다.

Oil field에서 부산물로 생기는 천연가스(이때의 천연가스는 Associated gas로 부른다)는 태워 없애는 것이 일반적인 관례였고 1940년말까지 그러하였다. 1950년대 초에 낭비하는 에너지에 대한 관심이 고조되었고 많은 방안이 생각되었으나 pipe line을 이용하여 소비자에게 공급하는 것이 가장 실용적인 방안이었다. 그러나 통상 대부분의 oil field나 gas field는 소비지와는 지리적으로 너무 멀기 때문에 선박에 의한 운송을 생각하게 된다. 이 시기 이전 1915년에 Godfrey L. Cabot는 강에서 barge로 액화가스를 하역하고 수송하는 아이디어로 특허를 취득하였으나 이 아이디어를 실행하지는 않았다. 1951년 Union Stockyards of Chicago는 미국 Louisiana oil/gas field에서 생산된 gas를 액화하여 육상 tank에 저장하고 barge로 Chicago로 운송하여 다시 gas로 환원한다는 계획을 세웠으며 이때의

가장 중요한관이 강으로의 수송이었다. 이 barge의 제작을 시도한 것이 Willard S. Morrison의 팀이었는데 화물격납설비를 설계하는 개념을 두가지로 생각하였다. 그 하나는 저온재료로 tank를 제작하고 mild steel로 된 선체 안쪽에 방열을 하여 tank와 선체 안쪽의 방열재 사이에 공간이 있는, 말하자면 뒤에 나오는 Conch type의 형태였고, 다른 하나는 tank를 mild steel로 제작하여 tank 내부에 방열재를 부착하되 화물이 방열재로 스며들지 않는 구조, 즉 내부방열방식이었다. 이들은 두 번째 방식을 택하였고 방열재료는 balsa wood를 사용하였다. 이 project는 실패하고 말았지만(첫 번째 방식을 택하였어야만 하였다) 많은 LNG특성을 이해하게 되었고 특허 받은 항목을 포함하여 많은 know-how를 얻었다.

몇 년 뒤 Morrison project에 자극 받아 유럽에서 많은 연구가 있었다. 1954년에 Dr. Oivind Lorentzem 이 17,000 ton 화물용량의 구형 tank 기본설계로 DNV의 승인을 얻었고, 1955년에는 Shell Group이 London에서 work programme을 기초하여 London의 Marine department에서는 ship design을 맡고 Amsterdam 연구소에서는 material(특히 Insulation)을 담당하여 연구하였으나, Suez 전쟁 발발로 인한 예산삭감으로 연구가 중단되었다. 프랑스에서도 해상수송에 대한 조사가 시작되었는데 여기에서는 oil field에서 생산되는 수반가스(Associated gas)의 처리가 아니라 Algeria에서 발견된 대형 gas field의 개발에 대한 것이었다. 1954년 Gaz de France가 적합성 연구후 1956년 프랑스 정부에 보고서를 낸 바 pipe line 수송보다는 해상수송이 유리한 것으로 결론을 지었다. 그리하여 프랑스 정부는 선박개발을 위하여 Worms Group을 지명하였다. France에서도 많은 기술발전이 있었으나 Worms의 회장은 미국 Group에게서 licence를 받는 것이 경제적이라 생각하여 미국 Group에 licence를 요청하였으나 미국은 이를 거절하게 된다. 이 때 이미 미국은 최초의 LNG 선인 *Methane Pioneer*를 취항시켜 놓고

있었다. 이에 따라 프랑스는 Worms, Air Liquide, Gaz de France 및 Gazocean 등이 연대하여 Methane Transport를 결성하여 독자적으로 연구를 진행하게 된다. 이리하여 LNG에 대한 연구는 대서양 양측에서 독자적으로 진행되었다.

첫 LNG 운반선에 대한 project는 Constock과 British Gas Council이 연계하여 수행되었는데 적합성 검토에서 T.2 type tanker의 개조와 C1-M-AV1 type 건화물선의 개조가 논의되어 후자를 택하기로 하였다. 선정된 선박은 *Normarti* 라는 배였고 5,000m³의 LNG를 대기압상태로 수송하도록 계획되었다. 선급은 여러 가지 정치적 이유로 하여 Lloyd's와 ABS 이중선급으로 하였고, 도면승인 및 개조 검사에 US Coast Guard도 참여하게 된다. 방열재료는 balsa wood를 주체로 한 목재류이었고 tank 재료는 aluminium alloy 5356-0를 사용하였다. 용접부에 100% X-ray 검사를 적용하였는데 aluminium 용접의 초기발전 단계이어서 26%정도의 불량율을 기록하였다. 현재의 0.1% 미만의 불량율과 비교된다. 설계에 있어서 채택된 화물의 비중도 0.6으로 하였는데 이는 훗날 LPG 운송에도 사용하기 위한 것이었으며 실제로 LPG 운송에도 투입되었다. 선박의 이름은 *Methane Pioneer*로 명명되었으며 gas trial에서 83일을 소요하였고 gas trial후에 tank 용접부 검사에서 용접결함부의 standard 합의에 많은 논란이 있었으나, 용접학회 등에 조회하여 결함부의 처리는 완결되었다. 이리하여 첫 시험선(Prototype)인 *Methane Pioneer*의 역사적인 maiden voyage는 full cargo로 1957년 1월 25일 미국 Louisiana를 떠나 동년 2월 20일 영국 Thames강 하구의 Canvey Island에 도착하는 것으로 성공적으로 수행되었다.

프랑스에서는 미국에서와는 달리 많은 회사들이 공동 참여하여 연구를 진행하였다. Gaz de France, Worms, Air Liquide, Segans, Gazocean Shipping Company 및 몇몇 은행들이 Methane Transport를 결성하였고, 프랑스 정부의 노력에 힘입어 Liberty type선 *Beauvais*의



개조로 두 번째 시험선을 시도하였다. 이 배는 LNG 수송을 위한 여러 type의 tank를 평가하기 위하여 No.1 tank는 Atlantique 조선소 설계로 400m³의 자기지지형 prismatic tank를 aluminium alloy AG-4로 제작하고, No.2 tank는 Dunkerque and Bordeaux 조선소 설계로 120 m³의 multi-lobe(poly cylindrical) tank를 9% Ni steel로, No.3 tank는 Trait 조선소가 Mediterranee 조선소와 협조하여 120m³의 vertical cylindrical 형태로 AG-4 aluminium alloy로 제작하고 외부 container는 9% Ni steel로 제작하였다. 모든 tank의 방열재로는 expanded PVC를 사용하였다. 1962년 3월부터 6개월이 넘게 걸린 이 배의 시운전 경험은 그 후에 Jules Verne의 25,500m³ cylindrical tank 채택에 기여하게 된다.

최초의 상업적 목적의 LNG 선은 Conch type의 Methane Princess와 Methane Progress 그리고 cylindrical tank의 Jules Verne라 하겠다. 먼저 Methane Princess와 Methane Progress에 대하여 언급하면, Algeria에서 생산된 gas의 수송을 위하여 the new Conch company가 결성되었고, Vickers Armstrong 과 Harland & Wolff 두 조선소가 선정되었다. Tank 재료는 5083-0 aluminium alloy가 사용되었고 방열재는 balsa와 glassfibre가 사용되었으며, 이때의 설계 Boil off rate는 0.33%/day 이었다. 선급은 역시 ABS와 Lloyd's 이중선급으로 하였다. Methane Princess와 Methane Progress 이 두 배는 처음으로 LNG boil-off gas를 boiler 연료로 bunker와 함께 사용한배로 유명하다. 이 배에서는 cargo tank와 insulation 사이 간격이 너무 좁아 검사 및 수리할 공간이 없는 것이 개선하여야 할 점으로 지적되었다. Jules Verne에 대하여 언급하면, 이 배도 Algeria Arzew와 Le Havre 간의 항로에 투입하기 위하여 계획되었으며 선주는 la Societe Gaz-Marine 으로 조선소는 Seine Maritime 조선소가 선정되었다. 이 배의 cylindrical tank 재료는 9% Ni steel이 사용되었고,

방열재 재료는 PVC foam 과 Perlite가 사용되어 Boil off rate는 0.27%/day로 설계되었다. 선급은 BV가 선정되었다. 이 세척의 배는 1960년대 중반에 투입되어 최근까지도 운항하고 있었으며, tank의 상태는 양호한 것으로 알려져 있다. 그 후 Jules Verne는 선명이 Cinderella로 바뀌었다.

Membrane design에 대한 아이디어는 처음에 Constock이 1954년 특허를 내었는데 그 뒤 특별한 발전이 없었다. membrane tank의 잇점은 ship structure 자체가 cargo load를 흡수하고, 저온용 tank 재료를 많이 줄일 수 있고, 독립 tank 주위의 쓸모없는 공간을 줄여 용적효율을 증가시키는데 있다. 그 뒤 선주사인 Oivind Lorentzen과 Bennett Group 그리고 DNV가 연계하여 소형 시험 tank를 제작하여 시험하였는데 이때의 membrane은 3mm 두께의 aluminium alloy 였고 방열재는 목재 격자에 mineral wool을 채우고 합판을 덮은 것과 polyurethane foam layer인 구조였다.

먼저 Technigaz Membrane에 대하여 얘기하면, Gazocean S.A의 계열사인 Technigaz는 membrane type의 장점을 주시하고 Lorentzen과 Bennett Group으로부터 설계와 특허권을 취득하여 개발 programme에 착수한다. 우선 aluminium 보다 많은 잇점이 있는 stainless steel로 membrane 재료를 바꾸고 시험선의 건조에 착수한다. 이렇게 하여 첫 membrane type 선박인 605m³의 Pythagore가 1964년 Le Havre 조선소에서 건조되었다. 이 배는 두 항차만 LNG를 싣고 그 뒤 LPG/ethylene 수송에 이용되었다.

Conch 와 Gazocean은 1967년 Conch의 insulation system과 Technigaz의 membrane system을 통합하여 개발하기 위하여 Conch Ocean과 Transgaz Services를 결성했다. 이 system은 Technigaz의 stainless steel membrane primary barrier와 Conch의 plywood secondary barrier 및 balsa wood insulation을 사용한다. Technigaz Membrane system은 Saint Nazaire 조선소에서 1971년 Algeria의

Skikda와 Boston route를 위한 50,000m³ LNG 선 *Descartes*에 처음으로 장비 되었다. 얼마되지 않아 이 두회사는 결별하였는데 Shell이 4척의 75,000m³ LNG 선을 Technigaz Membrane system으로 Saint Nazaire 조선소에 발주하였다. 이 배들이 1972년의 *Gadinia*, 1973년 *Gadila*와 *Gari*, 그리고 1974년의 *Gastrana*이다. 이 Technigaz Membrane은 balsa wood의 가격 때문에 PVC/ply sandwich panel과 간단한 joint design으로 대체되었고(MKⅡ), 그 뒤 미국의 GE에 의하여 개발된 polyurethane foam block과 aluminium foil secondary barrier system(MKⅢ)으로 발전되었다.

Gaz Transport Membrane system에 대하여 설명하면, Gaz Transport사는 Jules Vernes의 cylindrical tank 설계가 경제성이 없다고 생각하고 36% nickel steel(Invar) membrane system 설계에 착수한다. Invar는 Invariable의 약자로 온도에 따른 팽창 및 수축이 극히 적어 많은 잇점을 가진다. 이 system은 primary와 secondary barrier에 똑같이 Invar를 사용한다. 방열재는 plywood box를 제작하여 Perlite granular/powder를 채워 사용하고 여기에 N₂ gas를 순환시킨다. 이 system은 30,000m³ LPG tanker인 *Hipolyte Worms*에 처음 장착되었고, LNG선에는 Alaska와 Japan route에 투입된 71,500m³의 *Polar Alaska*(1969)와 *Arctic Tokyo*(1970)에 적용되었다. 이 두배는 그 뒤 일본에서 개발된 85,000m³의 IHI-SPB type 선박으로 대체되었다.

조금 별난 경우로 Esso project를 언급하여야 하겠다. Esso는 1965년 Libya 생산 LNG를 Italy와 Spain에 수송하는 project를 계약하였는데 40,000m³ 용량의 LNG선이 4척 필요하였다. 그때의 여러 가지 정황을 고려하여 Esso는 tank를 독립형탱크 type으로 독자 개발하기로 결정을 하게 된다. 이리하여 Esso 독립형탱크 type은 Conch의 특허사항을 침해하지 않고 별도의 tank type을 개발하였다. 그 특징은 tank side 부에

넓은 면적의 vertical side key를 채택하였고, 통상의 oil tanker 처럼 horizontal stringer와 deep vertical web stiffening이 있는 것이었다. 따라서 이 type은 operation시 각 부의 온도 구배에 무척 신경을 써야만 하였다. 첫 배인 *Esso Brega*(1969), 둘째 배인 *Esso Portovenere*(1970)과 *Esso Liguria*(1970)가 Italy Italcantieri 조선소에서 지어졌고 *Esso Laieta*(1970)가 Spain Astano 조선소에서 지어졌다. 이 type은 비싼 선가와 복잡한 구조 때문에 이 4척 이외에 더 지어지지 않았다.

구형 tank는 초기부터 많이 선호한 design중의 하나이다. 이 type으로는 notch부를 피할 수 있고, 육상에서 압력 tank로 많이 쓰여온 경험이 있다. 그러나 조선의 입장에서 보면 hull space의 비효율적인 이용, 구형 tank가 hull의 일체성을 해치는 점, 항상 가변성이 있는 선체로부터의 지지구조문제 등으로 기피되어 왔다. LNG기술에 많이 참여하지 않은 Norway의 Kvaerner Group이 LPG선에서의 경험으로 구형탱크의 잇점에 관심을 갖게 된다. Kvaerner Group의 Moss-Rosenberg와 DNV가 연계한 몇 년간의 개발 작업 후에 1970년 Paris에서 열린 LNG 2 Conference에서 secondary barrier가 없는 (Partial secondary barrier) 구형 독립 tank의 88,000m³ LNG선이 소개된다(Moss type). tank 재료는 9% Ni steel이었다. 여기에서 Leak before failure 및 Small leak protection의 개념이 소개된다. 특기할 일은 Kvaerner/Moss 구형 tank type은 시험선을 짓지 않고 바로 실선에 적용되었는데 이는 Gaz Transport의 membrane도 마찬가지이다. 시험선이 없이 바로 실선에 적용한 두 type이 모두 현재 널리 쓰이는 성공작인 것은 재미있는 일이다. Moss Rosenberg의 첫 두척의 LNG carrier는 87,600m³의 *Norman Lady*와 *LNG Challenger*로, Norway Stavanger의 Moss-Rosenberg조선소에서 1973년에 건조되었다. 이 두배만 9% Ni steel을 쓰고 그 후에는 aluminium으로 대체되었다.



그러나, 구형 tank로 secondary barrier 없이 건조된 첫 번째 선박은 Technigaz system을 장비한 4,000m³의 시험선 *Euclides*호이며 1971년에 건조되었다. 그리고 다른 type의 구형 tank를 소개하면 Chicago, Bridge & Iron Company의 구형 tank로 적도부에 double ring girder가 있고 leg support로 지지된다. 그리고 Pittsburgh des Moines(미국)와 Gaz Transport(프랑스)가 연계하여 *Jules Verne*의 경험치를 살린, 상부만 구형이고 하부는 cylindrical로하여 용적효율을 증가시킨 type이 있으며, Spain의 Sener가 발표한 구형 tank type이 있는데 이는 적도부 지지구조만 다르고 Moss type과 개념이 똑같아 Moss Group과 오랫동안 특허소송을 겪었다. 그리고 1982년에 발표된 Hitachi Zosen과 Chicago Bridge가 연계하여 개발한 구형 tank가 있는데, 지지구조는 long leg 대신 chock 형태의 stump를 사용하는데 시험선 *Sankyo Ethylene Maru*에 Hitachi prismatic tank와 함께 장착되었다.

El Paso project에서의 Conch type tank의 실패로 각형(Trapezoidal) tank는 더 이상 채택되지 않는 듯 하였으나 각형 tank로 많은 LPG선을 건조한 일본은 이 경험을 가지고 IHI-SPB type을 개발하게 된다. IHI-SPB type은 Paris에서 열린 Gastech 82 Conference에서 발표되었는데 각형 tank이면서도 Leak before failure 개념이 도입된 독립 tank type B 이므로 secondary barrier가 없다는 특징을 갖는다. 여러 해의 노력 끝에 Dr. Fujitani 팀은 두척의 87,500m³ IHI-SPB type 수주에 성공한다. 이 배들이 *Arctic Sun*과 *Polar Eagle*이고 앞에서 언급하였듯이 *Polar Alaska* 및 *Arctic Tokyo*와 1993년에 교체되었다.

이 외에도 십수가지의 새로운 design이 시도 및 개발되었는데 모두가 상업적인 선박으로는 개발되지 못하였거나 설계만으로 끝난 경우라 여기서는 언급하지 않았으며, 개발이후의 대형 project에 대한 역사와 현재 우리 나라가 보유하고 있는 new generation LNG선 및 의장품 등에 대한

사항은 지면관계상 다음기회로 미루기로 하였다.

LNG선의 Type별 특성

이상에서 LNG운반선에 대한 역사적 고찰을 하였는데, 실질적으로 LNG운반선을 건조하기 위하여는 IGC Code(International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)의 관련 제 규정을 만족하여야 한다.

우리가 액화가스운반선을 분류하는 것은 액화된 gas를 격납하는 화물격납설비(Cargo containment system)에 따라서 분류하는 것이며 IGC Code에 따르면 일체형탱크(Integral tank), 멤브레인탱크(Membrane tank), 세미-멤브레인탱크(Semi-membrane tank), 독립형탱크(Independent tank) 및 내부방열방식탱크(Internal insulation tank)가 있다. 여기서 일체형탱크란 탱크가 선체구조의 일부를 구성하여 탱크내의 화물에 의한 하중 뿐만 아니라 선체구조로서의 하중에 의한 영향도 받는 탱크를 말하며, 멤브레인탱크란 인접하는 선체구조에 의하여 지지되는 얇은 막으로 구성되는 비자기지지형 탱크를 말하는 데 멤브레인을 지지하는 선체구조는 실제로는 일체형탱크와 같다. 독립형탱크는 type A, type B 및 type C의 3종류가 있는데, type A는 화물에 의한 중력 및 유체의 유동적인 하중을 지지할 수 있는 일반적인 강도해석법에 따라 설계되는 탱크를, type B는 정밀한 해석을 사용하여 설계된 탱크를, type C는 설정된 설계증기압을 설계의 기준으로 삼은 압력용기형 탱크를 말한다. 액화가스중 비등점이 상당히 낮은 LNG는 여러 탱크형식중 현재 멤브레인탱크 및 독립형탱크 type B만이 경쟁력을 갖고 건조되고 있다.

멤브레인탱크로는 GTT(Gaz Transport & Technigaz)사의 GT type 및 (구 Technigaz사의) Mark III type이 있고, 독립형탱크로는 Moss-Rosenberg사의 Spherical type(일반적으로 Moss type이라 함) 및 일본 IHI사의

SPB(Self-supporting Prismatic B) type(일반적으로 IHI-SPB type이라 함)이 있다.

앞에서 언급한 4종류의 화물격납설비에 대하여 간단히 설명하면 다음과 같다.

1. GT type 멤브레인탱크

멤브레인탱크는 열 또는 선체종급힘 등의 신축이 멤브레인에 과도한 응력을 발생하지 아니하도록 설계된 얇은 막 즉, 멤브레인에 LNG를 격납하도록 설계된 탱크를 말하며 화물에 직접 접촉하는 일차방벽과 일차방벽밖에 또 하나의 완벽한 멤브레인 이차방벽이 있다.

오스테나이트 Fe-Ni 합금강인 36% 니켈강은 흔히 상품명인 INVAR로 불리우며 저온에서는 강도 특성이 더 좋아지고(상온의 내력 및 인장강도: 320N/mm^2 & 510N/mm^2 , -196°C 에서의 내력 및 인장강도: 680N/mm^2 & 980N/mm^2) 아주 낮은 열팽창계수($2.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)를 가지고 있는 금속으로 GT사에 의하여 이 system의 재료로 선정되어 현재의 GT type 멤브레인탱크가 개발되었다. 팔각형의 단면을 갖는 멤브레인탱크는 외부 선각 및 inner hull에 의해 완전히 이중으로 둘러싸여 있고, 멤브레인은, 코너 및 연결부를 제외하고는, 양 모서리가 직각으로 꺾여 channel 모양의 0.7mm 두께의 긴 패널과 이들 사이에 끼워지는 0.5mm 두께의 tung으로 대부분 구성된다.

우물 정자 모양의 코너부가 횡격벽에 설치된 Anchoring bar에 부착되고 멤브레인은 양 횡격벽의 코너부 사이를 연속하므로 이 멤브레인은 실온과 화물온도 차이만큼의 열응력이 발생하게 된다.

$$\sigma_{th} = 2.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \times 183^\circ\text{C} \times 1.4 \times 10^5 \text{N/mm}^2 = 51 \text{N/mm}^2$$

여기에 hull girder bending stress가 더해지게 되며 이중에서 wave induced bending stress는 변동응력이다. GTT사는 멤브레인의 피

로강도를 고려하여 inner hull에서의 H.G.B. stress를 120N/mm^2 이하로 할 것을 요구하고 있으며, 코너부를 포함한 멤브레인은 이러한 응력 레벨 및 변동응력에 대하여 충분한 피로강도를 가지고 있음이 실험을 통하여 입증되어있다. 횡방향 수축은 패널과 tung의 결합구조가 흡수한다.

이차방벽은 일차방벽과 거의 동일한 구조로 되어있으며, 일차방벽과 이차방벽사이에는 두께 230mm의 primary insulation box가, 이차방벽과 inner hull 사이에는 300mm 두께의 secondary insulation box가 설치된다. S.I. box가 더 두꺼운 이유는 멤브레인탱크의 경우 일차방벽이 파괴되어도 이차방벽과 S.I. box만으로도 단열 등 화물격납에 문제가 없어야 하기 때문이다.

Insulation box는 plywood로 제작되며 내부 또한 plywood partitioning 으로 보강된다. 내부 빈공간은 화산폭발시 생성되는 유리같은 암석재를 가공시켜 가볍고 단열성이 탁월한 Perlite라는 물질로 채우고 모든 공간이 통기성이 있도록 제작된다. 탱크단면은 양 하단에 bilge hopper부가 있고, 탱크 깊이의 2/3 위치부터 양현에서 안쪽으로 45도 경사진 형상을 가지고 있으며 이곳으로부터 상방은 통상의 단열상자보다 강도가 3배로 보강된 단열상자가 설치되는 데 이는 sloshing에 대비하기 위함이다.

탱크 크기는 특별한 제한을 받지아니하며 가장 선수부의 No.1 탱크는 측벽이 중심선쪽으로 경사지게 설계된다. Insulation box는 여러 형태가 있고 knuckle부에 설치하는 단열재는 위치마다 여러 형태가 있어 상당히 많은 부품을 요하며 선각 공사가 높은 정도를 요구하는 것이 특징이다.

2. Mark III type 멤브레인탱크

Mark III type이라 불리우는 구 Technigaz(현재는 GT사와 합병하여 GTT사가 되었음)가 개발한 또하나의 멤브레인탱크는, 탱크단면 형상은 GT type과 같고, 종·횡방향으로 일정한 간격(340mm)으로 파형(Corrugation)을 만들어 팽



창 및 수축이 가능하게 한 1.2mm 두께의 304L stainless steel의 멤브레인으로 일차방벽이 되어 있다. 파형은 종방향의 것과 횡방향의 것이 교차하기 때문에 종방향의 것(Large corrugation)이 횡방향의 것(Small corrugation)보다 크며, 파형형성시 가능한 잔류응력이 남지 않도록 Technigaz사가 개발한 방법으로 특수하게 가공되고, 이렇게 만들어진 멤브레인은 열에 의한 수축 및 선체 변형을 자체적으로 흡수하게 된다.

멤브레인을 포함한 insulation의 총두께는 여러 가지가 있지만 선박에서는 대체로 가장 얇은 250mm가 사용되며, 이 경우 primary insulation은 80mm, secondary insulation은 170mm 이다. 일차방벽 바깥쪽의 primary insulation은 12mm 두께의 plywood 밑에 68mm 두께의 유리섬유로 강화된 polyurethane form(또는 PVC form)으로 되어있고, plywood 윗면에 일차방벽을 anchoring하기 위한 stainless steel strip이 부착된다. 이차방벽과 secondary insulation은 일체형의 panel로 미리 제작되는 데, 이차방벽은 수밀을 위한 aluminium foil에 보강하기 위한 유리섬유가 안팎으로 부착된 Triplex, 강화된 polyurethane form(또는 PVC form) 및 plywood로 구성된다. 보통 insulation panel이라 칭하며 GT type의 insulation box에 비해 두께는 얇고 면적은 3배 정도 크므로 설치 공수가 적으나 접착제를 많이 사용하므로 inner hull 내부에서 작업시 습기 등 환경관리가 중요하다.

No.1 탱크는 GT type처럼 경사지게 설계할 수도 있고, 횡단면적을 적게하여 평행하게 설계할 수도 있는데 이 경우 멤브레인탱크를 지지하는 inner hull 구조가 불연속이 되므로 선체설계시 주의하여야 한다. 평행한 형태로 하는 것에 비하여 경사진 형태로 하게되면 corrugated membrane의 제작 및 배치에 신경을 써야한다. 같은 운송능력을 가질 경우 총톤수가 가장 적다.

3. Moss type 독립형탱크

Moss type은 독립형탱크 type B의 대표적인 system이다. 독립형탱크 type B는, 탱크에 걸리는 하중 즉, 화물 및 증기압에 의한 내압, 선체의 변형으로부터 지지구조를 통하여 전달되는 외압, 선박의 운동에 기인하는 동하중, 저온의 LNG로 인한 열응력, 슬로싱에 의한 하중, 타워 및 방열재 등 기타의 부착품에 의한 하중 등을 조합하여 응력레벨을 계산하고 피로수명 및 균열진전 특성을 구하기 위한 모형시험 및 정밀해석을 통하여 안전성이 입증된 탱크형식을 말한다. 정밀 계산된 응력레벨 및 변동응력상태하에서 20년간 운항하여도 관통균열이 발생하지 아니한다는 ELD(Endurance Limit Design) 및 관통균열이 발생하였을 때 15일간의 가혹한 해상상태하의 항해에도 그 균열이 탱크벽의 파괴를 일으키지 아니한다는 LBF(Leak Before Failure) 개념에 입각한 설계로 완전 이차방벽 대신 부분 이차방벽이 허용된다.

탱크는 구형으로 되어 있으며 이는 용량에 비하여 가장 적은 표면적, 보강재가 없을 경우 가장 튼튼한 구조, sloshing에 대하여 효과적인 형상 등 장점이 많으나 탱크를 보호하는 선각이 커져서 같은 운송능력의 선박을 건조할 경우 총톤수가 큰 선박이 된다.

탱크의 재료는 aluminium alloy 5083계열의 후판을 사용하는 데, Al-5083-H321을 가스로에서 470℃ 정도로 가열한 후 구형으로 만든 틀에서 식히면 구각을 형성하면서 Al-5083-O로 바뀐다. 이러한 과정을 Hot forming이라 하는데, 일본의 경우 처음부터 Al-5083-O를 사용하여 pressing으로 구각을 형성하는 Cold forming process로 가공하기도 한다. 이렇게 구각으로 형성된 panel을 사다리꼴로 절단하여 용접으로 조립하면 구가 형성된다. 정부와 저부의 뚜껑 이외는 밴드형상으로 조립되는 데 밴드별로 계산결과에 의하여 결정된 다른 두께의 판이 사용된다. 높이의 중앙은 적도대(Equatorial ring)라 불리우

는 데 이것은 166mm 두께의 판을 가공하여 상부와 하부의 밴드 및 구형탱크를 지지하는 skirt와 연결되는 부위로 응력발생이 적도록 특수한 단면형상을 가지고 있다. Skirt는 상부로부터 Al-5083-H321, STJ, SUS 304, high tensile steel 순으로 구성된다. STJ(Structural Transition Joint)는 Al+Titanium+Nickel+SUS로 되어있는 금속결합체인데 Al, 합금계열과 stainless steel간을 결합시키기 위하여 사용되며 단열효과도 있다고 한다.

Insulation은 연속된 expanded polystyrene foam 띠를 접합시켜 설치하는 Spiral generation system으로 작업되며 단열재의 두께는 250mm 이다. 이 단열재는 적도대를 제외하고는 탱크와 분리되어 있어서 탱크의 열에 의한 신축에 자유로우며 외부는 0.25mm의 Al. foil로 둘러싸서 보호한다.

구형탱크는 선박의 상갑판 상부로 튀어 나오게 되는 데 이를 보호하기 위하여 탱크카버가 설치된다. 여러 가지 형태의 카버가 있는데 모두 patent를 가지고 있고 선박의 종강도에 일부 기여를 한다. 이 기여도는 유한요소해석을 통하여 계산되며 Moss type LNG carrier의 종강도검토시 중요한 사항이다. Moss type LNG carrier는 탱크 뿐만 아니라 선체변형이 skirt를 통하여 탱크에 미치는 영향, skirt 구조해석, skirt가 설치되는 foundation deck 등 거의 모든 설계가 구조해석에 의하여 이루어진다고 해도 과언이 아니며 따라서 선체 및 skirt는 파랑하중을 직접계산하여 전선구조를 FEM으로 해석하는 Total system analysis가 주로 사용된다.

4. IHI-SPB type 독립형탱크

이 탱크도 Moss type과 같은 독립형탱크 type B로 정밀 강도계산, ELD 및 LBF 개념에 기초한 해석과 model test를 조합하여 설계된 system으로 자기지지형 prismatic tank, tank support block 및 insulation panel로 구성된다. 일본의

IHI사가 개발하여 현재 87,000m³ 형의 선박이 2척 건조된 실적이 있다.

탱크의 재료는 Al-5083-O이고 입방체의 각 면은 중·횡으로 같은 재질의 aluminium 대형거더로 보강된 평판으로 제작된다. Centerline longitudinal bulkhead 와 transverse swash bulkhead에 의하여 4구획으로 나뉘어져 sloshing을 줄여주고 외벽에 설치된 대형거더는 수밀경계인 외벽에서의 액체유동을 미리 방해하는 역할도 한다.

방열재는 유리섬유로 강화된 polyurethane foam panel로 공장에서 미리 제작되어 탱크외부에 스티드를 통하여 부착된다. 멤브레인탱크와 달리 독립형탱크는 화물 적하시 수축을 하게 되는데 이 system에서는 insulation panel이 각각 별개로 독립이고 각 panel 사이에 Flexible cushion joint를 삽입하여 수축 팽창을 흡수한다. Insulation panel의 크기는 800mm x 800mm이고 두께는 450mm이다. 탱크벽과 insulation 사이는 5mm의 공간을 형성하여 Splash barrier로서의 역할을 하며 액누설이 있을 경우 탱크 support 부근에 있는 Drip tray에 유도하고 액은 여기서 증발한다.

탱크 support는 탱크의 수축팽창에 대하여 sliding할 수 있는 구조로 되어있다. 만일에 대비하여 탱크 support가 설치되는 이중저 상면은 additional insulation이 시공된다. Inner deck에는 선체운동에 대한 탱크의 지지 및 손상시의 부상방지를 위하여 Rolling chock 및 Floating chock가 설치된다.

참고 문헌

- [1] International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, 1993
- [2] 惠美洋彦, LNG船/LPG船 技術資料, 1991
- [3] Roger Ffooks, Natural Gas by Sea, 1993
- [4] A. G. Gavin, Design and Construction



Aspects of Containment Systems for the Carriage of Liquefied Gases in Ships, Lloyd's Register of Shipping, 1979

[5] 해사프레스 별책특집 'LNG 수송원년', 1994.6.9

[6] Papers of 10th International Conference on Liquefied Natural Gas, 1992

[7] Papers of 8th International Conference on Liquefied Natural Gas, 1986



양 홍 종

- 1954년 4월 4일생
- 1976년 서울대학교 조선공학과 졸업
- 1991년 동경대학교 선박해양공학과 박사
- 1981년~현재 (사)한국선급 근무(현재 LNG기술반 선체팀장)
- 관심분야: Sailing Yacht의 설계, 제작 및 항해, 구조물의 비선형 거동의 Simulation.



이 세 동

- 1954년 12월 31일생
- 1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업
- 1996년~현재 경희대학교 기계공학과 박사과정
- 1986년~현재 (사)한국선급 근무(현재 LNG기술반 기관팀장)
- 관심분야: LNG선의 Cargo Operation 및 열유체