

1. 서론

과거 145K CBM으로 대표되던 LNG 선박의 크기는 그 크기가 점점 대형화 되고 있으며, 화물탱크의 개수가 5개로 확대되고 쌍축의 추진축을 가지는 Q-max, Q-flex 급 대형 LNG 선박이 건조되고 있는 추세이다. 이러한 LNG 선박의 대형화에 따라 독립형 화물탱크를 가진 모스 형식의 선박은 공간의 비 효율성으로 인해 대부분이 멤브레인 형식의 선박건조로 대체되고 있다. 최근에는 멤브레인 형식으로 4개의 화물창을 가진 170K 급 LNG 선박이 주를 이루고 있으며 이들 선박의 구조안전성 평가를 위하여 유한요소법을 이용한 화물창 구조강도 평가가 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 이와 같은 구조강도 평가는 모델링, 하중생성, 검증 및 평가하는데 상당한 시간이 소요되고, 각 선급별로 구조해석 지침이 상이하여 초기 선박설계에 많은 애로점이 있는 것이 사실이다. 특히 가스선박에 적용하는 IGC Code에 따른 하중생성은 매우 복잡하고 최전방 화물탱크를 포함하도록 요구하고 있어 상선에 비하여 구조해석 절차가 복잡한 편이다. 따라서 합리적인 구조해석 절차가 수립되어야 하며 복잡한 하중구현의 자동화로 구조강도평가 수행에 정밀도와 신뢰도를 높여야 한다. 본 논문에서는 멤브레인 LNG 선박의 구조강도 평가를 위한 해석절차를 제시하고, 설계자의 편의를 위하여 개발된 자동하중생성 프로그램을 함께 소개하고자 한다.

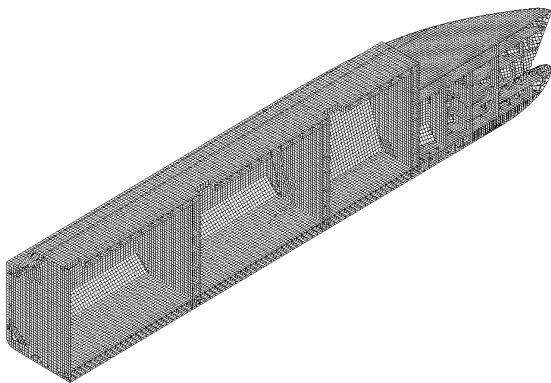


Fig. 1 Cargo tank model of port side of full breadth model

2. 구조해석

2.1 유한요소모델

유한요소 모델의 범위는 선박의 동적운동에 의한 가속도가 가장 큰 최전방 화물탱크를 포함하여 No.3 화물탱크 후방 횡격벽까지 포함한다.

2.2 적용하중

선체구조해석을 위해 고려된 하중은 다음과 같다.

Table 1 Load Component		
Load	Static	Dynamic
Hull Girder	Still water bending moment (M_s)	Vertical wave bending moment (M_w , 10^{-8} probability level)
Sea Pressure(P_{ex})	Hydrostatic pressure	Wave induced load (crest, trough)
LNG Tank Pressure(P_{in})	Static cargo pressure (Filling Height)	a_x, a_y, a_z according to ship motion(IGC Code, 10^{-8} probability level)
Ballast Pressure	Static ballast pressure (Filling Height)	Additional water head considering ship motion
Other	Tank vapour pressure(P_0)	-

1) Vertical wave bending moment (M_w) :

$$M_w = + 190MCL^2BC_b \times 10^{-3} (kN \cdot m) \quad (1)$$

$$M_w = - 110MCL^2B(C_b + 0.7) \times 10^{-3} (kN \cdot m) \quad (2)$$

(1)과 (2)의 식은 IACS URS110에 따른 수식이며, 각 선급에서 공통적으로 규칙에 채택하여 적용하고 있다.

2) Wave induced load (crest, trough)

파랑변동하중은 (3), (4) 및 (5)의 식에 따라 산출될 수 있으며 한국선급 3편 부록3-2에 따른다.

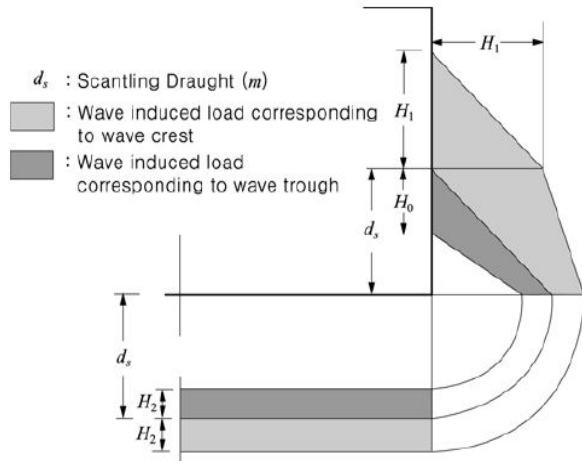


Fig. 2 Wave Induced Load

$$H_0 = 0.5 \times H_w \quad (3)$$

$$H_1 = 0.9 \times H_w \quad (4)$$

$$H_2 = 0.25 \times H_w \quad (5)$$

3) Acceleration

선체 운동에 따른 a_x , a_y 및 a_z 는 IGC Code에 따라 다음과 같이 구할 수 있으며 수치는 중력가속도(9.81m/s²)에 대한 비율로서 무차원 가속도이다.

$$a_x = \pm a_0 \sqrt{0.06 + A^2 - 0.25A} \quad (6)$$

$$a_y = \pm a_0 \sqrt{0.6 + 2.5 \left(\frac{x}{L_0} + 0.05 \right)^2 + K \left(1 + 0.6K \frac{z}{B} \right)^2} \quad (7)$$

$$a_z = \pm a_0 \sqrt{1 + \left(5.3 - \frac{45}{L_0} \right)^2 \left(\frac{x}{L_0} + 0.05 \right)^2 \left(\frac{0.6}{C_b} \right)^{1.5}} \quad (8)$$

상기식은 선박의 길이 50m를 넘는 선박에 대하여 크기, 화물창 종류 등과 관련없이 일괄적으로 적용되는 식이어서 다소 보수적인 값을 나타낸다. 대형조선소는 이러한 보수적 값을 지양하기 위하여 선체운동에 의한 가속도를 운동해석을 통하여 직접 구하고 있으나, 선급별 그 채택여부가 조금씩 다르다. 한국선급은 규칙의 일괄적 적용과 통일을 기하기 위하여 상기식을 기본으로 채택하였다. 탱크 증기압력(P0)는 통상 25kN/m² 을 기본으로 하며, 증기압력이 이보다 높을시 그 압력을 기준으로 하여야 한다.

4) Cargo Pressure 및 Ballast Pressure

LNG탱크의 동적하중과 정적하중, 탱크증기압력을 고려한 최종적인 탱크의 압력은 다음과 같이 산정하였다.

Dynamic Vertical & Longitudinal Pressure :

$$P = \rho_c g h_z (0.5a_z + 1) + 0.5\rho_c g h_x a_x + P_0 \quad (9)$$

Dynamic Transverse Pressure:

$$P = \rho_c g h_z + 0.5\rho_c g h_y a_y + P_0 \quad (10)$$

여기서, h_x 는 탱크의 선미끝부터 해당지점까지의 선수방향으로의 거리를, h_y 는 좌현 또는 우현으로부터 해당지점까지의 횡방향으로의 거리를, h_z 는 탱크의 가장높은 지점으로부터 해당지점까지의 거리를 의미한다. 동적가속도의 계수 0.5는 현재 인도된 선박과 발현확률을 고려하여 산정하였다. 발라스트 압력(h_2)은 탱크의 길이가 10m를 넘거나 탱크의 너비가 10m를 넘는 것에 대하여 다음의 부가의 수압을 가하며 안전율은 탱크하부로부터 넘침관(overpipe) 상단 1/2의 되는 곳까지의 수직거리 h_1 의 85%수준으로 정하여진 규칙에 따른다. 최종 발라스트 압력은 h_1 과 h_2 의 최대값에 해수비중량 1.025를 곱한 값으로 한다.

Additional water head:

$$\Delta h = \frac{16}{L} (l_t - 10) + 0.25 (b_t - 10) \quad (11)$$

l_t = 탱크의 길이(m)

b_t = 탱크의 너비(m)

2.3 하중 세트

2.2항에서 제시한 각 하중성분을 조합하여 나타낸 것이 설계하중세트이다. 이 세트는 크게 정적하중세트(Static load cases), 동적하중세트(dynamic load cases)로 나눌 수 있다. 정적하중세트는 다시 선박의 직립(upright) 상태와 경사(heel) 상태가 고려되어야 하며, 동적하중세트는 No.1 화물탱크의 수직가속도가 포함된 직립상태와 각 화물탱크의 경사진 상태의 가속도가 포함된 경사상태가 고려되어야 한다. 경사 상태는 IGC Code에 따라 30도를 기본으로 한다. 또한 특수한 경우 즉, 충돌시의 하중(0.5g)을 고려한 하중조건도 고려대상이다. 최종적인 설계하중세트는 다음과 같다.

Table 2 Design Load Sets

NO.	Load Case	Hull Girder Moment	P_{ex}	P_{in}
Vertical dynamic load case				
1	Full Load	S+D(*)	S(ds)+D(Crest)	S+D(Vertical)
2	Full Load	S+D(*)	S(ds)+D(Trough)	S+D(Vertical)
3	Alternate (No.2 empty)	S+D(*)	S(d_act)+D(Crest)	S+D(Vertical)
4	Alternate (No.1,3 empty)	S+D(*)	S(d_act)+D(Crest)	S+D(Vertical)
Transverse dynamic load case(Upright)				
5	No.1 Tank Load	S	S(act)+D(Trough)	S+D(Transverse)
6	No.2 Tank Load	S	S(act)+D(Trough)	S+D(Transverse)
Static heel load case				
7	30° Heel No.1 Tank Load	S	S(d_act)	S
8	30° Heel No.2 Tank Load	S	S(d_act)	S
Collision case				
9	No.2 empty	S	S(ds)	S+D(0.5g)
10	No.1,3 empty	S	S(ds)	S+D(0.5g)

* : Hogging, Sagging moment to be determined as per local model deformation, Buckling strength of double bottom structure to be specially considered for hogging moment
 S : Static Load D : Dynamic Load ds: scantling draft d_act: draft on Trim and stability booklet

Table2의 설계하중세트는 여러가지 하중조건을 검증 거쳐 최종적으로 결정되었다. 격차적재 조건의 경우 초기 설계 흘수(scantling draft)가 고려된 정적 하중상태를 구현하여 적용하였으나 해석결과 발생응력의 수준이 과도하고 비현실적인 구조 수정이 요구되기 때문에, vertical dynamic case의 하중세트도 검증하는 것이 합리적이므로 최종적으로 Table2와 같이 결정하였다. 횡방향 동하중 세트도 초기 30도 경사진 상태에서의 횡방향 가속도를 고려하여 응력평가를 수행하였으나, 이 역시 인도된 선박의 설계와 비교하였을 경우 응력이 과도한 수준이고 비현실적인 구조 수정이 요구되어 선박의 직립상태와 경사상태로 세트를 나누어 구성하였다.

3. 자동 하중 프로그램

2.3항의 하중세트에 따른 하중과 경계조건을 기존 상용프로그램의 입력방식으로 할 경우 시간이 오래걸리고 인적오류(human error)로 인해 정확성도 매우 떨어지게 된다. 또한 배의 크기나 탱크의 크기가 다양하고 선체중급힘 모멘트를 고려할 경우 그 어려움을 커진다. 이러한 어려움을 극복하고 누구나 쉽게 하중 및 경계조건 등을 접근할 수 있도록 자동 하중 프로그램을 개발하게 되었다.

3.1 자동 하중

3.1.1 선체수직급힘모멘트

LNG 선체에 걸리는 전체 선체수직급힘모멘트(target moment)는 정수중 중급힘모멘트(M_s)와 파랑중 중급힘 모멘트(M_w)의 합으로 나타낼 수 있다. 해석시 정수중 중급힘 모멘트는 설계중급힘 모멘트의 값 또는 허용중급힘모멘트 이어야 하며 파랑중 중급힘 모멘트는 식 (1) 및 (2)로 나타낼 수 있다. 그러나 해석시 탱크 압력 및 외부파랑압력 등에 따른 모멘트(M_{local})로는 선체 전체의 수직급힘모멘트에 도달할 수 없다. 따라서 아래의 식에 따른 모멘트를 추가적으로 모델에 가하는 조정절차를 거쳐야 한다.

$$M_v = M_s + M_w - M_{local} \quad (12)$$

$$(F_x)_i = \frac{M_v}{I_y} \frac{A_i}{n_i} z_i \quad (13)$$

$(F_x)_i$: i 번째 요소의 절점에 적용되는 축력(kN)

- M_v : 모델 frame의 횡단면에 적용되는 수직 굽힘모멘트 조정 값(kN-m)
- I_y : 고려하는 횡단면의 수직관성모멘트(m⁴)
- A_i : i 번째 요소의 횡단면적(m²)
- n_i : i 번째 요소의 절점의 수(shell 요소는 n=2)
- z_i : i 번째 요소의 중립축에서 횡단면적의 중심까지의 거리(m)

식 (13)을 모델에 가하고 구한 해석모델의 전체굽힘모멘트와 계산수식에 따른 전체굽힘모멘트를 비교하면 거의 일치함을 알 수 있으며, 굽힘모멘트가 정확하게 가해졌음을 알 수 있다.(Fig. 3, Fig. 4). 개발된 하중 프로그램은 선박의 전체적인 거동인 호강상태와 새김상태를 선택할 수 있도록 하였다.

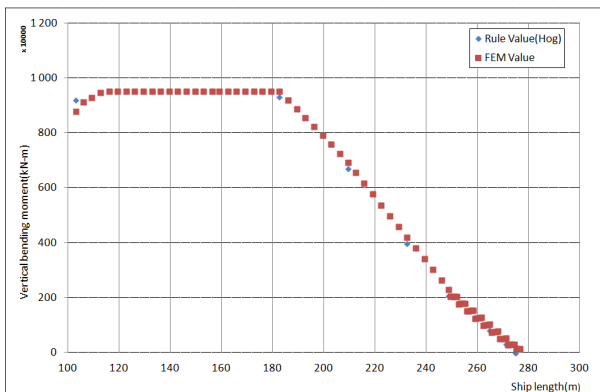


Fig. 3 Vertical bending moment comparison(hogging)

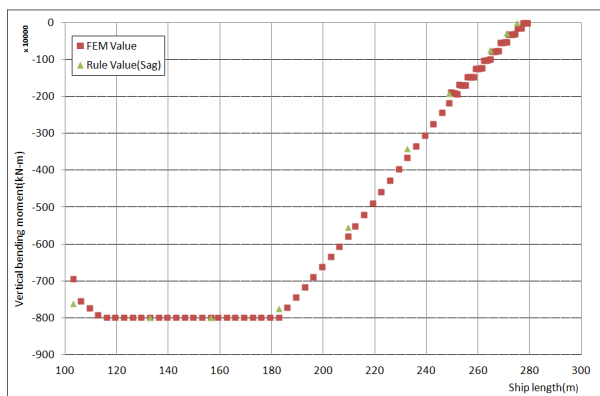


Fig. 4 Vertical bending moment comparison(sagging)

3.1.2 국부하중

탱크하중, 파랑하중 및 발라스트 하중 등 국부하중은 초기

메뉴에서 기본 정보를 넣어 하중세트를 선택하면 2.2에 따라 하중이 자동으로 생성되게(Fig. 6) 구현시켰다. 특히 각 탱크 별 적재높이와 가속도를 조정할 수 있도록 하여(Fig. 7), 사용자의 편의를 도왔다. 또한 한국선급에서 정한 하중세트와 다르게 임의의 하중세트도 가능케 하여 여러종류의 연구가 가능토록 하였다.

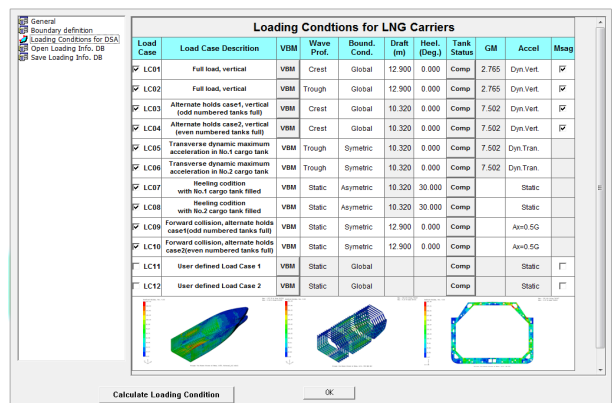


Fig. 5 Overall view for loading conditions

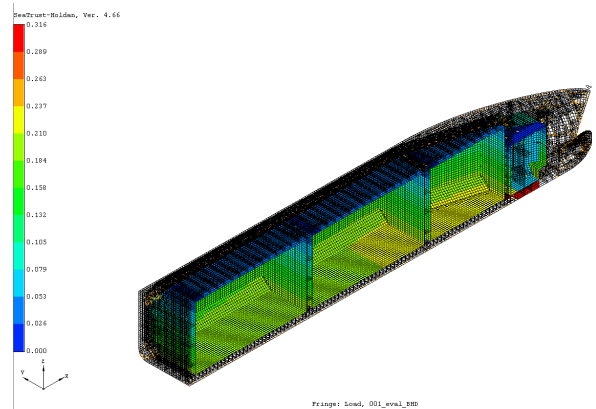


Fig. 6 Internal pressure (LC1) using auto generation

Input Loading for LC01

Compartment	Stat.	Fill(m)
1 ACT_FWD_HFO1	Filled	48
2 ACT_FWD_HFO2	Filled	48
3 ACT_FWD_WBT_P	Filled	40.23
4 ACT_FWD_WBT_S	Filled	40.23
5 ACT_WBT1_P	Empty	
6 ACT_WBT1_S	Empty	
7 ACT_WBT2_P	Empty	
8 ACT_WBT2_S	Empty	
9 ACT_WBT3_P	Empty	
10 ACT_WBT3_S	Empty	
11 ACT_cargo1	Filled	98
12 ACT_cargo2	Filled	98
13 ACT_cargo3	Filled	98
14		

Fig. 7 Filling ratio input example

3.1.3 경계 조건

경계조건 또한 프로그램에서 요구하는 특정한 이름으로 그룹핑해주면 자동으로 모델에 가하게 설정되었다.

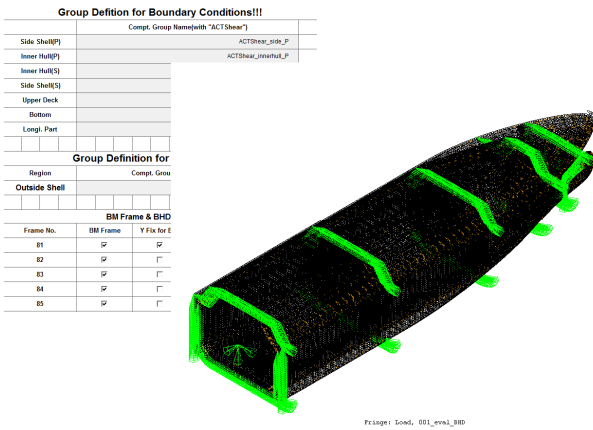


Fig. 8 Boundary condition using auto generation

4. 실적선 검증

2항에 따른 하중세트로 3항에 언급한 자동하중 프로그램을 적용하여 최근 인도된 170K Class 3척에 대하여 검증을 실시하였다. 대상이 된 선박의 화물격납설비는 MarkⅢ형 2척과 NO.96형 1척이며 검증의 절차는 Fig. 9에 도시하였다.

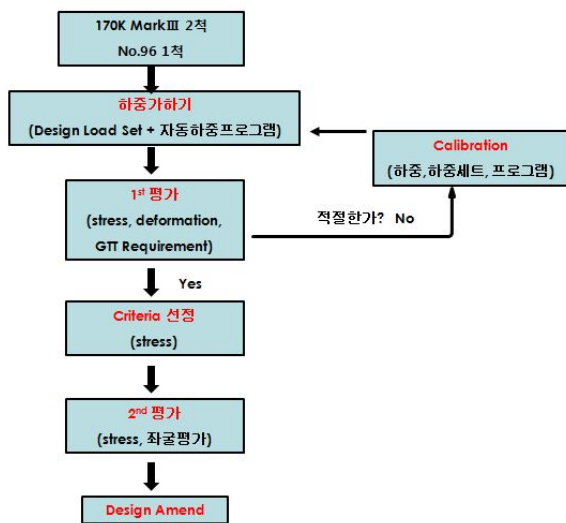


Fig. 9 Compliance verification procedure of assessment system

4.1 설계 검증

실적선 검증을 마친 선박은 다음과 같은 응력집중부위가 식별 되었다. 3척의 샘플쉽은 각기 다른 선급의 승인을 거친 도면이어서 수정이 요구되는 판 두께 정도의 차이는 있지만 응력이 집중되는 부위나 관심부위의 응력수준이 매우 유사함을 알 수 있었다.

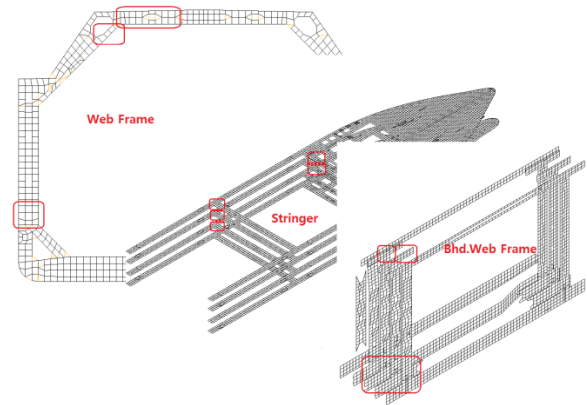


Fig. 10 Identification of amendment for yielding criteria

5. 결론

LNG 선박의 선체구조안전성 평가는 국제가스코드(IGC Code)에 따른 가속도, 선박경사 및 충돌을 고려하여야 하며, 정하중, 동하중의 적절한 조합으로 이루어져야 한다. 설계시 이러한 하중의 정확성 및 해석 시간단축은 전체 선박 건조기간에서 매우 중요한 요소이므로 간소화된 하중세트와 자동하중프로그램이 필수적이라 할 수 있다. 본 논문에 소개된 구조해석지침과 지침에 따른 자동하중생성 프로그램의 일체화된 시스템으로 다음과 같은 효과가 기대된다.

- 자동하중생성에 따른 해석시간 절감
- 국부하중과 선체중첩하중의 동시고려로 구조부 재평가의 용이성
- 하중생성의 정확성 및 해석 수행자의 인적오류 방지
- 가속도, 부분적재, 임의하중세트 등의 다양한 기능에 따른 사용자 편의성

참고 문헌

American Bureau of Shipping, October 2008, HULL

STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS BASED ON THE ABS SAFEHULL APPROACH, GUIDE FOR BUILDING AND CLASSING MEMBRANE TANK LNG VESSELS

Bureau Veritas, 2005,02,08, GUIDELINES FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF MEMBRANE LNG CARRIERS, ND 345

Det Norske Veritas, OCTOBER 2013, STRENGTH ANALYSIS OF HULL STRUCTURE IN LIQUEFIED GAS CARRIERS WITH MEMBRANE TANKS, CLASSIFICATION NOTES No.31.9

IACS, 1 Jan 2014, Part1 Chapter 7 DIRECT STRENGTH ANALYSIS, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers

IGC Code, 1993 Edition, Chapter 4 CARGO CONTAINMENT Lloyd's Register, October 2013, Primary Structure of

Membrane Tank LNG Ships Guidance on Direct Assessment, Ship Right Structural Design Assessment Korean Register, 2014, Part3 Hull Structures, Rules for the Classification of Steel Ships



정상한

- 1978년생
- 인하대학교 선박해양공학과 졸업
- 현 재 : KR 선체기술2팀 책임검사원
- 관심분야 : 선체구조
- 연락처 : 070-8799-8422
- E-mail : shjung@krs.co.kr

대한조선학회 국문논문집 e-Book 발간

대한조선학회 논문집 51권 4호(8월 20일 발행)부터
전 회원분들께 e-book을 이메일로 송부 하였습니다.
인쇄본을 신청하신 분들께는 우편으로 인쇄본을
보내드리도록 하겠습니다.

대한조선학회 논문집(e-book)은 학회홈페이지에서 보실 수
있습니다.