

## LNG 운반선의 구형 화물창 슬로싱 해석

노병재<sup>†\*</sup>

(주) 현대중공업 조선기본설계2부<sup>\*</sup>

### Sloshing Load Analysis in Spherical Tank of LNG Carrier

B. J. Noh<sup>†\*</sup>

Project Planning Department 2, Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.<sup>\*</sup>

#### Abstract

Sloshing loads, produced by the violent liquid free-surface motions inside the cargo tank, have become an important design parameter in ship building industry since there have been demands for the increased sizes of the cargo containment system of LNG carriers. In this study, sloshing impact pressure acting on the shell of the spherical cargo tank of an LNG carrier as well as dynamic pressure and flow behavior around the pump tower located at the center of the tank have been calculated. Comparative numerical sloshing simulations for a spherical LNG tank using 2-D LR.FLUIDS which is based on the finite difference method and 3-D MSC.DYTRAN which is capable of calculating nonlinear fluid-structure interaction have been carried out. A method of calculating sloshing-induced dynamic loads and the subsequent structural strength analysis for pump tower of a spherical LNG carrier using MSC.DYTRAN and MSC.NASTRAN have been presented.

※Keywords : Very large containership(초대형 컨테이너선), Wave load analysis(파랑하중해석), Design wave(설계파), Load transfer(하중전달), Dynamic loading approach(직접하중해석), Heeling angle(경사각도), Load case(하중조건), Germanischer Lloyd classification(독일선급)

#### 1. 서론

선박기술의 꽃'이라 칭해지는 LNG 수송선은 극저온(-163oC)의 액체화물을 안전하게 운송해야 하기 때문에 고도의 정밀한 비선형 구조해석을 필요로 하는 고부가가치선박이다. 최근 에너지원의 다원화와 무공해 에너지 공급을 늘리기 위하여 청

정에너지인 LNG 수요가 급증하여 화물창의 크기가 증가된 LNG선의 대형화가 요구되고 있다. LNG 운반선은 유체의 유동을 제한하거나 감쇄효과를 줄 수 있는 내부 보강재나 제수 격벽이 없고 또한 탱크의 크기가 크기 때문에 이에 대한 화물창 내 LNG유동의 특성을 평가해 볼 필요가 대두되었다. 특히 부분적재를 한 상태에서 운항하는

경우, 화물탱크내 액체유동의 고유주기가 선박의 운항에서 발생하는 선체운동 주기와 일치하여 탱크 구조에 큰 압력을 발생시켜 구조 손상의 한 원인이 될 수 있다. 또한 선박의 동요주기가 유체의 고유주기와 일치하지 않더라도 불규칙적으로 큰 충격압이 발생하게 되는 주기의 영역이 있다. 이와같은 밀폐된 공간내의 액체 운동을 '슬로싱'이라 하며 정상파 (Standing wave), 진행파 (Travelling wave), 수력도약 (Hydraulic-jump), 소용돌이(Swirling)등이 있다. 이중 Swirling은 드물게는 육각형 탱크에서도 일어나지만 주로 구형 탱크에서 일어난다. 일반적으로, 슬로싱 현상은 탱크의 형상과 운동모드, 운동의 크기, 선박의 회전 중심까지의 거리, 적재 정도에 따라 슬로싱 파형과 화물창 벽면에서의 충격압력이 다르게 나타난다. 따라서 액체상태의 화물을 취급하는 선박에서는 반드시 슬로싱 효과를 고려한 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 슬로싱 문제에 대한 해석방법으로서의 모형실험법과 수치계산법을 들 수 있다. 탱크내의 유체의 유동은 비선형적인 특성이 강하고 동적 유체력을 정확히 예측하기 어렵기 때문에 LNG선의 건조가 활발하던 1970년대 연구가 활발히 진행되어 많은 실험자료들이 발표된 바 있고, 이들 자료들은 슬로싱 현상에 대한 현상학적 이해와 충격압력의 크기정도를 살펴보는데 많은 공헌을 하였다. 그러나, 많은 비용이 소요된다는 사실 외에도 결과를 실선으로 확장하는데 있어 적지않은 문제를 가지고 있어 그 적용에 한계를 가지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 한계의 극복방안으로 최근 수치계산을 이용한 해석방법이 시도되고 있는데, 조선소에서는 유한차분법(FDM)에 기본을 둔 2차원 해석기법을 이용한 Lloyd선급의

LR.FLUIDS 프로그램을 널리 사용하고 있다. 본 논문에서는 구형 LNG화물창의, 탱크벽면에 미치는 슬로싱 충격압력과 탱크의 중앙부에 위치한 펌프타워에 작용하는 유체압력 및 유동을 계산하기 위하여 현재 일반적으로 많이 이용되고 있는 LR.FLUIDS를 이용한 2차원 해석과 유체-구조의 비선형 연성을 고려할 수 있는 MSC. DYTRAN을 이용한 3차원 해석을 통해 결과를 비교검토했었다.

## 2. 선박설계 슬로싱해석의 일반

### 액화천연가스 운반선

Fig. 1 은 해석에 적용된 구형화물창을 적용한 액화천연가스 운반선의 일반배치도이다. 이 선박은 4개의 화물창으로 구성되고, 구형화물창은 각각의 실린더형 스킷트(Skirt)에 의해 선박에 지지되며 운항속도는 19.5노트이다.

구형탱크는 화물온도 -163도에 견딜수 있도록 알루미늄 합금 5083-0로 구성되었으며 rigid plastic foam으로 보온되고 금속 foil로 싸여져 있다.

### 유체와 선박의 고유주기

적재율에 제한없이 항해할수 있도록 LNG화물창을 설계하기 위하여, 구형 LNG 화물창의 탱크 벽면과 펌프타워에 작용하는 충격압은 설계에서 중요하게 고려되어야 한다. 당사의 이전 경험을 바탕으로[1], 부분적재시 유체 슬로싱운동은 화물창의 35%, 50% 적재범위에서 가장 심각하다고 결론을 얻었다. 구형탱크의 유체유동의 고유주기는 아래와 같은 반경형식에 의해서 표현된다.

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{D}{2g}} \cdot f\left(\frac{h}{D}\right) \quad (1)$$

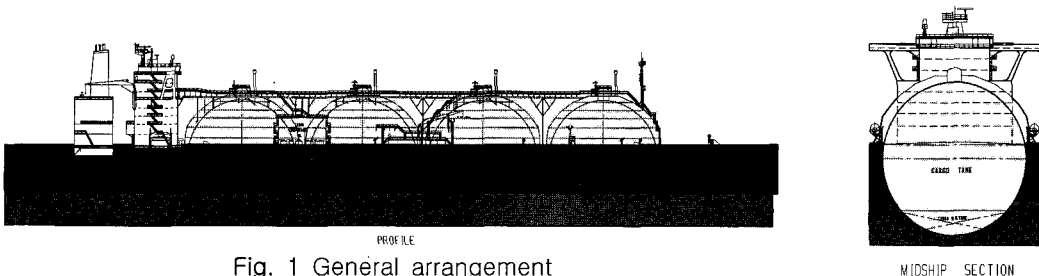


Fig. 1 General arrangement

여기서,  $h$ 는 탱크하부에서의 유체 적재높이,  $D$ 는 탱크직경,  $g$ 는 중력가속도, 적재비의 함수  $h/D$ 는 아래의 간단한 표현으로 근사된다.

$$f\left(\frac{h}{D}\right) = \left[1 - \left(\frac{h}{D}\right)^{1.2}\right]^{0.25} \quad (2)$$

이 함수의 형상은 적재비  $h/D$  이 증가함에 따라 유체의 고유주기는 감소한다. 그리고 80%이상의 적재시에는 급격하게 감소한다.  $h/D$ 로 표현된 35%, 50%의 화물적재상태에서 유체고유주기는 각각 8.3초, 7.82초로 평가되었다. 부분 적재된 탱크들에 대한 선박의 하중상태를 선택하여 먼저, 횡동요에 대한 고유주기를 계산한다. 35%, 50%의 부분적재 하중조건에서 횡동요의 고유주기는 14.9초, 16초로 결정되었다. 선체운동주기는 스트립(Strip)방법의 운동해석 프로그램으로 계산하였다.

탱크운동 시나리오

부분적재상태의 구형탱크의 슬로싱 운동은 좌우동요(e.g., sway motion)가 절대적으로 중요하다.

반면에 횡동요 (e.g., roll motion)는 적은 유체 응답을 일으킨다. 그러나 실험에서는 좌우동요, 횡동요 운동이 연성할 때 가장 심각한 슬로싱이 발생한다고 보고되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 유의운동으로 좌우동요, 횡동요 운동이 결정되었다. 좌우동요의 공진주기는 유체의 고유주기와 같은 주기를 선택하였다.

탱크의 운동은 선박의 중심으로부터 단순조화운동을 가정하였다. 운동의 크기(excitation amplitude)는 아래의 LR선급의 기준을 적용하여 선박의 수명동안의 최대 운동크기를 결정하였다.[2]

- Maximum lifetime roll angle (degree) :

$$\phi_{\max} = \left[14.8 + 3.7 \frac{L}{B}\right] e^{-0.0023L} \quad (3)$$

- Maximum lifetime sway amplitude (m) :

$$y_{\max} = 5 e^{-0.0025L} \quad (4)$$

여기서,

L : 선박의 길이 (m)

B : 선박의 폭 (m)

해석에 사용된 진폭은 식 (3),(4)에 의해 19.13도(횡동요), 2.52m(좌우동요)로 결정되었고, 전체 해석시간은 LR 선급의 절차를 사용하여 120초로 결정하였다.

3. LR.FLUIDS를 이용한 펌프타워 슬로싱 해석

수치해석 모델

구형탱크는 기하학적 형상으로 각형탱크에 비하여 슬로싱이 문제가 되지 않으며, 구형탱크는 충격압력에 대해서도 막응력으로 감당하기 때문에 강도상 여유가 있다.

여기서는 구형탱크내의 펌프타워 구조의 슬로싱 강도를 유체장내의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 만족시키기 위해 SURF기법이 적용된 LR FLUIDS를 이용하여 평가하는 과정을 소개하고자 한다.[3] 먼저 선체운동 및 액체의 유동, 적재물을 고려하여 공진여부를 검토하고 충격압력을 계산한다. 본 연구에서 사용된 유한차분모델과 횡동요에 대한 액체화물의 자유표면운동을 설명하

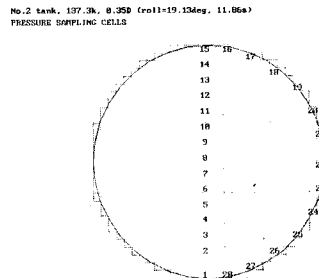


Fig. 2 Sampling cells for calculation

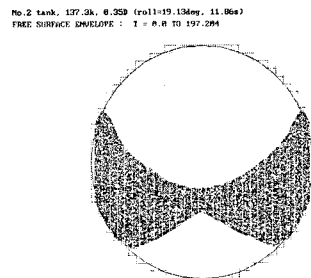


Fig. 3 Cargo free surface movement

는 그림이 Fig. 2, 3에 나타나 있다. 이 모델은 30x30의 등간격으로 분할하였고, 슬로싱압력을 파악하기 위하여 28개의 위치를 정하였다.

**유체속도**

본 연구에서는 구형탱크의 펌프타워 위치에서의 유체속도를 결정하기 위하여 횡동요, 좌우동요에 대해 작은주기 범위에 걸쳐 여러 사이클에 대해서 시뮬레이션이 수행되었다. Fig. 4는 횡동요, 좌우동요에 대한 속도분포를 나타내며, Fig. 5는 아래 식 (5)에 의해 계산된 연성운동의 35%, 50% 적재상태에서의 펌프타워 각각의 위치에서 계산된 속도분포를 나타낸다.

$$V = [V_R^2 + V_T^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

**펌프타워 하중계산**

유체속도의 분포를 적용한 적재율에 따른 펌프타워의 각 위치에서의 하중의 분포는 Fig. 6에 나타난 Keulegan-Carpenter 상수로 결정한다.[4] Keulegan-Carpenter 식 (식6)은 관성력과 항력의 두 개의 하중성분을 포함하고 펌프타워를 따라 모

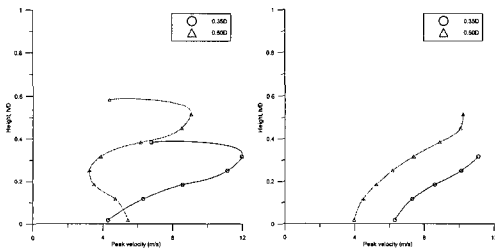


Fig. 4 Distribution of velocities (Roll, Sway)

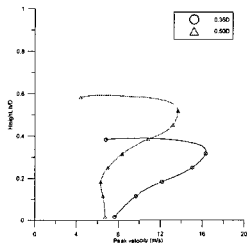


Fig. 5 Distribution of velocities (Roll + sway)

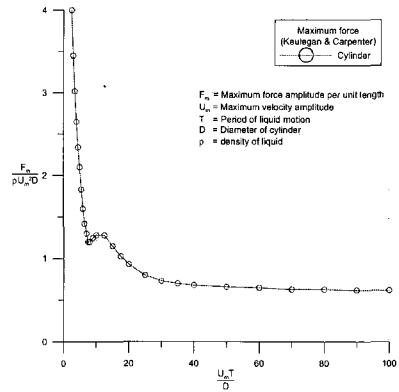


Fig. 6 Force coefficient curve by Keulegan and Carpenter

든 위치에서의 단위길이당 전체하중의 평가를 가능하게 한다. 펌프타워에 걸리는 액체화물의 속도 분포를 통하여 Fig. 6을 이용하여 펌프타워에 미치는 단위길이당 최대하중을 Keulegan-Carpenter 수( $UmT/D$ )를 이용하여 계산한다.

$$F = \frac{1}{2} \rho D U_m^2 \left[ \frac{\pi^2}{K} C_M \sin \theta - C_D \right] \cos \theta \quad (6)$$

여기서,

F : 단위길이당 실린더에 걸리는 힘

유체유입속도  $U = U_m \cos \theta$

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi}{T} t$$

$U_m$  : 유입속도의 진폭

$\omega$  : 주파수,  $T$  : 주기

$C_M$  : 관성력계수(Inertia coefficient)

$C_D$  : 항력계수(Drag coefficient)

$K$  : Keulegan and Carpenter Number

$$= U_m T / D \quad (D : \text{실린더 직경})$$

$U_m D / \nu$  : Reynolds 수

$\nu = \mu / \rho$  : 동점성계수

$\mu$  : 유체점성,  $\rho$  : 유체밀도

Fig. 7, 8은 35%, 50%의 적재율에서 계산한 펌프타워의 각 위치에서의 하중의 분포를 나타낸다. 결과의 하중을 펌프타워 링 위치에 적용하여 구조해석을 수행하여 강도를 평가한다.

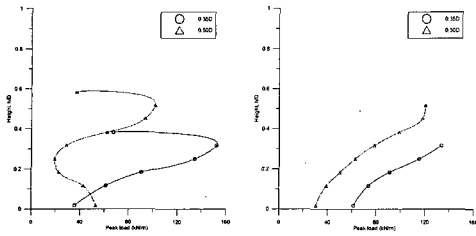


Fig. 7 Distribution of peak loads(Roll, Sway)

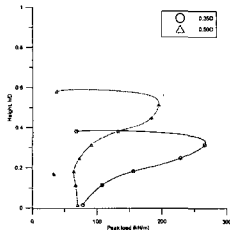


Fig. 8 Distribution of peak loads (Roll + sway)

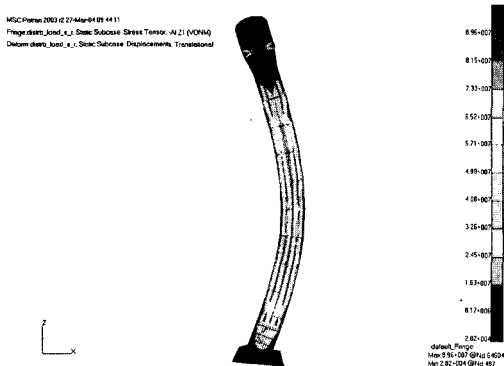


Fig. 9 Stress result of pump tower (Roll)

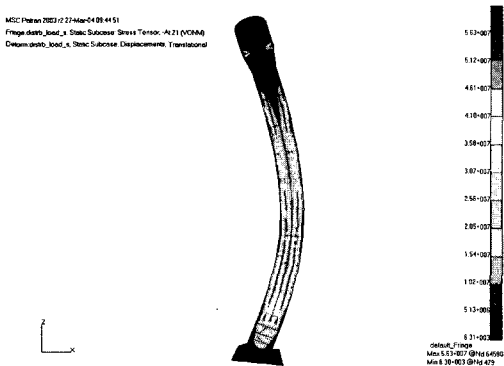


Fig. 10 Stress result of pump tower (Sway)

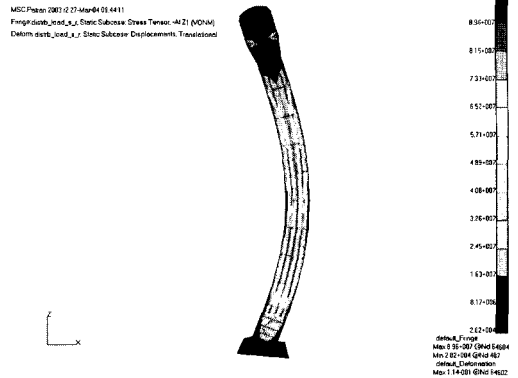


Fig. 11 Stress result of pump tower(Roll + Sway)

최대응력이 예상되는 50% 적재상태에서의 펌프타워 구조변형과 응력을 Fig. 9에서 Fig. 11에 나타내었다. 펌프타워와 스텐은 실린더 좌표계를 사용하였으며 펌프타워의 유체 슬로싱 하중은 타워내 링위치 분포하중으로 적용되었다.

#### 4. MSC.DYTRAN를 이용한 펌프타워 슬로싱 해석

탱크의 유동에 대한 탱크 내 액체 화물의 슬로싱 현상에 의한 펌프 타워의 압력변화를 3차원 동적 비선형 해석프로그램인 MSC.Dytran으로 구조-유체 연성해석을 수행하여, 얻어진 순간 최대 압력분포를 Msc. Nastran의 정적인 압력으로 환산하여 구조물의 응답을 구하였다.

#### 유체-구조의 연성해석

Msc.Dytran에는 유체-구조의 연성해석 방법으로 1) 유체영역의 Euler 요소와 구조요소인 Lagrange요소의 경계를 자유롭게 정의 하는 General Coupling과 2) 두 요소간의 공통 경계만을 정의하여 자유로운 구조요소의 이동을 표현 할 수 있는 ALE Coupling이 있으며, 본 연구에서는 정확한 선체운동 상태를 표현하기 위해 ALE 법을 사용하였다. Fig. 12에 두가지 방법에 대한 개략적인 설명을 보였다.[5]

ALE(Arbitrary Lagrange Euler) 방법은, 구조요

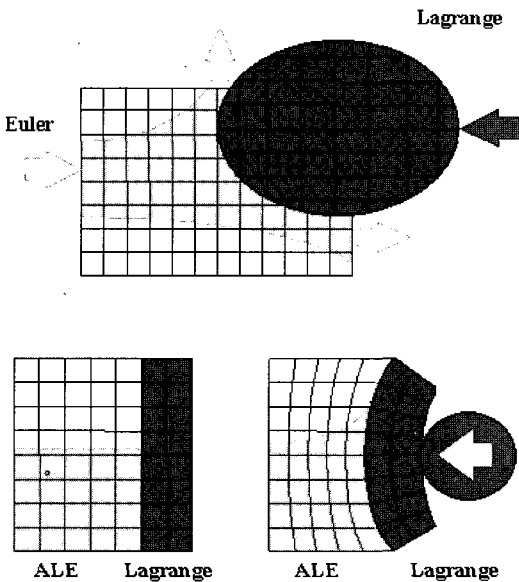


Fig. 12 Interaction between fluid and tank

소와 유체 cell의 결합부에서 유체 cell의 절점들은 구조요소의 절점들과 함께 운동하며, 이 운동은 Euler mesh 전체로 전파된다. 결합부에서 구조요소는 유체가 움직이는 경계면으로 작용하며, 유체압력이 구조요소에 작용된다. 이 경우 유체를 이루는 cell(Euler mesh)은 공간에 고정되어 있는 것이 아니기 때문에 Euler mesh의 이동에 따라 지배방정식은 수정된다.

**유체-강체 구조의 연성**

MSC.Dytran에서는 시간에 대한 계의 동적 지배방정식을 유체의 운동과 구조의 응답 및 구조-유체 연성을 각 시간증분에서의 양해법으로 적분하여, 연성된 계가 평형상태에 도달하면 다음의 시간증분을 가하는 방법으로 진행된다. 따라서, 양해법에 의한 동적 비선형 해석은 일반적으로 충돌 및 폭발과 같이 아주 짧은 시간내의 현상을 규명하는데 주로 이용되고 있다.

한편, 양해법에 의한 시간증분의 결정에는, 대상 모델의 탄성계수 및 밀도와 같은 재질적인 성분과, 유한요소의 크기등에 의해 선체와 같은 강 구조물의 경우 최소 시간증분은 1.0E-7sec 정도

로 추정되어 진다. 반면, 선체 운동에 의한 슬로싱 현상은 선체 주기 및 액체화물과의 동조시간등을 고려하면 최소한 100sec 이상의 선체 동요시간이 필요하게 되어, 결국, 슬로싱 현상에의 양해법 적용은 계산시간만으로도 몇 달이 소요 되는 물리적인 제약이 있다.

하지만, 탱크내의 유동에 의한 슬로싱 압력의 평가에 있어, 탱크 구조물 자체의 변형은 유동에 비해 상대적으로 미소하여, 탱크 구조물의 변형이 유체 거동에 직접 영향을 끼치는 않는다고 가정하면, 앞에서 언급한 시간증분의 제약에서 벗어 날 수 있다. 즉, 탱크 구조물을 변형하지 않는 강체로 가정하면, 구조물의 변형 및 응력 계산을 하지 않아도 되며 나아가 시간증분도 유체의 밀도에만 의존하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 탱크의 슬로싱 현상에 대한 규명 및 펌프 타워의 강도 평가를 위해 다음과 같이 두 단계로 나누어 해석을 수행 하였다.

1) Msc.Dytran에 의한 슬로싱 유동해석

2) Msc.Nastran에 의한 펌프 타워 강도평가

이 결과를 앞서 수행한 LR.FLUIDS 결과와 비교하기 위하여 동일한 조건하의 3차원 슬로싱 해석을 수행하였다.

**MSC.DYTRAN을 이용한 3차원 슬로싱해석**

구형 화물창의 외연을 변형하지 않는 강체 유한요소로 정의하며, 이 강체 모델에 직접 선체의 운동이력을 부여하여, 탱크의 내부 유체를 움직이게 한다. 선체 운동은 횡동요와 좌우동요이며 또한, 이들의 연성된 운동하의 슬로싱 현상을 평가하였다. 사용된 탱크 운동의 동요주기와 진폭은 LR.FLUID와 동일한 정현파로 하였다.

해석에 앞서 ALE Coupling에 의한 유동장을 표현하기 위하여 탱크의 외연을 기준으로 내부를 육면체 요소로 모델화하였다. 유동의 상태 방정식은 LNG에 대해서는 Polynomial을, 적재된 높이 이상의 영역 인 공기에 대해서는 아무 물성이 없는 것으로 정의한다. LNG의 물성치를 그대로 사용하며 아래와 같다.

LNG material:

Density                      Rho = 450 Kg/m3

Bulk Modulus  $K = 2.2e6 \text{ Kg/m}^2$   
 Gravity  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

해석시간은 주어진 탱크운동 주기가 탱크내 액체와 충분히 공진 할 수 있도록 120초간 수행하였다. Fig. 13은 적재율 50%의 초기 상태 자유표면을 나타내고, Fig. 14는 횡동요 운동하의 113sec 시의 탱크내 자유표면을 나타낸다.

슬로싱해석을 이용한 펌프타워 응력해석

강체 탱크모델에 의한 슬로싱 해석 결과에서 얻어진 압력 분포를 이용하여, 펌프타워의 응력 해석을 수행하였다. 120초간의 탱크 운동하에서 얻어진 최대 슬로싱 압력의 순간을 횡동요, 좌우동요 및 연성운동의 각 경우에 대해 Fig. 15, 16 및 17에 나타내었다. 동적 비선형 슬로싱 해석에 의한 최대 압력은 펌프타워 하부 근방에서 발생하며, 각각 횡동요 (1.04 bar), 좌우동요 (1.17bar) 및 연성운동 (1.23 bar)으로 나타내었다.

앞에서 구한 슬로싱 유동 해석에서는, 탱크 구조물이 변형하지 않는 강체 모델이므로, 펌프타워 등과 같은 구조물의 응력 및 변형 상태를 직접 구할 수는 없다. 하지만, 유체 영역에는 압력성분들이 존재하므로 펌프타워에 걸리는 하중을 추정할 수 있다. 이러한 압력을 Msc.Patran의 Field기능을 이용하여 Msc. Nastran의 정 압력 성분으로 변환하면 탱크구조물에 대한 응력 해석을 수행할 수 있다.

MSC.Patran 12.0.044 27-Mar-04 17:29:27  
 Fringe:MOSS137K,ROLL\_SWAY24A\_EULER\_ALL\_A3Cycle 95437,Time 113.001.FMATPLT,(NON-LAYERE

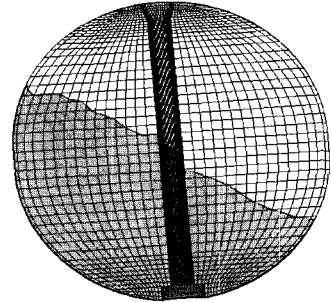


Fig. 14 LNG free surface behavior

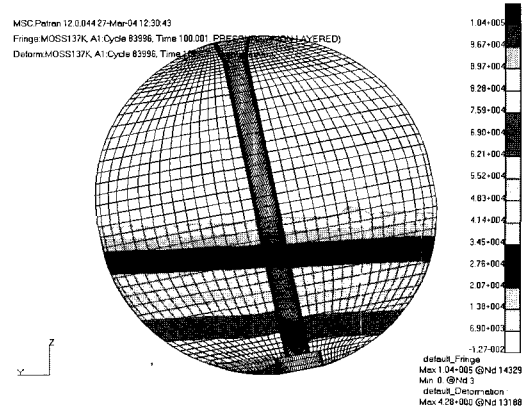


Fig. 15 Pressure distribution under Roll motion

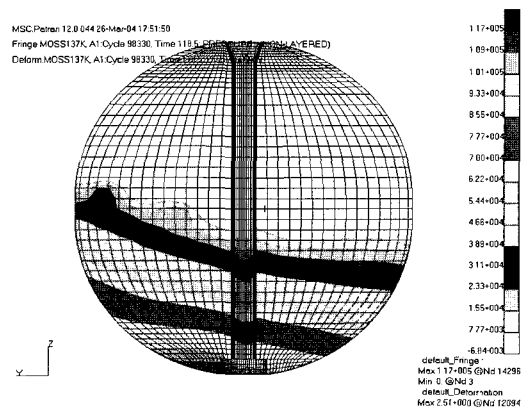


Fig. 16 Pressure distribution under Sway motion

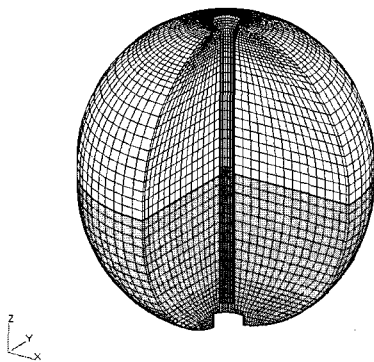


Fig. 13 Modelling of a spherical cargo tank

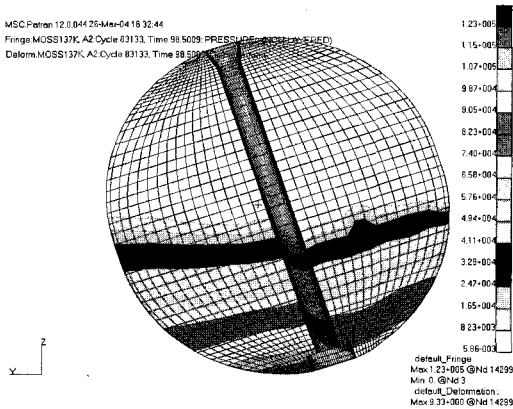


Fig. 17 Pressure distribution under Combined motion

- 1) 유동해석에서 최대 압력의 발생 시점과 분포를 결정한다.
- 2) 얻어진 압력분포를 응력해석을 위한 정압 성분으로 변환한다.
  - a) 펌프타워 근방의 유체 및 구조 모델
  - b) 유체모델이 가진 슬로싱 압력 성분
  - c) Msc.Patran Field에 의한 구조 모델에의 압력 성분
  - d) 정적 해석을 위한 정압 성분 (PLOAD4)
- 3) 정압에 의한 정적인 해석을 수행하여 구조물의 변형 및 응력을 평가한다.

Fig. 18에서 서술한 방법에 의하여 펌프타워 구조물의 응력 평가를 수행하여 얻어진 응력 성분을 Fig. 19에 각각의 탱크 운동에 대해 나타내었다.

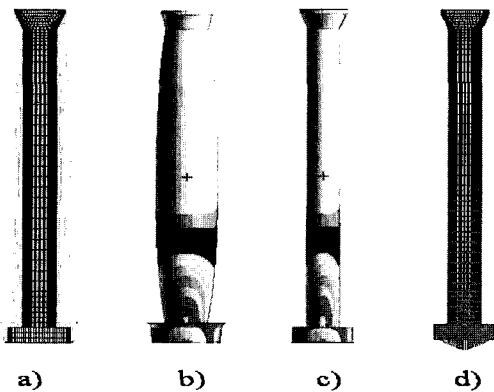


Fig. 18 Mapping process of the transient pressure for the static analysis

### 5. 결론

구형 LNG운반선의 화물창 내부의 펌프타워에 작용하는 구조응답을 파악하기 위하여, 2차원 LR.FLUIDS 프로그램을 이용하여 펌프타워 주위의 유동에 대한 해석을 통하여 유속을 계측함으로써 펌프타워의 응력분포에 대한 계산을 수행하고, 3차원 Msc.Dytran 프로그램을 이용하여 비교하였다. 계산된 결과값은 차이가 있으나, 현재 많이 사용하고 있는 LR.FLUIDS 프로그램은 펌프타워 위치에서 발생하는 최대 유체속도를 결정하여, 하중을 계산하고 구조해석을 하는 복잡하고 이상화된 절차되어 있어, 지나치게 보수적인 결과값을 제시하고 있다. 수치해석 방법에 의한 슬로싱 계산은 실험결과 등과 비교할 수 없기 때문에 정량적으로 정확한 것이라고 확실할 수는 없지만, Msc.Dytran을 이용한 유체의 유동해석으로 탱크내 슬로싱의 경향을 파악하는 데에는 큰 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 그리고 충격압력에 대한 해석의 기준이 최대압력만이 아니라는 사실은 반드시 명심해야 한다. 즉, 충격압력의 발생은 대단히 짧은 시간에 이루어지고 실험 뿐만 아니라 수치계산에서도 적용조건에 따라 심한 편차를 보일 수 있다. 따라서, 충격압력의 해석을 위해서는 압력의 시간별 과정, 즉 최대 압력값과 압력시간의 작용 등을 동시에 살펴 전체적인 경향이 어떤가를 관찰해 보아야 한

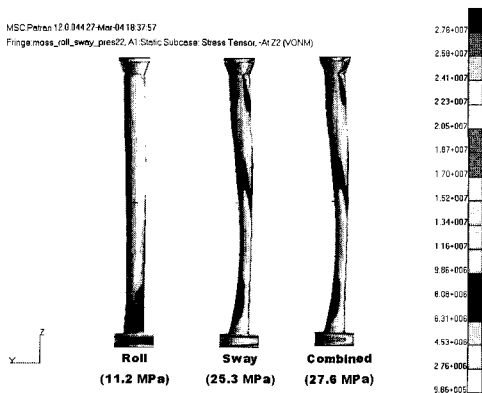


Fig. 19 Stress distribution by Msc.Nastran



다.

### 참 고 문 헌

- [1]Hyundai Heavy Industries Co., Ltd  
"135,000m3 LNG Carrier Structural Analysis",  
Report No TGG 00/13
- [2]Lloyd's Register of Shipping, "Ship Right:  
Structural Assessment Procedure – Sloshing  
Loads and Scantling assessment", 1996
- [3]Lloyd's Register of Shipping, "User's Manual  
for LR.FLUIDS", TPDD Report No 90/02
- [4]Keulegan, Carpenter, "'Forces on Cylinders  
and Plates in an Oscillating Fluid'", Journal of

Research of the National Bureau of Standards,  
Volume 60, No 5. May. 1958.

[5]The MacNeal Schwendler Corp. "MSC.Dytran  
User's Manual V2.1", USA, 1993



< 노 병 재 >