기술논문

LNG 압력용기의 설계

김 정 위*

부산대학교 대학원 기계공학부 최적설계실*

A LNG Pressure Vessel Design

Jeong Wee Kim*

*Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

Abstract

In this paper the LNG vessel of the Moss type which is capable of lifting 15,261 tons is investigated in the view point of the pressure vessel preliminary design using the finite element method. The LNG pressure vessel is supported by a cylindrical skirt, 19.73cm radius, of the same thickness. The pressure vessel design is based on the equivalent stress levels due to the internal pressure. The finite element model of the spherical pressure vessel is configured using 4 noded quadrilateral shell element. The finite element analysis program NASTRAN and ANSYS 5.5 are implemented.

The dsign is compared with the three kinds of the boundary condition : first, where the equator of the pressure vessel is fixed , and where the top end is fixed, and, the bottom end is fixed, respectively.

A comparison is presented between the results obtained by the finite element model and by the prototype production model. Additionally just below position(case 1 & case 2) of equator ring was carried out by using ANSYS 5.5.

The results show that the vessel design based on the stress is acceptable at the preliminary design stage.

(Received February 3, 2000)

Key Words : LNG pressure vessel, FEM analysis, Equator-ring fixed, Top-fixed, Bottom-fixed

1. 서 론

LNG 선 건조시 가장 어려운 부분은 해상 수송을 위해 액화상태를 유지시켜주는 압력용기이다.

압력용기의 종류[1]는 형상, 지지방법, 사용목적에 따라 일본 IHI에서 개발한 SPB(Self supported prismatic tank type B)와 노르웨이에서 개발한 MRV(Moss rosenberg verft, 간략하게 Moss형 이라고 부른다.)등 여러 가지의 종류가 있다.

IHI에서 개발한 SPB는 방형 탱크 LNG선의 연장으로 보지만, 실제는 LPG선을 LNG선으로 연장시킨 것이다. 예를 들면 Type B LPG선을 기초로하여 화물온도 -45℃를 -162℃에 사용할수있도록 탱크 시스템을 설계한 것이다.

SPB는 LPG탱크에서 주로 많이 사용하던 형식인데 그후 발전시켜 -162℃에 적합하게 소재를 알루미늄으로 하여 탱크를 제작 사용하여 성공한 제품이다.

그러나 SPB는 탱크자체의 강도를 보강하기 위해서 탱크내부에 내구재(보강재)를 많이 사용하였다. 방형탱크는 사각 홀드에 수납하기 쉽고 탱크형상 치수를 자유롭게 선택할수 있으며 탱크 점검 보수를 위한 공간적 여유가 있다.

갑판상에 돌출물이 없으므로 평탄한 갑판이 가능하다. 때문에 풍압면적이 적고 선교에서 한눈에 볼 수 있으며, 갑판상의 배치 등 작업상의 장점이 있다.

그러나 내구재에 의해서 보강되어지는 강도, 피로수명의 해석, 내저판상에 지지되어지는 탱크와 선체

간에 상호간섭의 해석 및 경감 2차방벽의 설계가 요구된다.

한편 모스(Moss)는 구형 탱크라는 강도상의 특수성(막응력 등) 때문에 탱크 내부에 보강용 내구재를 거의 사용하지 않아도 강도가 유지되는 장점이 있다.

SPB 는 선체 상부 갑판 아래로 모두 수납되어 상부 갑판 위에 여유공간이 충분히 확보되지만 Moss는 압력용기가 상부 갑판위로 돌출되므로 인하여 상갑판 여유공간이 협소하다. Moss는 LNG 탑재시 스커트(Skirt) 상하에 완만한 온도 구배를 가지며 열응력은 작다. 또한 스커트에 의해서 선체변형은 반감된다.

여기서 상부를 고정한 이유는 상부 중앙부에는 돔(Dome) 용접구조물로서 설치되어 있으며 돔 주위를 통해서 각종 파이프라인이 설치되므로 인하여 응력이 집중 될 것으로 예상된다.

한편 하부 중앙부에는 탱크 내부 표면과 수직하게 대형잠수형 원심펌프 2조가 파이프타우워 하부 중앙부에 설치되므로 인하여 펌프작동시 진동에의한 반복응력이 용접부에 집중될 것이 예상된다. 그리고 적도대는 스커트에 의해서 탱크자체의 하중 및 LNG 화물을 지지해 주고 있으므로 적도대 부분에 응력이 집중될 것이 예상된다. 구형용기의 유한요소 모형은 IRIS 프로그램을 사용하였으며,구조해석은 NASTRAN 유한요소 프로그램[3]을 이용하여 해석하였다. 추가적으로 공기압 분포도, 수압분포도, 적도대 바로아래 고정(Case 1) 및 적도대 아래 고정(Case 2)은 ANSYS 5.5 프로그램을 사용하여 해석하였다. 본 논문에서는 적도대를 고정한 구형 압력용기에대한 구조해석을 통하여 두께를 설계하고자 하였다. 적도대를 고정한 경우에 대한 해석결과를 압력용기의 상하부를 각각 고정한 경우에 대해서도 비교하였다. 한편 LNG구형 알루미늄 탱크의 용접에 대해서도 실무적인 사항을 요약 정리 하였다.

따라서 본 연구에서는 설계대상을 LNG구형 압력용기로 한정하였으며 기 지지방법에 따른 응력분포를 구조해석 결과에 따라 분석하고, 그 결과를 실제제작되는 용기의 두께와 비교 검토하였으며 수치해석으로부터 얻은 결과를 바탕으로 결론을 도출하였다.

2. 구조 해석

2.1 구형 압력용기

LNG선체의 구형압력용기의 단면(Section)이 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 구형 압력용기는 적도대에 스커트라는 지지 기둥을 설치하여 탱크가 지지되어지는 시스템이다[4,5]. 압력용기는 알루미늄 A5083으로 제작되며[6], 스커트는 알루미늄, STJ(Skirt transition joint), SUS304N, 고장력강(EH32) 으로 연결시킨 원통형 용접 구조물이다.

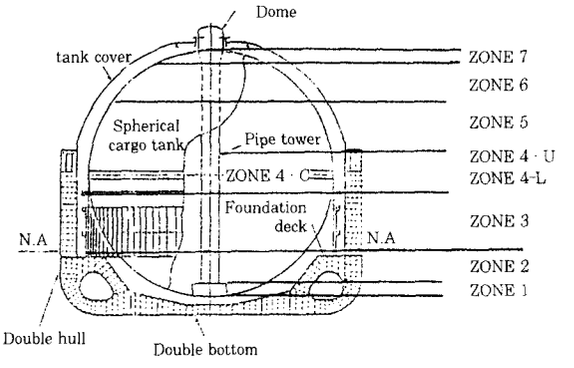

Fig. 1 LNG carrier hull structure

갑판 위로 올라오는 구형 탱크 외부에는 강판으로된 빈공간을 가진 압력용기 덮개가 있다.

이 빈 공간에는 불활성 가스로 충진시켜 대기를 차단하며, 태양열의 유입을 방지한다. 압력용기 덮개는 탄소강[7]으로 제작된다.

압력용기의 경도 구역별 두께는 7개의 영역으로 구분되어 있다. 다시 적도대는 상부 ,중앙부, 하부로 세분화하고 있다. 적도대는 응력이 집중하는 부위로서 두께는 다른 영역에 비해서 4배 이상 두껍게 설계되어 있다. Fig. 1의 구형 압력용기를 구성하는 재료인 압력용기본체와 압력용기를 지지해주는 스커트에 대한 기계적인 성질은 Table 1에 정리하였다.

2.2 유한요소 모델링

압력용기에 대한 유한요소 해석 모형은 Fig. 1의 LNG 선체 중에서 압력용기를 대상으로 하였다. 또한 구형용기의 적도부 지지를 위해서 압력용기 스커트를 포함해서 모델링 하였다. 압력용기는 기하학적 형상이 중앙단면에 대하여 대칭이므로 반쪽만을 모델링하였다. 압력용기의 반지름은 19.73m이다.

2.2.1 요소

구형 압력용기에 대한 유한요소 모델링은 평판요소로 구성된 쉘 요소를 사용하였다. 쉘은 얇은 평판을 곡면이 되도록 가공함으로서 얻어지는 구조요소이다.

쉘과 평판 사이에는 유사성이 있기 때문에 쉘에 관한 이론[2, 8]을 유도할 때 평판 이론의 많은 부분을 도입한

Table 1 Mechanical properties of the spherical pressure vessel

	Material	Young's modulus (Gpa)	Poisson's ratio	Shear modulus(Gpa)	Yield strength (MPa)
Pressure Vessel	A5083	77.140	0.34	29.08	142
Skirt	Steel (EH32)	209.0	0.33	80.40	214
	SUS304N	197	0.27	77.55	164

다. 즉, 쉘 구조물을 많은 수의 작은 평판 요소로서 근사적으로 표현하고자 하였다. 셀 구조를 평판 요소로 구성하여 구조해석을 할 때 다음과 같은 가정을 한다.

쉘을 여러 요소로 분할하였을 때 각 요소의 절점들로서 정의되는 평면은 얇은 쉘이라 가정한다. 쉘에 대해서는 여러 가지 요소가 있으나, 실린더형이나 구형을 갖는 쉘은 직사각형 또는 사변형 평판 요소로 나타내어 그 거동을 충분히 만족할만하게 나타낼 수 있다. 그래서 구형압력용기는 4절점 사각 판요소를 사용하여 유한요소 모델링하였으며, 절점당 6 자유도를 가진다.

사각 판요소를 사용하여 유한요소 모델링한 그림이 Fig. 2에 나타나 있다. Fig 2는 시점의 변화에 따른 유한요소 모형이다.

구형용기의 유한요소 모형은 AI Technology 사의 IRIS 프로그램을 사용하여 구성하였다. 그림에서 사각 판요소의 두께는 0.04m이며, 절점수는 811개, 요소수는 776개로 유한요소 모델링 되었다.

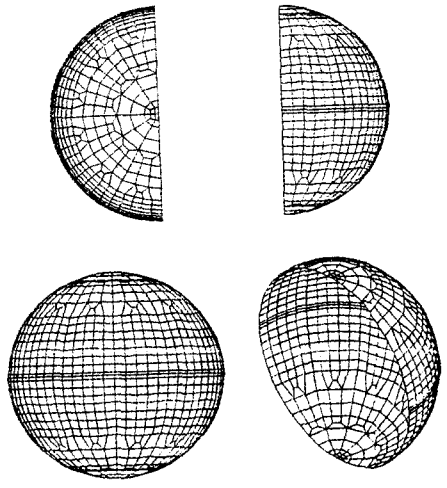

Fig. 2 The half model of the spherical tank

2.2.2 하중 및 경계조건

LNG 압력 용기는 설계 시 내압, 외압, 열하중, 선박 동요에 의한 동하중[9]등을 고려해야한다. 본 연구에서는 상기 기본 요인 중에서 압력용기 내부에 작용하는 내압을 기준으로 하였다. 적도대를 고정한 구형 압력용기에 작용하는 하중은 LNG선의 운용조건을 기준으로 하였다.

LNG선은 운항 중에 탱크내부에 LNG를 가득 채우도록 되어 있다. 그러나 LNG는 비중이 0.5 이기 때문에 절반은 수압으로, 나머지는 공기압으로 고려하였다.

또한 탱크 무게는 800,000kg 이상 되기 때문에 탱크의 자중에 의한 효과도 고려해야 한다. 그래서 구형압력용기에 작용하는 하중은 탱크 내부의 수압, 공기압, 탱크의 자중을 기준으로 하였다.

수압은 적도대까지 공업용수를 채워 수압을 등분포로 하였다. 적도대 상부에는 0.2MPa의 공기압을 주었다. 탱크자중은 알루미늄 A5083-O 재질의 밀도를 $2.755\times10^{3}kg/m^{3}$ 으로 하였다. Fig. 3은 탱크 내부에 작용하는 수압분포도이며, Fig. 4는 공기압 분포도를 나타낸다.

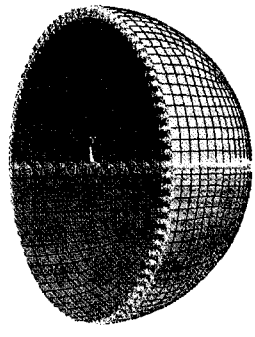

Fig. 3 Hydrawlic pressure distribution

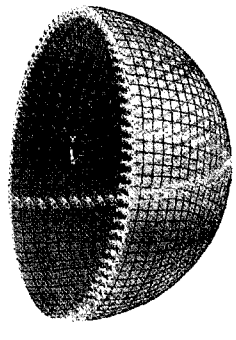

Fig. 4 Air Pressure distribution (0.2MPa)

적도대를 고정한 구형용기의 해석에 적용된 경계조건이 Fig. 5에 나타나 있다. 그림에서 구형의 단면에 대해서는 좌우 대칭조건을 적용하였다. 대칭조건은 두개의 회전변위와 하나의 병진변위를 고정하였다. 대칭조건중에서 동그라미로 표시된 것이 회전변위를 고정하였음을 의미하고, 실선으로 표시된 것은 병진변위를 고정한 것이다.

적도대는 스커트 구조가 지지되는 이유로 해서 세개의 병진변위를 전부 고정하여 해석하였다. Fig. 6에는 적도대를 고정한 경우 경계조건에대한 상세도를 도시하였다. 그림에서 세로로 구성된 판이 압력용기에대한 유한요소이며, 가로로 구성된 요소는 탱크를 고정하기 위하여 모델링한 적도대의 일부분에 대한 유한요소이다.

3. 해석 결과 및 설계검토

본 장에서는 구형 압력용기에 대한 해석결과에 대해서 언급하였다. 해석결과는 지지조건에 따른 구형 압력용기의 설계를 비교 검토하기 위하여 세가지 모델을 기준으로 제시하였다. 세가지 모델은 각각 다음과 같다.

첫째 적도대를 고정하였을경우에 대한 경도 구역별 응력분포

둘째 상부를 고정하였을 경우에 대한 경도 구역별 응력분포

셋째 하부를 고정하였을 경우에 대한 경도 구역별 응력분포

세가지 경우에 있어서 유한요소 해석은 경도 구역별로 쉘의 초기 두께를 0.04m로 동일하게 주고서 해석하였다. 해석결과는 범용 유한요소 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하였다.

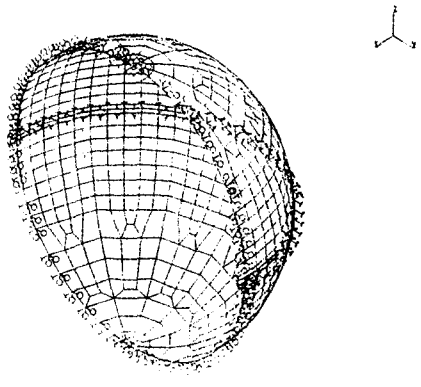

Fig. 5 The boundary condition fo the spherical tank

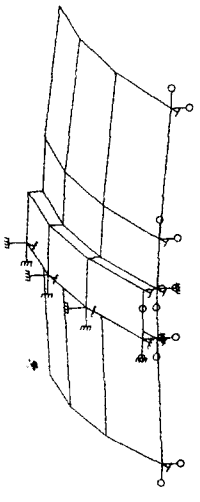

Fig. 6 The boundary condition for the equator ring fixed

3.1 적도대를 고정한 경우

본 절에서는 압력용기의 적도대를 고정한 경우에 대한 해석결과에 대해서 언급하였다. 적도대를 고정한 경우에 대한 압력용기의 변형된 형상이 Fig. 7에 나타나 있다.

Fig. 7에서 실선은 원래의 형상이며, 점선은 변형후의 해석결과이다. 수압과 공기압에의한 내압에 의해서 다소 곡률이 증가하였다. 압력용기의 하부면에서 최대변위 0.0538m가 나타났는데 이는 자중에 의한 영향으로 기인한 현상이다.

적도대를 고정한 경우 구형 탱크의 응력분포를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다.

Fig. 8은 적도대 고정시 압력용기 내부에서의 등가응력선도이고, Fig. 9는 압력용기 외부에서의 응력선도이다.

Fig. 8의 해석결과로부터 최대 응력은 적도대 부근에서 217.6MPa이었다. 적도대를 중심으로 상부에서는 50.0MPa의 응력 값이 나타났다.

적도대를 중심으로 하부에서는 70~110MPa로 상부

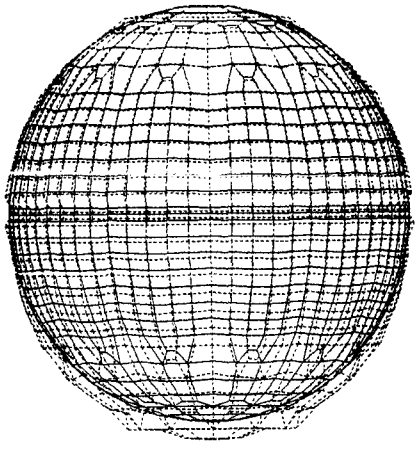

Fig. 7 The displacement contour for the equator ring fixed

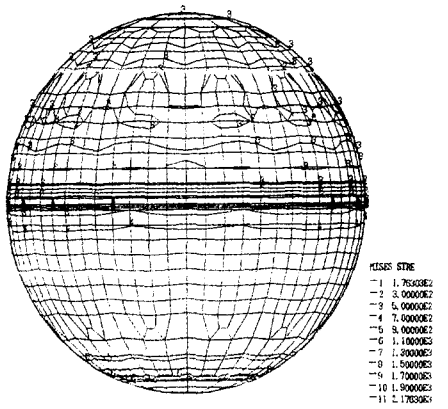

Fig. 8 The lower plate stress distribution for the equator ring fixed

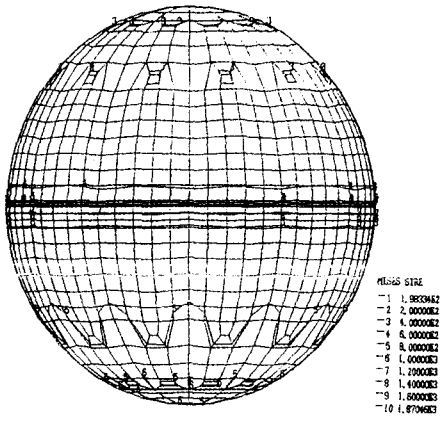

Fig. 9 The upper plate stress distribution for the equator ring fixed

보다는 다소 높은 응력값이 나타났다. 최소응력은 탱크 상부에서 17.63MPa의 응력값이 나타났다.

판 외부에서 응력분포는 하부 판에서의 경우와 경향은 유사하였다.

최대응력은 적도대에서 187.05MPa 이었으며, 최소응력은 19.83MPa이었다. 판 내부와 외부의 최대응력의 차이를 비교하면 내부가 30.6MPa로 응력이 높게 나타났다.

내부 판이나 외부 판에서의 응력상태 경향은 서로 유사하였다. 전반적으로 내부 판에서의 응력이 높게 분포되어 있었으며, 적도대에서의 최대값은 내부가 외부보다 16% 높았다. 적도대를 고정하고 유한요소 해석을 수행한 결과 최대 응력은 적도대 부근에서 발생하였으며, 적도대를 중심으로 하부에서의 응력값이 상부보다 높은 응력값이 나타났다. 최소 응력은 탱크 상부에서 나타났다.

3.2 상부를 고정한 경우

본 절에서는 구형 압력용기의 상부를 고정한 경우에 대해서 언급하였다.

압력용기의 상부 끝단을 지지한 경우에 대한 경계조건이 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10에서 상부 끝단에 해당하는 절점 16개를 상하 방향으로 구속하고, 강체운동을 방지하기 위하여 가운데 절점의 모든 변위를 고정하였다.

상부를 고정한 경우에 대한 압력용기의 변형된 형상이 Fig. 11에 나타나 있다. Fig. 11에서 실선은 원래의 형상이며, 점선은 변형 후의 해석 결과이다. 변형해석 결과로부터 최대 변위 0.597m가 탱크 하부에서 나타났다. 이 결과를 적도대를 고정한 경우와 비교하면 11배 정도 높았다.

구형 압력용기의 상부를 고정한 경우 응력분포를 Fig. 12와 Fig. 13에 도시하였다.

Fig. 12는 압력용기 내부에서의 등가 응력선도이다. Fig. 13은 압력용기 외부에서의 응력선도이다. Fig. 12에서는 상부 고정한 부근에 최대응력값 1194.7 MPa가 나타났다.

또한 상부영역에서 비교적 높은 응력상태를 보였다. 압력용기의 적도대와 하부에서는 100MPa의 응력이 나타났다. 최소 응력값은 압력용기 하부에서 59.58MPa이었다.

Fig. 13에서는 상부 고정한 부근에 최대 응력값

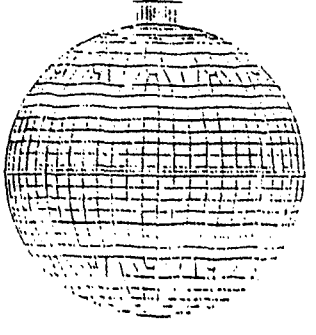

Fig. 10 The boundary condition of the top fixed

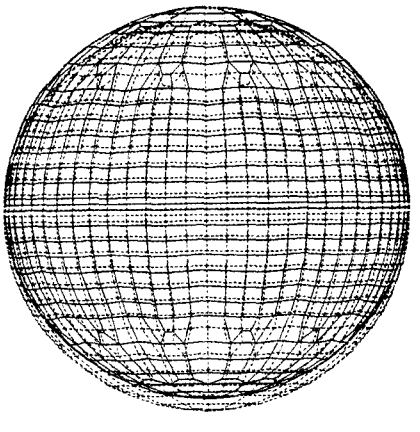

Fig. 11 The displacement contour for the top fixed

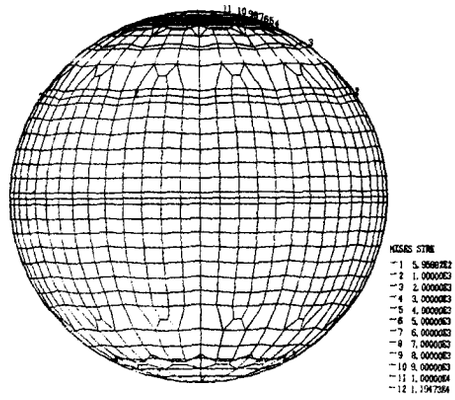

Fig. 12 The lower plate stress distribution for the top fixed

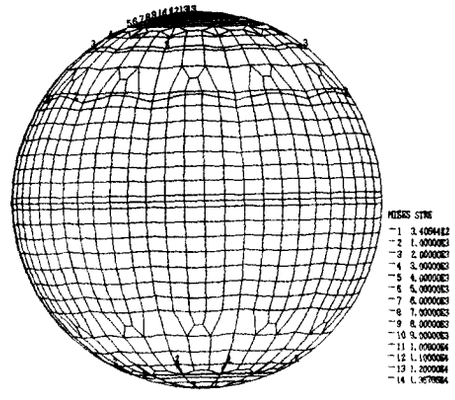

Fig. 13 The upper plate stress distribution for the top fixed

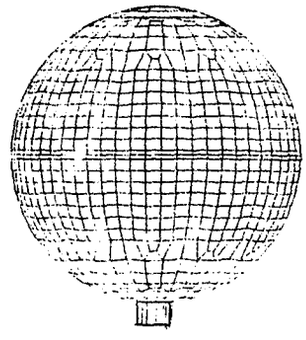

Fig. 14 The boundary condition of the bottom fixed

1367.7MPa이 나타났다. 전반적인 응력상태는 압력용기 내부에서와 유사한 경향을 보였다. 최소 응력값은 압력용기 하부에서 34.06MPa이었다. 상부를 고정한 경우에는 외부 응력의 최대값이 내부 응력값 보다 15% 높았다. 상부를 고정한 경우 최대 응력값은 적도대 고정시의 최대 응력값 보다 6배 이상 높게 나타났다.

압력용기의 상부를 고정하고 유한요소 해석을 수행

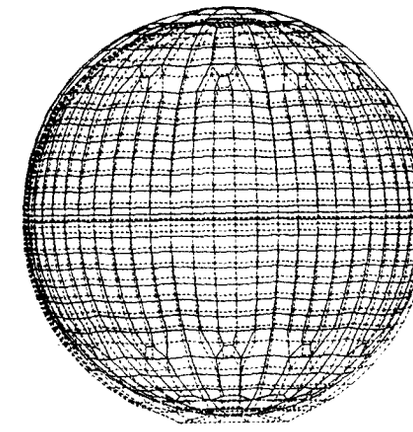

Fig. 15 The displacement contour for the bottom fixed

한 결과 최대 응력은 용기의 상부에서 발생하였으며, 최대 응력값은 적도대를 고정하였을 경우보다 6배이상 높았다. 전반적인 경향은 중앙에서는 낮은 응력상태에 있었으며, 다시 하부에서는 증가하는 경향이 나타났다. 상부를 고정한 경우에는 적도대를 고정한 경우와는 반대로 압력용기의 외부가 내부보다 14% 높은 응력상태에 있었다.

3.3 하부를 고정한 경우

본 절에서는 구형 압력용기의 하부를 고정한 경우에 대해서 언급하였다. 압력용기의 하부 끝단을 지지한 경우에 대한 경계조건이 Fig. 14에 나타나 있다.

Fig. 14에서 하부 끝단에 해당하는 절점 16개를 상하 방향으로 구속하고, 강체운동을 방지하기 위하여 가운데 절점의 모든 변위를 고정하였다. 압력용기의 하부를 고정한 경우에 대한 변형된 형상이 Fig. 15에 나타나 있다.

Fig. 15에서 실선은 원래의 형상이며, 점선은 변형후의 해석 결과이다. 변형 해석 결과로부터 최대변위 0.594m가 나타났다. 적도대를 고정한 경우와 비교해 보면 하부를 고정하였을 때가 11배 이상 높은 평형상태를 보였다. 구형 압력용기의 하부를 고정한 경우 응력분포를 Fig. 16과 Fig. 17에 도시하였다. Fig. 16은 압력용기 내부에서의 등가 응력선도이다. Fig. 17은 압력용기 외부에서의 응력선도이다. Fig. 16에서는 하부를 고정한 부근에 최대 응력값 1,052.8 MPa이 나타났다. 또한 하부 영역에서 비교적 높은 응력상태를 보였다. 압력용기의 적도대와 상부에서는 50.0MPa의 응력이 나타났다. 최소 응력값은 압력용기 상부에서 40.13MPa이었다.

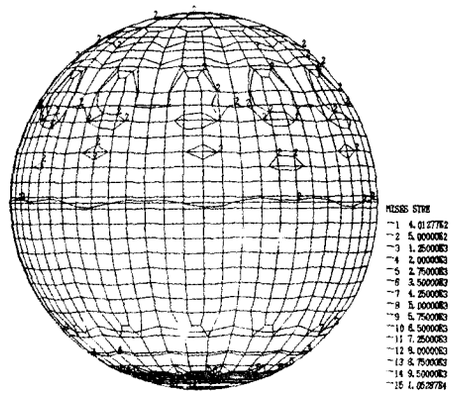

Fig. 16 The lower plate stress distribution for the bottom fixed

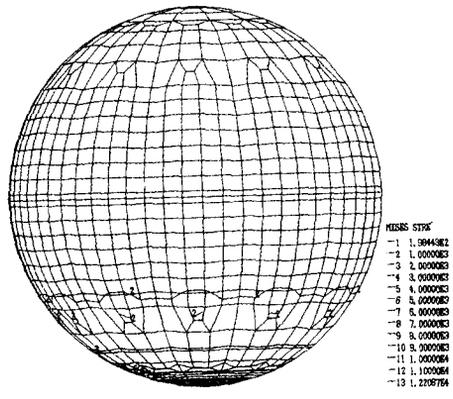

Fig. 17 The upper plate stress distribution for the bottom fixed

Fig. 17에서는 하부 고정한 부근에 최대 응력값 1,220.87MPa이 나타났다. 전반적인 응력상태는 압력용기 내부에서와 유사한 경향을 보였다.

최소 응력 값은 압력용기 상부에서 19.84MPa이었다.

하부를 고정한 경우에는 외부 응력의 최대 값이 내부 응력 값보다 16% 높았다. 하부를 고정한 경우와 적도대를 고정한 경우간에 최대 응력값을 비교하면 하부를 고정한 경우가 6배 이상 응력 값이 높았다.

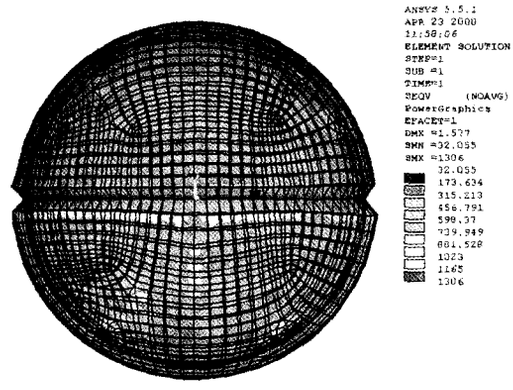

Fig. 18 Equator ring fixed

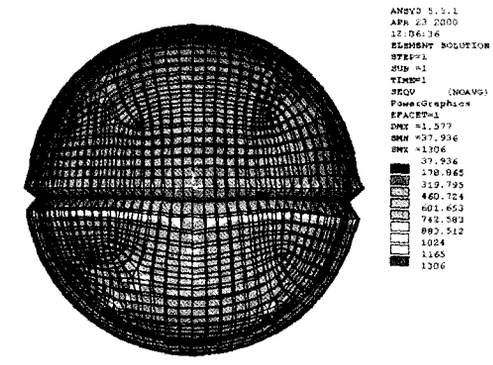

Fig. 19 Equator ring just below fixed(case 1)

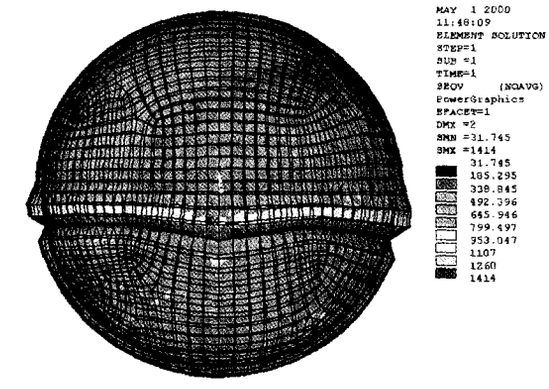

Fig. 20 Equator ring below fixed(case2)

3.4 설계 검토

본 절에서는 전 절의 해석결과를 바탕으로 하여 응력분포와 재료 두께와의 상관관계를 예측하였다. 경도 구역별 응력해석 결과를 Table 2에 정리하였다. Table 2 에서 모델 A는 적도대를 고정한 경우의 응력값이다. 모델 B와 모델 C는 각각 상부와 하부를 고정하였을 경우에 대한 응력값이다.

Table 2 Comparison of the stress distribution unit : MPa

Zone	Equatorring fixed model A	Top fixed model B	Bottom fixed model C
1	90-110	90-100	217.6-1220.9
2	70-90	40-90	100-180
3	70-90	40-90	90-110
4-L	110-120	40-70	40-70
4-C	200-217.6	40-70	40-70
4-U	110-120	40-70	40-70
5	40-70	40-100	40-70
6	17.6-40	110-180	17.6-40
7	17.6-40	200-1367.7	40-70

경도 구역별 영역은 압력용기의 하부를 영역 1로 해서 상부까지 영역을 7개로 구분하고 있다. 적도대는 다시 상, 중, 하의 3가지 영역으로 구분되어 있다. 적도대를 고정한 경우에 최대 응력값은 적도대의 중앙에서 217.60MPa이었다. 압력용기의 재료인 A5083의 항복강도는 142MPa이므로 (217.60/ 142.0)= 1.5의 안전율을 보였다. 적도대의 상부와 하부에서는 동일한 응력분포를 가졌다. 전체적인 경향은 압력용기의 하부가 상부에 비하여 125% 높은 응력분포가 나타났다.

상부를 고정한 경우에 최대 응력값은 압력용기 상부에서 1367.7MPa이었다. 최대 응력값과 항복강도를 비교할 때 안전율을 9.6이상 고려해야 안전할 것으로 사료된다.

응력분포는 상부가 하부에 비해서 2배 이상 높게 나타났다. 영역 1에서는 적도대를 고정한 경우와 유사한 응력값이 나타났다.

하부를 고정한 경우에 최대 응력값은 하부 고정 부위에서 1220.9MPa이었다. 최대 응력값과 항복강도를 비교할 때 안전율을 8.6이상 고려해야 안전할 것으로 사료된다.

응력분포는 대체로 하부가 상부에 비하여 높게 나타났으며, 경향은 상부를 고정한 경우와는 대조적이었다. 적도대를 고정한 경우에 대한 응력해석 결과를 바탕으로 실제 제작되고 있는 모델과 두께 비를 비교하였는데, 그 결과를 Table 2에 제시하였다.

Table 2에서 실제 모델에 대한 두께 비는 현재 제작되고 있는 구형 압력용기에서 영역 1의 두께를 기준으로 나눈값이다.

Model A는 적도대를 고정하였을 경우에 대한 유한요소 모델로서 두께 비는 영역 1의 응력값을 기준으로 나눈 값이다. Table 3에서 설계 제작 Model과 유한요소 모델의 두께 비는 경도 구역별 영역에 걸쳐서 경향은 유사하였다. 실제 제작 모델에는 응력이 집중되는 적도대 중앙과 압력용기 하부에는 안전율을 응력을 기준으로 한 것보다는 높게 책정되어 있었다. 실제 모델에서 안전율이 높은 이유는 탱크내의 유체의 유동, 설계시 온도에 의한 효과, 선박의 요동에 의한 동하중, 외압 등을 고려하였기 때문이다.

Table 3 The thickness ratio comparison between production model and Model A

Zone	production model	Model A
1	1.00	1.00
2	0.93	0.82
3	1.04	0.82
4-L	1.45	1.09
4-C	4.15	1.98
4-U	1.18	1.09
5	1.01	0.64
6	0.71	0.36
7	0.75	0.36

그러므로 구형 압력용기의 기본설계 시 응력값을 기준으로 개념설계가 가능함을 확인할 수 있다. 그런 다음 여러 가지 설계 조건을 고려하여 상세 설계를 수행하여야 할 것으로 평가된다.

4. LNG 구형 알루미늄탱크 용접 및 절단

LNG 압력용기 및 압력용기에 취부되는 각종 재료에 대한 용접방법을 아래와 같이 요약 정리하였다.

고전류 MIG용접은 압력용기 블록 조립을 위한 단위블록별 용접 및 알루미늄 후판 용접에 주로 많이 사용되며 일반 MIG용접보다 와이어경이 큰 것을 쓰며 아래보기 자세에서만 사용된다. 개선은 밀링장비로 수행하며 두께에 따라 형상 및 치수가 다르며 일반적으로 이중 Y 그루브 형태가 사용된다.

Moss type LNG 건조 공정에서 알루미늄 구형 압력용기 조립용접은 자동 MIG용접법으로 시공된다. 자동 MIG용접법에서는 표면용접 후 이면용접을 시공하기에 앞서 불완전 융합부위를 제거하는 기계가공 작업을 수행하여야 하는데 이때 사용하는 장비가 이동식 밀링 머신 장비이다. 알루미늄 구형 압력용기 용접에서 표면용접 시 이면에는 백킹재를 사용하지 않는다. 그 이유는 루트 갭이 거의 없는 Y개선 형상을 가지고 있으며 개재물 유입등 용접불량을 방지하기 위한 것으로 생각된다. 용접기는 용입을 균일하게 하기위해서 수하특성 방식을 채택하며 피더는 정속도 방식으로 수냉식 토치를 가지고 있으며 레일위를 주행한다.

이음부 형상설계는 알루미늄 용접에서 매우 중요한 것으로서 구조물의 강도등 특성이 허용되는 범위내에서 이음부의 개선각도를 조정할 필요가 있다고 본다.

알루미늄을 플라스마 절단 후 그 상태로는 용접을 할 수 없다. 그 이유는 절단면이 거칠고, 절단표면의 부스러기 등 이물질이 용접시 슬래그로 개재될 수 있으며 또한 균열로서 성장할 수 있기 때문에 반드시 용접 그루브 형상을 기계 가공하여 버트 용접 접합면을 매끈하게 하여야 한다.

MIG용접에서 가스분위기는 He(70%)+Ar(30%)의 혼합 가스를 사용하는데 모재 두께 및 전류 크기에 따라 혼합 비율이 조정되어진다.

여기서 중요한 것은 He가스는 용착 깊이와 관계가 있고 Ar가스는 용접비드의 형상과 관계가 있기 때문에 가스의 혼합비는 필요에 따라 가변화 될 수 있다.

Ar가스는 스패터를 줄이고 용접비드 외관을 아름답게 한다. 예를 들면 적도대와 이웃하는 후판용접인 경우 소재를 지그에 고정시키고 아래보기 자세로 고전류(800-850A)로 용접을 하는데 혼합가스 비율은 내부 노즐에서 He(50%)+Ar(50%)공급되고 외부 노즐에서 외부공기와의 차폐 목적으로 100% Ar가스만을 공급한다.

이와 같이 추가로 100 % Ar가스를 공급하는 이유는 용융풀의 실딩(Shielding)부족에 의한 용접불량 방지를 위하여 2중 보호 토치를 사용한다.

특히 고전류에 의한 열로 인하여 주위의 수소 가스의 유입을 계속적으로 차단하기 위한 것이다.

용접 시 전류는 직류 역극성을 사용하며 로울에 감긴 알루미늄 와이어를 사용한다. 스테인리스 파이프 박판용접에서 Ar가스 퍼지(purge) 이유는 산화를 방지하고 용접비드 외관을 아름답게 하기 위한 것이다.

He가스는 용입과 깊은 관계가 있다. 헤륨가스는 열전도성이 좋기 때문에 에너지가 아크내에 균일하게 분포되어 타원형의 비드 형상을 가지게된다.

TIG용접은 알미늄 구형 탱크 자체 단위 블록 용접에는 TIG용접을 사용하지 않는다. 그 이유는 모재 두께에 비해 전류용량이 적고 작업속도가 느리기 때문이다. 따라서 각종 알루미늄 파이프류 및 소규모 부재류 기타 정교한 부위, 루트 패스 용접등에 이용된다.

스테인리스강과 스테인리스강 용접(박판제외), 스테인리스강과 탄소강 용접(박판제외), 박판이며 직경이 작은 스테인리스강 파이프를 연결하기 위한 버트 용접인 경우 파이프 양 끝단을 밀폐시키고 한쪽 끝단부에서 Ar가스를 파이프안으로 주입시켜 가면서 TIG용접을 하게된다. 퍼지이유는 파이프내 용착금속 산화를 방지하기 위한 것이다. 그러나 후판이며 직경이 큰 스테인리스 파이프를 버트 용접 경우 X 개선 후 모재 종류에 따라 E308, E316 용가재를 사용 파이프 내외부 모두를 SAW 용접을 하게된다. 단, AC 용접기인 경우 Arc 발생에 의한 용가재의 용융을 쉽게하기 위해서 Steel wool을 사용한다. DC 용접기인 경우는 Arc 열이 높아 Steel wool 사용을 생략한다. 용접 이음매를 준비하기 위해서 알루미늄 판을 절단시에는 수소+알곤 또는 질소를 플라즈마 가스로 사용하여 절단하게 되는데 알루미늄의 특성상 열경화는 심하지 않다. 그러나 절단면은 다소 거칠어 표면에 1mm 내외의 미세한 균열이 발생하므로 이를 제거하기 위해서는 2mm 정도의 기계 가공이 필요하다.

알루미늄 탱크를 지지해 주는 스커트는 세가지의 이종금속으로 구성된다. 적도대에 직접 용접으로 부착되어 있는 상단부에 위치한 알루미늄(A5083-O) 스커트 및 이종금속 연결부위인 STJ(Al+Ti+Ni+SUS 304N), 중간부위인 SUS304N 스커트 그리고 하단부위인 고장력강(EH32) 스커트로 구성된다. 여기서 STJ는 Skirt Transition Joint 의 약어이며 폭발용접에 의해 제작되어진다.

상기 알루미늄 A5083-O의 O는 어닐링열처리(최대 Soaking Temp. 485℃)를 한것을 의미한다. 적도재를 제외한 알루미늄판 원자재 입고시에는 A5083-F이다. 여기서 F는 제조한 상태 그대로 임을 의미한다. 적도재는 A5083-O로 입고되어 성형시 Cold metal forming되어지며 기타 구형 탱크용 알루미늄판 자재는 A5083-F가 Hot metal forming으로 성형되어 A5083-O로 어닐링 되어진다.

여기서 SUS 304N과 고장력강(EH32)과의 용접은 이종 금속과의 용접인데 용가재는 용제가 함유된 E309 MOL을 사용하고 FCAW+CO_2 용접을 한다. 알루미늄과 알루미늄용접인 A5083-O에 사용되는 용가재는 5183 또는 5356을 사용한다.

용접재를 5083을 사용하지 않는 이유는 용착금속의 강도를 고려한 것이다.

비철금속인 알루미늄과 알루미늄과의 후판을 용접하는 경우는 MIG용접에서 분사이행 용접을 행하게 된다. 압력용기 내의 박판 알루미늄 파이프 용접을 하는 경우 파이프내에 Ar 주입을 하면서 TIG용접을 한다.

여기서 스테인리스강과 일반탄소강과의 이종금속 용접 경우 박판일 경우 반드시 Ar분위기에서 SUS 309MOL 용가와이어를 가지고 TIG용접을 행하여야 하며, 후판일 경우는 SUS309(MOL) 용가와이어를 가지고 FCAW+CO_2 용접을 행한다.

적도대 조립을 위해서는 조립과 용접이 가장 고도의 정확성을 갖고 제작될 수 있도록 정확해야 하며 12개의 적도대 Segment는 기계 가공되어 규정된 곡률에 따라 냉간성형 되어진다. 조립은 특수제작된 Tilting 지그 위에서 고전류 MIG용접기로 아래보기 자세로 용접되어 진다. 적도대 상하부에 용접된 알루미늄 판을 용접하기 위해서는 지그위에 고정시킨 후 자동 MIG 용접기를 사용하여 수직용접(200-300A 전류사용)을 수행한다.

2개의 판 소조는 용접전 취부 상태를 검사하고 최종 용접후는 RT 30%, UT 100%, PT 100 % 및 육안검사를 실시한다. 단, 적도대와 적도대 용접부위는

RT100%, UT100 %, PT 100% 및 육안검사를 실시한다.

5. 결 론

LNG선체는 외형상 선체와 구형 압력용기로 구성되어있다. 구형 압력용기는 크기, 용량, 지지방법에 따라 여러 가지가 존재한다. 압력용기의 설계는 특허와 연관되어 있기 때문에 독자적인 기술의 확보가 필요하다. 본 논문에서는 구조해석을 통하여 경도구역별 두께를 기본설계 하고자 하였다. 구형압력 용기에 발생하는 응력 및 변형 상태를 고려하여 균일한 응력을 갖도록 두께를 가변화 하였다.

구조해석은 3차원 쉘 요소를 사용하여 경도별 두께를 동일하게 주고서 해석하였다. 적용한 경계조건은 적도대를 고정하였을 때, 압력용기의 상하부를 각기 고정한 세 가지경우에 대해서 수행되었다. 구형 압력용기를 유한요소법으로 수치해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 적도대를 고정한 경우에 최대 응력값은 적도대의 중앙에서 217.6MPa이었으며 응력을 기준으로 할 때 1.5의 안전율을 보였다.

2) 압력용기 상부를 고정한 경우에 최대 응력값은 용기상부에서 1,367.7MPa이었다. 최대 응력값과 항복강도를 비교할 때 안전율을 9.6이상 고려해야 안전할 것으로 평가된다.

3) 하부를 고정한 경우에 최대 응력값은 하부 고정부위에서 1,220.9MPa이었다. 최대 응력값과 항복강도를 비교할 때 안전율을 8.6 이상 고려해야 안전할 것으로 평가된다.

구형압력 용기를 여러 가지 경계조건에 대해서 유한요소 해석을 수행한 결과 적도대를 고정한 경우가 변형도 적었으며 응력값도 고르게 분포되어 있었다. 적도대를 고정한 경우에 대한 응력해석 결과를 바탕으로 실제 제작되고있는 모델과 두께 비를 비교하였는데 그 경향은 유사하였다. 그러므로 내압을 기준으로 한 압력용기를 설계할 때 적도대를 고정한 형태가 바람직하다고 평가할 수 있다. 결론적으로 압력용기를 기본설계할 때 응력을 기준으로 설계할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4) Optimal한 위치를 찾기 위해서 ANSYS 5.5 프로그램을 이용하여 적도대 및 적도대 바로 아래(Case 1), 적도대에서 약간 떨어지 곳(Case 2)을 고정(유한요소 해석을 간단히 하기 위해서 스커트 대신에 경계조건으로서 회전 변위와 병진변위를 모두 고정시키고 해석하였다)하여 응력분포를 비교분석한 결과 유첨 Fig. 18-20과 같은 해석결과가 얻어졌는데 Case 1 경우 적도대 고정과 최대응력을 비교하면 130.6MPa로 거의 같고, 최소 응력은 적도대 고정시 3.20MPa이고, 적도대 바로 아래 고정시(Case 1) 3.79MPa로서 약 0.5 MPa의 차이를 보여주었다. 또한 적도대에서 보다 아래쪽으로(Case 2) 내려가 고정하였을 경우 최대응력을 비롯한 전반적인 응력분포가 적도대 고정보다 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 따라서 적도대 고정이 가장 최적 위치라는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이철원, LNG 수송원년, 해사프레스(1994), PP 14-17
2. 임상전, 곽병만, 이주성, 유한요소법입문, 동명사(1994), PP306-317
3. G. J. Moore, MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization, Macneal Schwendler Corporation,(1994)
4. IGC Code, International Maritime Organization(1993), pp 35-37
5. 이호섭 외 10인, LNG 선의 구조해석 기술개발 (1), 한국 기계연구소(1989), pp7-10
6. J. E. Hatch, Aluminum Property and physical Metallurgy, American Society for Metals(1988), pp50-51
7. 박용, 장곡, 천장의, Stainless 강편람, 세화출판사(1992), pp 725-726
8. W. Flügge, Stress in Shells, Springer Verlag, New York (1973)
9. 김 영식 외 2 인 MOSS 방식 LNG 탱크의 파괴안정성 평가 한국선급(1992)
10. H. B. Cary, Modern Welding Technology, Prentice Hall(1979), pp 146-431
11. C.C.Osgood, Fatigue Design, Second Edition, Pergamon press(1982)
12. 系山直之 , LNG 船 , 成山堂書店
13. 용접·접합 편람 , 대한용접학회(1998), pp548-555
14. Lloyd's Register, Rules for ships for liquefied gases, (1995), Appendix IV.
15. Arthur P.Boresi, Advanced Mechanics of Materials (Fifth Edition), pp97