

## 독립탱크 A형 LPG선 탱크 지지구조 해석을 위한 상대운동의 모델링에 관한 연구

이광용\*, 양박달치†\*\*, 박치모\*\*

현대중공업(주) 조선사업본부 조선구조설계부\*  
울산대학교 조선해양공학부\*\*

### A Study on the Modeling of Relative Motion for the Cargo Tank Support Structure of Type A LPG Carrier

Kwang Yong Lee\*, Park Dal Chi Yang†\*\* and Chi Mo Park\*\*

Hyundai Heavy Industries, Shipbuilding Div., Hull Initial Design Dept.\*  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Ulsan University\*\*

#### Abstract

Type A LPG Carrier is the ship using the low temperature independent cargo tank separate from the hull, which has various support structures for laying independent tanks on the hull. In this paper, the direct strength analysis for the support structures has been performed through the direct load analysis, load transfer, stress analysis and strength assessment. Also, a rational modeling method of support structures has been proposed to obtain the dynamic load between the hull and the separate tank.

※Keywords: LPG carrier(LPG선), Support structure(지지구조), Direct strength analysis(직접강도 해석), Fatigue strength analysis(피로강도해석), Dynamic response analysis(동적응답해석)

#### 1. 서론

독립탱크 A형 LPG선은 저온의 액화석유가스를 운반하기 위해 선체와 분리된 저온식 독립화물탱크를 사용하는 선박으로서, 독립탱크를 선체에 탑재하기 위해 다양한 지지구조를 설치한다. 최근

작용하는 하중이 크게 증가되어 이들 지지구조에 LPG선의 대형화 추세에 따라, 탱크 지지구조에 대한 강도 평가가 중요해지고 있다. 특히, 선체와 화물탱크는 선체가 파랑에 의해 거동하는데 비해 화물탱크는 독립적이어서, 그 동적 거동이 다른 특성을 보이며 이를 지지하는 지지구조에 의해 이러한 동적 움직임이 전달되므로 지지구조에 대한 합리적인 해석 기법의 정립이 요망된다. 이 지지구조 중 상갑판과 화물탱크 사이에 설치되어 화물

접수일: 2008년 12월 18일, 승인일: 2009년 3월 17일

† 교신저자: pdcyang@mail.ulsan.ac.kr, 052-259-2159

탱크의 횡방향 움직임을 지지하는 상부 횡요지지 구조는 다른 지지구조들에 비해 선체와 화물탱크 간의 상대 거동과 선체 굽힘 거동이 크게 일어나는 상갑판 중앙부에 설치되므로 피로파괴 가능성이 높아질 수 있어 이에 대한 검토가 필요하다.

Kim et al.(1990)과 Kim et al.(1993)은 선박 운항 실험역의 파랑에 대한 통계적 자료로부터 운동해석과 파랑하중해석을 수행하고 이를 바탕으로 한 구조해석으로부터 응력범위의 장기분포를 추정하는 스펙트럼 피로강도해석법을 사용하여 중형 고속 쌍동선에 적용하였다. 최근에도 불규칙 해상 상태의 파랑변동하중을 고려한 선체구조의 피로강

도해석은 스펙트럼 해석을 기반으로 하여 많은 연구자에 의해 대형 해양구조물과 대형 컨테이너선의 피로해석에 적용된 바 있다(Park et al. 2006, Kim et al. 2008).

Fig. 1, 2에서 보인 것과 같은 독립형 탱크를 가지는 LPG선의 지지구조는 기존 선박의 해상 상태에 따른 선체응답에 의한 하중뿐만 아니라 독립 탱크와 선체의 상대적인 운동에 의한 하중이 작용될 수 있다. 특히 Fig. 2에서 보인 갑판구조와 탱크 상부의 횡요지지구조와 관련해서 선급규정 등에서는 고정 부착되지 않은 구조물의 설계하중에 대한 언급이 되어 있지 않아 선주와 설계자들 사이에 많은 문제가 제기되고 있다. 본 연구에서는 독립탱크 A형 LPG선의 지지구조에 대해 피로 안전성 검토에 대한 기초 연구로서 스펙트럼 피로강도해석법 중 하중 요소 기반 통계적 기법(CSA, Component based Stochastic Approach)을 이용한 지지구조의 강도해석법을 도입하였고, 특히 이를 위하여 선체와 탱크의 상대운동으로 인한 하중 해석 모델링 방법을 제시하였다.

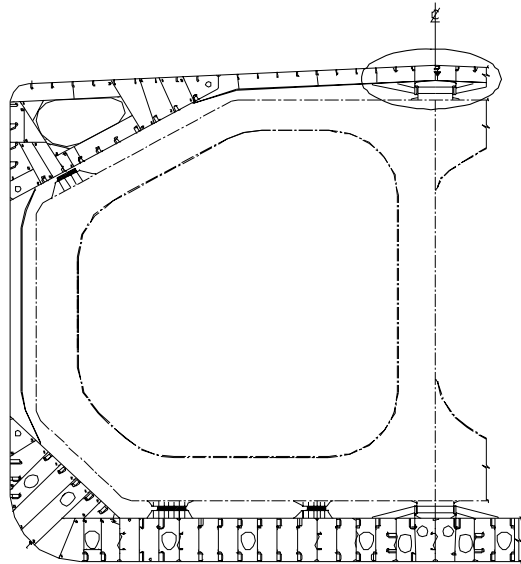


Fig. 1 Midship section of LPG carrier with separate tank

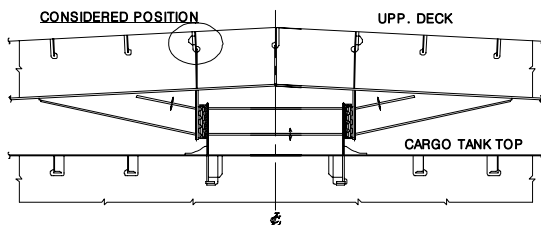


Fig. 2 Structural configuration around upper anti-rolling chock

## 2. CSA 기반 피로강도해석법 개요

일반적으로 스펙트럼 피로강도해석법이란 선박이 운항되는 실제 해상의 파랑에 대한 통계자료를 이용하여 운동해석과 파랑하중해석을 수행하고 구조해석 결과로부터 응력전달함수(STF, Stress Transfer Function)를 획득하여 응력범위의 발생 분포를 추정하는 일련의 해석과정을 의미한다. 특정 유의파고  $H_s$ , 파주기  $T_z$ 와 파 주파수  $\omega$ , 파 조우각  $\theta$ 에 대한 응력 스펙트럼은 다음과 같이 표시된다.

$$S_o(\omega/\theta) = |H_o(\omega/\theta)|^2 \cdot S_w(\omega/H_s, T_z) \quad (1)$$

$S_o(\omega/\theta)$  : Stress spectrum  
 $H_o(\omega/\theta)$  : Stress transfer function  
 $S_w(\omega/H_s, T_z)$  : Wave spectrum

스펙트럼 피로강도해석법 중 CSA 기반 해석법은 각 하중성분별로 응력전달함수를 구하여 이들

의 선형 합으로 전체 STF를 구하는 방법으로서, STF는 각 하중 성분별 구조물의 하중에 대한 응답(SRF, Stress Response Factor)과 구조물의 하중전달함수(LTF, Load Transfer Function)를 식(2)와 같이 조합하여 얻는다.

$$H_o(\omega/\theta) = \sum STF(\omega/\theta) = \sum (SRF)_i \cdot (LTF(\omega/\theta))_i \quad (2)$$

$LTF(\omega/\theta)$  : Load transfer function

$SRF$  : Stress response factor

$i$  : Dominant load component

상기 과정을 통해 얻은 응력범위의 발생분포에 대해, 파 빈도분포도(Wave scatter diagram)의 통계해석을 수행하여 단기 피로손상율을 구하고, 장기해석을 통하여 설계수명 동안의 피로손상율을 구할 수 있다.

### 3. 선체운동에 의한 하중해석과 피로강도 해석

#### 3.1 하중해석

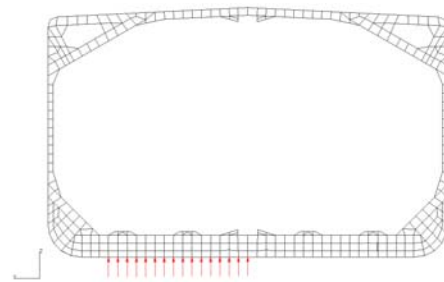
선박이 항해시 탱크 지지구조에 작용하는 하중들은 파랑중 선체의 운동에 의한 동하중, 해수에 의한 동압력, 발라스트 탱크의 내압 등이 있다.

파랑중 선체운동에 의한 동유체력을 평가하기 위해서 선체운동해석을 수행하는데, 본 연구에서는 세장선에 대해 추정 정도가 높은 것으로 알려진 Strip method를 기반으로 주파수 영역(Frequency domain)에서 파랑하중 계산을 수행하였다. 운동해석후, 단위파고의 규칙파에 대한 선체의 응답 RAO를 얻었고, 이 RAO에 대해 파랑하중의 통계해석으로부터 불규칙 파랑하중의 동유체력을 계산하였다.

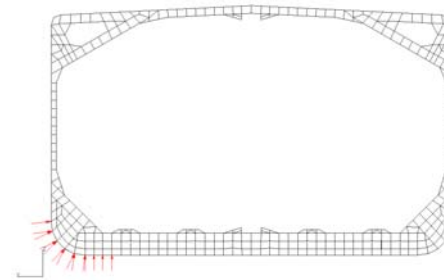
선체는 수면하 부위에 대해 해수에 의한 동압력을 받는다. 이 하중은 파의 조우각, 주파수 등 각 운동해석 조건에 대하여 다른 값의 분포를 갖게 된다. 본 연구에서는 해석 관심 부위의 대상이 갑판 하부의 탱크 지지구조이므로 해석의 편의상 동압력을 선저, 밑지, 선측의 세 부위에 대해 각 위치에서 Fig. 3에서 보인 것과 같은 분포에 대한

단위 하중의 조합으로 가정한다. 이에 대한 구조해석은 해당 유한요소모델에 하중조건의 하나로 포함하여 수행한다.

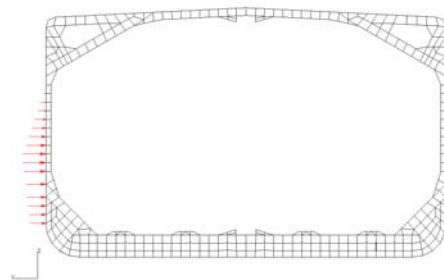
선박 항해시, 발라스트 탱크에는 중력가속도 및 파에 의한 선체의 운동가속도가 고려된 관성력이 작용하며, 이를 등가의 탱크 내 수두압으로 변환시켜 내압으로 고려한다.



<Bottom>



<Bilge>



<Side>

Fig. 3 Modeling of sea water dynamic pressure

### 3.2 응력해석

응력해석은 피로강도 관심부위에 대한 피로해석 모델의 경계조건을 얻기 위해 수행하는 선각구조 (Coarse mesh) 해석과 피로강도 관심부위의 SRF를 추정하기 위해 수행하는 국부구조(Local fine mesh) 해석의 2가지로 구성된다. 본 연구의 수치 계산은 MSC/NASTRAN을 이용하였다.

선각구조해석 모델은 선체 중앙부 1개 화물창 내에 관심 부위가 있음을 고려하고, 양단의 경계면 효과를 최소화시키기 위하여 양단에 각각 1/2 화물창을 덧붙인 2개 화물창을 대상으로 하였고, 국부구조해석 모델로는 피로강도 관심부위에 대해 높은 운동응답을 보이는 선수쪽 횡특설늑골 한 개를 모델 범위로 고려하였다.

하중해석에서 고려된 각 하중성분에 대해 단위 하중개념을 도입하여 선체 단면에 대한 단면력, 선체의 운동가속도에 의한 관성력, 수두압 등의 형태로 분할하여 하중조건을 구성하였다.

경계조건은 Table 1에서 보인 2가지에 대하여 하중조건별로 각각 적절한 해석 경우에 대하여 적용되었다.

- BC1 : 우측 끝단은 완전 구속하고, 좌측 끝단은 강체로 모델링하였는데 끝단 내의 중부재 절점들을 한 개의 독립절점에 종속시켰다.
- BC2 : 스프링 요소를 사용하여 양 끝단에 경계조건을 부여하였다. 즉, 횡격벽의 측면 및 상면, 하면 라인에 대해 수직 및 수평 스프링을 적용하여 모델이 해당 방향으로 지지되도록 경계조건을 부여하였다.

### 3.3 피로강도 평가

상기 과정에서 결정된 각 하중성분별 LTF와 SRF를 선형 합으로 조합하여 전체 STF를 구하고, 식(1)에서 보인 것과 같이 해양파의 파 스펙트럼에 STF를 고려하여 응력 스펙트럼을 계산한다. 여기서, 파 스펙트럼이란 파 주파수에 대한 파 에너지의 분포로서, 특정 해상상태를 대표하는 파 특성치와 그에 대한 구조응답의 확률분포함수를 나타낸다. 이 응력 스펙트럼을 이용하여 선박이 단기간 동안 불규칙파 중에서 일정한 속도와 일정한 파 조우각을 가지고 움직일 때 응력범위의 통계적

**Table 1** Boundary condition for each load component

B.C.	Load component
BC1	Vertical bending moment, Horizontal bending moment, Torsional moment
BC2	External sea pressure, Motion-induced accelerations

BC1 : Right end fixed, left end rigid body (Refer to Fig. 5)  
BC2 : Both ends symmetric condition, spring constraints located at side, deck and bottom line of transverse bulkhead

인 확률분포를 추정한다.

단기 응력범위 분포의 응답 결과와 선박 운항해역의 해상상태, 파 조우각, 선박속도, 화물의 적재상태(만재/공선) 등의 확률을 고려하여 장기응력범위의 분포를 추정할 수 있다.

응력범위의 장기분포와 S-N 자료를 이용하여 피로손상율을 계산한다. 국부 유한요소모델에서 단위하중성분에 대한 응력값으로부터 피로강도해석을 위한 핫스팟 응력을 계산하였다. 핫스팟 응력 계산방법으로는 DnV(2005)에서 제안한 방법을 적용하였다. 즉, 핫스팟으로부터 판 두께의 0.5배와 1.5배 떨어진 지점에서 구해진 응력으로부터 핫스팟까지의 응력을 외삽한 후, 절대값이 큰 주응력 값을 선택하여 핫스팟 응력으로 산정하였다.

## 4. 선체/탱크 상대운동에 의한 하중해석

### 4.1 선체/탱크의 동적 구조해석

선체는 파랑에 의해 거동하는데 비해 선체에 독립형으로 설치된 탱크는 구조물의 동특성에 의해 선체운동과 다른 거동을 보인다. 이러한 거동을 모사하기 위해서 파랑에 의한 선체의 운동으로 발생한 동하중을 기진력으로 작용시켜 탱크와 지지구조의 상대운동응답을 구하기 위한 구조 동적응답해석을 수행하였다. 즉, 선체운동해석을 통한 운동응답의 결과를 동적하중으로 작용시키고 이에 의한 선체와 탱크의 동적운동응답을 계산하면 선

체와 탱크의 상대변위를 구할 수 있다. 선체의 구조물에 동하중이 작용한 경우에 구조동적응답은 기진력이 선형 중첩된 조화함수이므로 선체의 주파수응답해석을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 Kim and Benninghof(2006)가 구조물에 대한 주파수 동적응답해석에 적용한 모드해석법(Mode analysis method)을 이용하였고, 해석도구로는 MSC/NASTRAN의 주파수해석법(Solution type 111)의 모드법(Modal method)를 사용하였다.

이를 위한 동적구조해석 모델은 Fig. 5에서 보인 선각구조해석 모델의 내부에 탱크구조의 해석 모델을 추가하였다. 탱크 바닥과 선저구조 사이의 지지구조 연결부는 운동응답에 의한 가속도를 고려하여 선체와 탱크가 같이 거동하는 것으로 모델링하였다. 탱크 상부의 횡요지지구조에서는 상대운동의 결과에 따라 선체와 탱크가 따로 움직일 수도 있고 선체와 탱크가 접촉되어 미끄러짐이 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 먼저 두 구조가 떨어진 상태에 대해서 동적응답을 구한 후, 상대변위가 음이 되어 붙는 경우는 대응점을 강제로 변위를 같게 하는 구속조건을 부여하여 해석하는 방법을 사용하였다.

4.2 응력해석

앞에서 언급한 바와 같이 구조 동적응답의 결과, 선체와 탱크의 상대변위가 두 구조의 초기 갭보다 크면 선체와 탱크가 접촉되고 접촉력을 발생시키게 된다. 이때, 선체와 탱크 지지구조 사이의 접촉력은 대응점들의 변위를 강제로 같게 한 후 구조동적해석을 수행하여 구할 수 있다. 또한, 해석관심부위를 포함하는 횡특설능골 한 개를 모델 범위로 고려한 국부 구조해석을 수행하는데, 상대운동에 의한 접촉력을 지지구조의 연결부에 적용하고 선각구조해석 결과로부터 해당 절점의 변위를 적절한 경계조건으로 설정한다.

5. 계산예

본 연구에서는 대형 독립탱크 A형 LPG선의 상부 횡요지지구조에 대하여 CSA 기반 스펙트럼 피로강도해석법을 수행하기 하기 위한 운동해석과

Table 2 Principle dimensions

LBP	215 m
B	36.6 m
D	22 m
T	12.55 m
V	17.75 knots

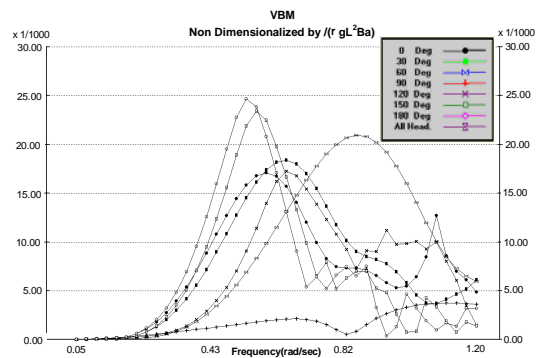
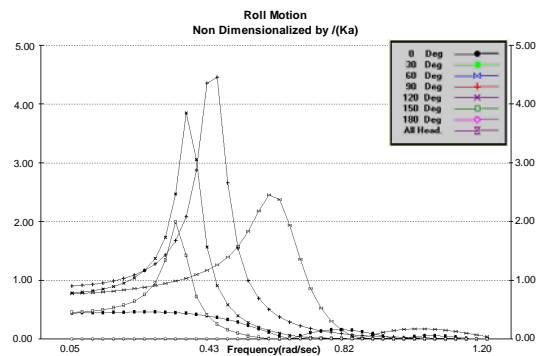


Fig. 4 Motion/Force RAO(Full load)

구조해석을 수행하였다. 대상선박의 주요 제원은 Table 2와 같다. 대상 선박에 대한 운동해석 결과는 Fig. 4와 같이 무차원화된 Motion/Force RAO의 그래프로 나타내었다.

구조해석시 사용한 선각구조해석 모델 및 국부 구조해석 모델은 각각 Fig. 5, 6과 같다. Fig. 6은 Fig. 2에서 보인 탱크 상부구조의 상세 유효요소 해석 모델이고 특히 Fig. 2의 해석 관심부위에 대하여 주요 하중 성분인 수직 굽힘 모멘트 고려시 구조해석 결과를 Fig. 7에 보였다. 이 그림에서는 응력 집중 현상이 발생하는 상부 횡요지지구조와

중능골간 연결부(브래킷 토우부)에서 높은 구조응답을 보여주고 있다.

또한, 상부 횡요지지구조의 강도에 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되는 횡요운동으로 인한 동하중을 기진력으로 구조 동적응답해석을 수행하여 Fig. 8과 같이 선체와 탱크의 상대변위 RAO를 구

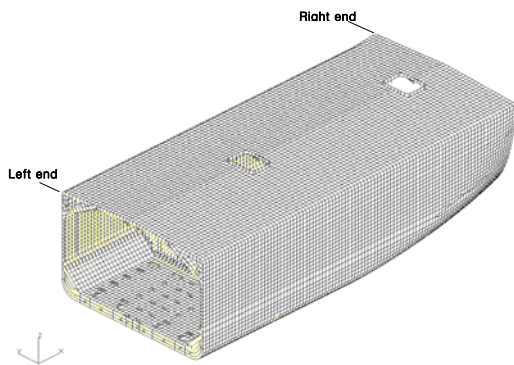


Fig. 5 Coarse mesh model

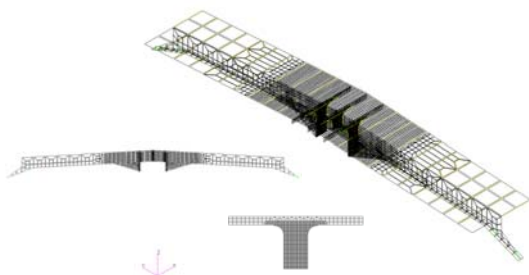


Fig. 6 Local fine mesh model

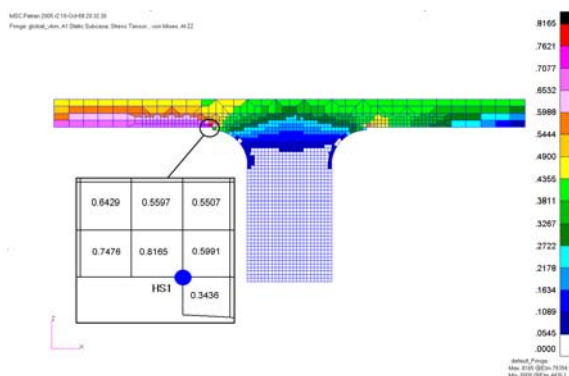


Fig. 7 Structural analysis result(VBM)

하였고, Fig. 9와 같은 선체와 탱크 사이의 접촉력을 계산하였다.

브래킷 토우부에 대하여 운동해석 및 응력 해석으로부터 하중전달함수와 응력응답계수를 구하고 구조 동적응답해석의 결과를 추가적으로 고려하

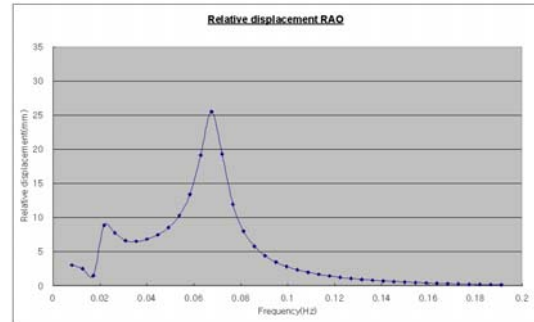


Fig. 8 Relative displacement RAO

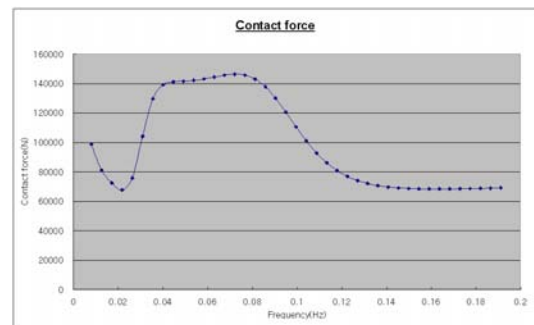


Fig. 9 Contact force between hull and tank

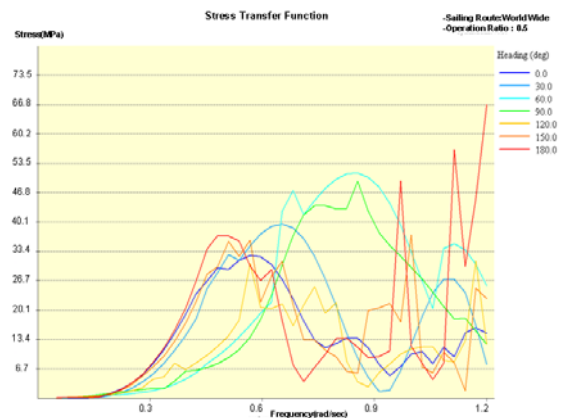


Fig. 10 Stress transfer function(Full load)

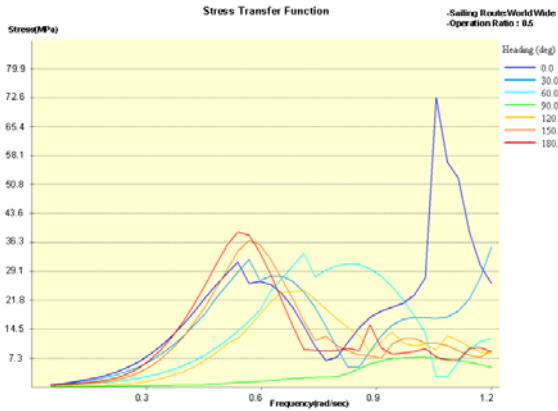


Fig. 11 Stress transfer function(Ballast)

여 Figs. 10과 11과 같은 응력전달함수를 획득하여 스펙트럼 피로강도 평가시 사용 가능하도록 하였다.

6. 결론

본 연구에서는 독립탱크 A형 LPG선 탱크 지지구조에 대해 CSA 기반 피로강도해석법을 도입하였다. 특히, 해석 과정에서 선체와 탱크의 상대운동을 보다 정확히 모사하기 위해 구조 동적응답해석법을 사용하여 LPG선과 같이 선체와 탱크가 분리된 선박에 대해 적용 가능하도록 하였다. 그 결과 선체와 탱크의 접촉문제를 포함한 비선형성을 가지는 문제에 대해 선형화 과정을 통해 스펙트럼 피로강도해석법에 적용함으로써 전체 해석과정과 해석시간을 크게 단축하였다. LPG선의 선체와 독립탱크 사이에는 이들의 상대운동으로 인한 수직방향의 접촉력 외에도 선체와 탱크가 접촉된 상태에서 다른 운동성분의 변위가 동시에 작용하기 때문에 접촉면에서 마찰과 같은 비선형적 국부 메커니즘이 작용하여 지지구조의 강도에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이와 관련된 연구는 지지구조에 대한 보다 정확한 피로강도 평가를 위해서 시급히 필요한 과제라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- Det Norske Veritas, 2005, "Fatigue Assessment of Ship Structures," Classification Notes No. 30.7.
- Kim, C.W. and Bennighof, J.K., 2006, "Fast Frequency Response Analysis of Partially Damped Structures with Non-proportional Viscous Damping," Journal of Sound and Vibration, Vol. 297, pp. 1075-1081.
- Kim, J.J., Yoon, B.S. and Yang, P.D.C., 1993, "An Efficient Algorithm in Spectral Fatigue Analysis of Ship Structures," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 30, No. 4, pp. 93-101.
- Kim, J.H., Chon, Y.K., Chung, K.T., Ha, T.B. and Kim, Y.B., 1990, "The Evaluation of Stress and Hull Girder Fatigue Strength under Dynamic Wave Loads," K.R. Technical Report, Vol. 16 Report No.10074.
- Kim, S.M., Kim, M.H., Kang, S.W., Pyun, J.H., Kim, Y.N., Kim, S.G., Lee, K.E. and Kim, G.R., 2008, "A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Side Shell Longitudinals on 8,100 TEU Container Carrier using Hot Spot Stress and Structural Stress Approaches," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 45, No. 3, pp. 296-302.
- Park, S.W., Han, J.W., Han, S.H., Ha, T.B., Lee, H.G., Hong, S.Y., Kim, B.W. and Kyung, J.H., 2006, "Fatigue Strength Analysis of Pontoon Type VLFS using Spectral Method," Journal of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 43, No. 3, pp. 351-361.



< 이 광 용 > < 양 박달치 > < 박 치 모 >