

# 전역-국부 해석기법에 의한 LNG 운반선 화물창의 유탄성 해석에 관한 연구

## Study on Hydroelastic Analysis of LNGC Cargo by Global-Local Analysis Technique

박 성 우†

조 진 래\*

Park, Seong-Woo

Cho, Jin-Rae

(논문접수일 : 2006년 1월 3일 ; 심사종료일 : 2007년 1월 22일)

### 요 지

대형의 유체-구조물 연계시스템(FSI) 해석을 위해 많은 수치기법들이 있지만, 유체의 슬로싱에 의해 발생하는 집중적이고 불규칙한 동수압의 영향 때문에, 신뢰할 수 있는 수치 결과와 수치안정성을 확보하기 위해 매우 조밀한 메쉬를 필요로 한다. 그 결과, 신뢰할 수 있는 장기적인 시간 응답을 구하기 위한 수치해석은 상당히 많은 CPU 시간을 요구한다. 본 논문의 목적은 국부 상세 모델을 이용하여 LNG운반선의 화물창 시스템의 유탄성적 거동을 해석하기 위한 전역-국부 해석기법을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제시한 해석기법의 타당성을 증명하고 이 기법을 통해 LNG운반선 화물창 시스템의 국부 응답을 효율적으로 예측한 결과를 제시하였다.

**핵심용어** : LNG운반선 화물창, 유탄성 해석, 전역-국부 해석기법, 유체-구조물 상호 연계, 슬로싱, 유한요소 해석

### Abstract

There are many numerical methods to solve large-scale fluid-structure interaction(FSI) problems. However, these methods require very fine mesh to achieve the reasonable numerical accuracy and stability due to the concentrated and volatile hydrodynamic pressure caused by the liquid sloshing. Consequently, the numerical analysis targeting for the long-period time response with the desired numerical accuracy is very highly time-consuming. The aim of this paper is to suggest a new method to analyze the hydroelastic behavior of the LNGC containment by using the global-local numerical approach. The reliability of the presented method is firstly examined, and then its efficiency is demonstrated by presenting that the long-period local responses of the LNGC containment are obtained with relatively short CPU time.

**Keywords** : LNGC containment, hydroelastic analysis, global-local numerical approach, fluid-structure interaction, sloshing, finite element analysis

### 1. 서 론

유체를 포함하는 대형 구조물의 대표적인 경우로 액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas) 운반선의 저장 탱크가 있다. 이런 구조물에는 구조물 자체의 운동에 의한 요동이나 저장·운반형 선박의 해상 운항 중에 해상 조건에 의한 영향 등의 외부 가진에 의해 발생하는 저장 탱크 내부에 포함되어 있는 액체 연료의 자유표면의 출렁거리는 현상, 즉

슬로싱(sloshing)이 발생한다(Cho *et al.*, 2000). 이러한 유체의 슬로싱이 발생. 진행됨에 따라 저장 연료의 공진 주파수에 접근하게 되면 슬로싱은 더욱 심화되며 이는 저장 탱크의 구조적 안정성에 치명적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 운항 안정성의 상실에 까지 이를 수 있다. 특히 LNG 운반선의 경우에는 선박의 상당 부분이 저장 탱크로 이루어져 있으며, 만선의 경우 저장 탱크 대부분에 유체 상태로 저장되고 있기 때문에 연료 탱크 등의 구조물이 슬로싱에 의한 동적 거동의

† 책임저자, 학생회원·부산대학교 공과대학 기계설계공학과 석사과정  
Tel: 051-510-3206 ; Fax: 051-514-7640

E-mail: shyalle@pusan.ac.kr

\* 부산대학교 공과대학 기계공학부 정교수

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 4월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

영향을 더욱 크게 받을 뿐 아니라 저장 탱크의 구조적 결함이 발생할 경우에는 엄청난 환경적·인명적 손실을 발생시킬 수 있다. 이러한 상황을 미연에 방지, 영향의 최소화을 위해서는 유체의 동적 거동과 그에 대한 구조물의 거동에 대한 정확한 해석이 필요로 하게 된다(Okamoto 등, 1990).

유체 매체와 접촉하고 있는 탄성체의 동특성은 탄성체만의 해석과 근본적인 차이가 있으며, 유체에 의한 동압이 구조물에 작용하고 그로 인해 구조물이 연계적으로 변형하게 된다. 이러한 구조물의 변형은 다시 유체 영역의 흐름과 압력을 변화시킨다. 따라서 구조물과 유체는 하나의 연계 시스템으로 간주되어야 하며, 이는 단일 연계 시스템으로 해석적인 방법으로 처리하기가 매우 어렵다. 이러한 유체 슬로싱의 정확한 동적 특성에 대하여 분석하고 다양한 형상의 유체-구조물 연계해석에 의한 구조물의 거동 및 전체 제어시스템에 대한 영향을 예측하기 위해 제시된 여러 수치 해석 기법이 있는데, 여기에는 임의의 형상 내에서 발생하는 대변형의 슬로싱 거동을 적절하게 평가하기 위한 수치해석 기법으로 FEM, BEM 등을 이용한 연계 수치해석 방법이 주로 적용되었으며, 부가질량법(Cho et al., 2001), Euler 및 Lagrange법(Yamamoto 등, 1999) 등이 제안되었으며, 또한 3차원 대변형 슬로싱 거동에 대한 분석을 위해 이용되는 ALE 기법(Soulaimani 등, 1998) 등이 있다.

본 연구에서는 LNG 운반선이 운항시, 운반선 내부의 액화 천연가스 저장 탱크에 발생하는 유탄성 슬로싱 해석을 위한 방법으로 국부 상세 모델을 사용하여 슬로싱의 동적 거동을 관찰한다. 특히 이 방법은 장기적인 시간 응답을 관찰하는 것이 아니라 유체 슬로싱에 의한 구조물에 미치는 영향이 임계시점일 때 구조물의 거동을 관찰하는 방법으로써, 단순화된 셸(shell) 구조의 강체 구조물 내에서의 유체의 거동에 대하여 선행적으로 해석을 하고, 임계 시점에서의 유체의 상태(밀도, 유체 속도, material fraction 등)를 초기조건으로 입력하여 구조물의 거동을 보고자 하는 국부 영역에 상세화 모델링된 모델을 적용하여 그 시점에서의 응답을 관찰할 수 있게 된다. 이에 앞서 임계시점에서의 유체 상태를 입력하여 해석을 하는 경우 해석의 정도에 미치는 영향에 대하여 평가가 되어야 한다. 이를 위해서 과도 응답 해석과 슬로싱의 가시화가 가능한 상용 프로그램인 MSC/Dytran을 사용하였다. 이는 구조물 해석에 대해서는 Lagrangian 근사화 기법을 적용한 유한요소법을 사용하며, 유체의 경우 Eulerian 근사화 기법을 적용한 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용한다. 유체-구조물 연계 해석을 위해 라그랑지 요소(Lagrangian element)와 오일러 요소(Eulerian element)를 함께 사용하고, 연계면(coupling surface)을 정의함으로써 해석이 가능하게 된다. 여기서 연계

방법은 일반 연계법(general coupling)과 ALE coupling 기법을 제공한다. 또한 비선형 문제의 수치해를 구하는데 적합한 explicit 시간이산화 방법으로 중앙차분(central difference)법을 적용하며, 안정적인 해의 수렴을 위해 내부적으로 time-step의 크기를 결정한다.

이를 이용하여 본 논문에서 제시되는 해석 방법의 타당성에 대한 검증을 거친 후, LNG 운반선의 화물창 종류 중에서 MARK-III 타입 모델에 대한 국부 상세 모델을 이용하여 유체 슬로싱에 의한 LNG운반선 화물창의 유탄성적 거동에 대한 동응답을 해석하였다. 이를 통해 대형 유체-구조물 연계 시스템의 유탄성 거동을 시간·계산 비용을 효과적으로 저감시키면서도 정확하고 효율적으로 분석할 수 있음을 확인하였다. 해석을 위한 전·후처리는 MSC/Patran을 사용하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 연계 기법

일반 연계(General Coupling) 기법에서 연계면은 Fig. 1과 같이 임의의 형상을 가질 수 있으며, 라그랑지 격자는 오일러 격자의 경계로써의 역할을 담당한다. 오일러 격자 속에 라그랑지 격자가 겹쳐서 존재할 수 있으며, 연계면(coupling surface)은 반드시 폐공간(closed volume)을 이루어야만 한다. 연계면의 운동으로 인해 작아진 오일러 요소의 처리를 위한 blending 계산을 거쳐야 하므로 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. MSC/Dytran에서는 오일러 격자와 라그랑지 격자의 연계 기법으로 일반 연계 기법이 지원된다.

ALE 연계(ALE coupling) 기법은 일반 연계법에 비해 계산시간 측면에 있어서 상당한 이점이 있으며, 적은 수의 오일러 격자라도 충분한 해석이 가능하며, 효과적이고도 정확하게 연계효과를 표현한다. 그러나 구조물의 변형이 완만하여 오일러 격자가 구조물의 움직임을 충분히 따라갈 수 있어야 하는

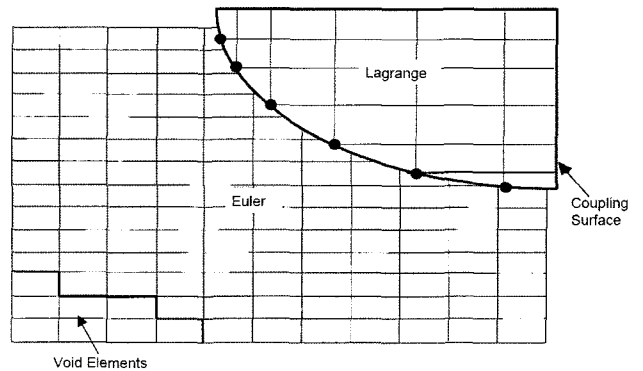


Fig. 1 General coupling

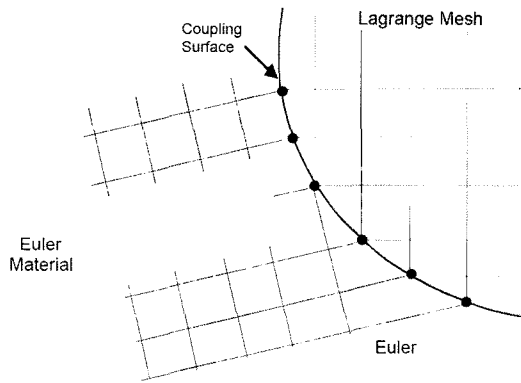


Fig. 2 ALE coupling

등 단순형상 모델에 한정된 경우의 문제에만 사용할 수 있다. Fig. 2와 같이 ALE 기법에서 유체-구조물 경계면, 즉 연계면에서 오일러 격자의 움직임은 구조물의 움직임을 따르며, 내부 오일러 격자의 지나친 변형을 방지하고 균질성을 유지하기 위해 내부 오일러 격자는 ALE 운동 알고리즘에 의해 변형 또는 조정된다. MSC/Dytran에서는 오일러 격자와 라그랑지 격자의 연계 기법으로 ALE 연계 관계를 반영한 ALE 연계 기법이 지원된다.(MSC. Software Corporation, 2004).

### 2.2 ALE 연계 동해석 기법

ALE 방법은 Lagrange 기법과 Euler 기법의 수치해석상의 장점을 수용하여 격자 영역은 물질 영역과 동일하며 경계의 운동은 물질의 운동과 일치할 뿐만 아니라, 전체 격자 또한 계산 수행동안 균일하게 유지된다. ALE 정식화는 Lagrange 영역과 Euler 영역, 그리고 수치 계산상의 격자 영역인 임의의 참조 영역의 세 가지의 공간 영역을 포함한다. ALE 기법으로 재정의된 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같이 표현되어 진다(Cho 등, 2003).

$$v_{i,i} = 0, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + (v_j - \widehat{v}_j)v_{i,j} - \frac{1}{\rho_F} \tau_{ij,j} = g_i, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (2)$$

여기서 응력텐서는

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

식 (3)과 같다.  $v$ 는 참조좌표계에서의 유체의 속도이며,  $\rho_F$ 는 유체의 밀도,  $f_i$ 는 중력,  $p$ 는 압력, 그리고  $\mu$ 는 점성계수이다. 유체는 공간 영역  $\Omega_F$ 를 차지하고 있고, 자유표면 경계는  $\partial\Omega_F^S$ 로, 구조물과 접하는 경계는  $\partial\Omega_I$ 로 나타낸

다. 각 경계조건은 식 (4), (5)와 같다.

$$v_i = \widehat{v}_i, \quad \text{on } \Omega_I \times (0, T] \quad (4)$$

$$\sigma_{ij}n_j = \widehat{t}_i, \quad \text{on } \partial\Omega_F^S \times (0, T] \quad (5)$$

식 (2)의 운동방정식의 시간 적분은 대류항의 존재로 인해 수치해석 시 많은 어려움이 따른다. 여기서 대류항 처리를 위해 이단계 분리기법(two phase operator split)이 사용됐으며, 이 방법은 먼저 Lagrange 단계가 수행된다. 참조좌표계는 물질좌표계와 일치( $\widehat{v} = v$ )하게 되고, 따라서 식 (2)에서 상대속도는 0이 되므로 식 (6)과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial v_i^L}{\partial t} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij,j} + f_i \quad (6)$$

$\widehat{v} = 0$ 인 경우 Euler 기법으로 전환될 수 있다. 일반적으로 ALE 기법에서는 주어진 문제의 특성에 따라 격자운동을 적절하게 제어하여 참조좌표계가 임의의 독립적인 운동을 하게 한다.

한편, Lagrange 계산 후 Euler 단계가 수행되며, 먼저 격자 형상이 과도하게 변형된 경우, 적절한 격자 운동 알고리즘을 통해 격자 재구성이 이루어지고, 격자는 임의의 속도를 가지게 되고 식 (7)과 같이 정리된다. 따라서 상대속도에 의한 대류항을 고려하여 Lagrange 계산에서의 결과를 새로운 격자계로 변환 혹은 맵핑(mapping)이 이루어져야 한다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j}^L = 0 \quad (7)$$

### 3. 전처리 과정

#### 3.1. 유체 초기 정의

본 연구에서는 서두에서 언급한 것과 같이 LNG운반선의 화물창 단열층을 셀 구조로 단순화한 강체 탱크 모델을 구성을 하고, 내부 유체인 LNG를 동일한 저장 조건으로 하여 롤링 운동이 지배적인 선박 운항 조건에 상응하는 운동 조건을 부여하여 슬로싱 해석을 한다. Fig. 3을 참고하여 전역 모델인 강체 탱크의 슬로싱 해석을 통해 산출되는 결과물 중에서 유체의 동적 거동을 나타내는 유체의 상태(밀도, 유체 속도, material fraction, 등)에 대한 결과를 얻어, 전역 모델의 임계시점으로 판단되는 시점의 결과를 국부 모델의 유체 영역에 사상(mapping)하여 유체 초기 조건으로 사용한다. 이를 위해서 전역 모델의 임계 결과를 사상하기 위한 서브루틴

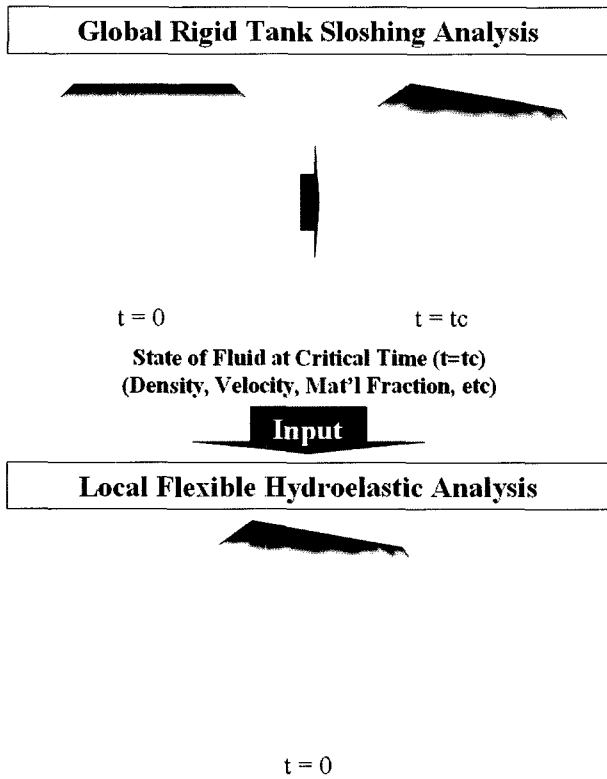


Fig. 3 Procedure of global-local analysis

를 작성하고, 사상된 유체의 결과를 바탕으로 하여 임계시점에 해당하는 구조물의 위치 및 운동조건, 각종 경계조건과 서브루틴을 이용하여 입력받은 유체 초기 조건을 정의하여 임계시점으로 판단되는 시점에 대하여 보다 상세화 된 해석을 할 수 있게 된다.

여기서 제시된 방법은 유체의 거동이 실제 구조물의 변형에 영향을 주고 이러한 영향을 다시 유체의 유동에 영향을 받는 구조-유체 상호 연계 관계와 달리 구조물의 강체로 정의하여 유체의 유동이 구조물의 변형에 영향을 받지 않는다는 가정 하에서 선행 해석이 이루어지는 것이기 때문에 약간의 수치적인 오차를 내포하고 있지만, 이러한 수치적 오차를 감안하더라도 원하는 지점에서의 국부적이고 상세화 된 모델을 임계시점에서 해석함으로써 보다 정확한 유체의 영향에 따른 구조물의 동적 거동을 효율적으로 평가할 수 있다.

### 3.2. 타당성 평가

LNG운반선의 화물창을 간단한 형상의 강체 셀 구조로 모델링한 모델을 이용하여 강체 탱크에서의 슬로싱 해석을 수행한다. 여기서 얻어지는 결과를 서브루틴으로 입력받아서 그 시점의 유체의 상태를 유체의 초기조건으로 하여 해석을 수행한다. 그리고 이 해석을 수행 결과와 원래 결과와 비교하기 위하여 초기의 강체 탱크 슬로싱 해석의 결과와 비교함

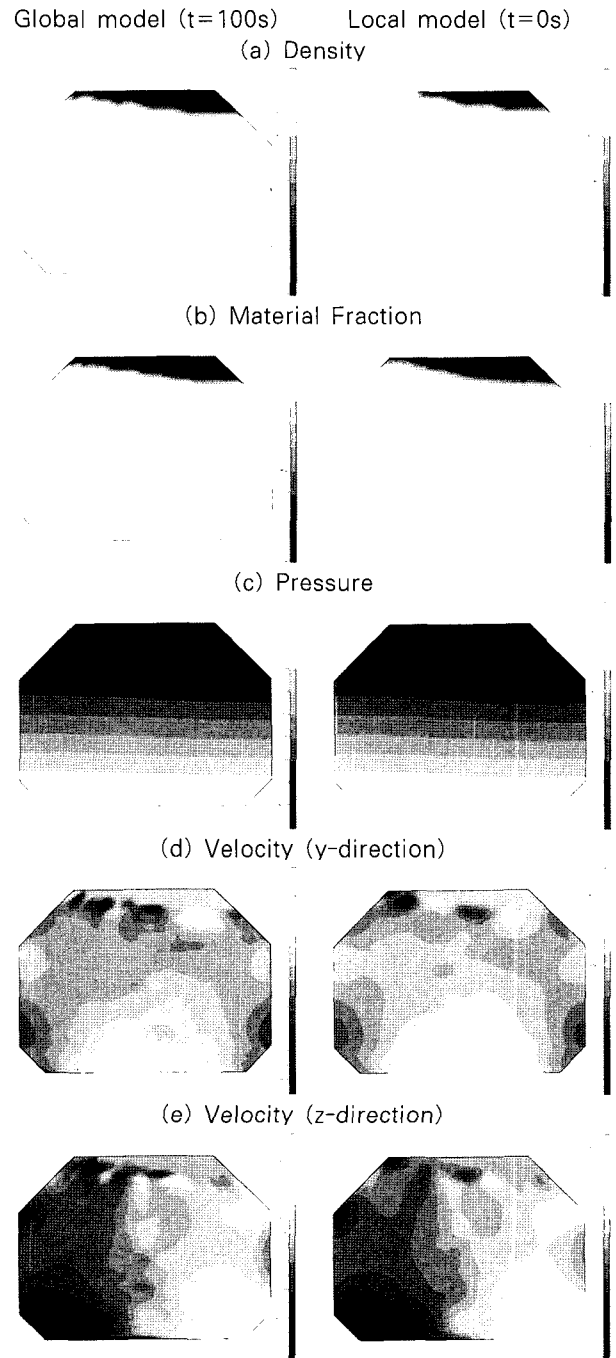


Fig. 4 Results of global and local analysis

으로써 해석 방법의 타당성을 평가한다.

해석 시간은 총 100초 이상으로 하고, 두 가지 해석을 수행한다. 여기서 100초라는 시간을 정한 것은 임계 시점을 100초라는 가정 하에서 해석을 수행한다. 우선, 첫 번째 경우 (Case 1)는 강체 탱크 슬로싱 해석을 0초에서부터 200초까지 해석하는 경우이고, 두 번째 경우(Case 2)는 100초 시점에서의 유체의 상태를 초기조건으로 입력 받아 0초에서부터 100초까지 해석하는 경우이다. Case 2는 실제로는 100초 시점에서의 유체의 상태를 입력 받아 0~100초까지의 해

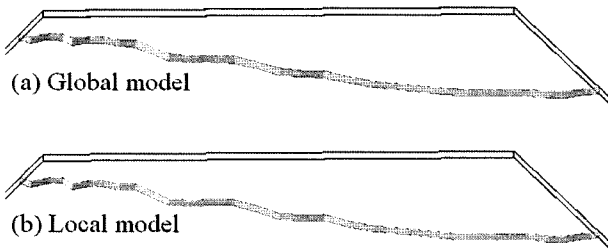


Fig. 5 Comparison of free surface of global and local model

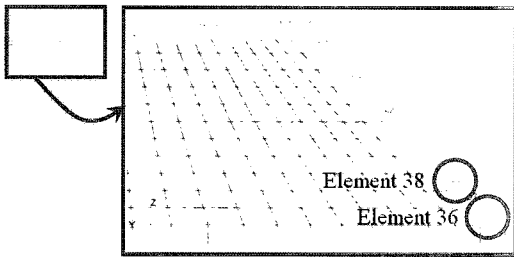


Fig. 6 Location of element 36 and 38

석하는 것이므로 실제로는 0~200초까지의 해석을 수행하는 것과 같으며, Case 1의 결과에서 입계 시점인 100초 이후 시점에서의 결과와 비교함으로써 본 해석 방법의 타당성 평가를 할 수 있다. 특히 Case 2의 초기조건에는 유체의 초기조건 뿐만 아니라 구조물의 위치 및 운동 상태를 Case 1의 입계 시점 100초에 해당하는 위치 및 운동 상태와 동일한 조건으로 정의 한다.

정의된 운동 조건을 바탕으로 선행해석을 수행한 결과 Fig. 4에서와 같이 Case 1의 100초와 Case 2의 0초에서의 나타나는 주요 결과를 비교할 수 있다. 가시화된 결과의 비교를 위해서 Case 1과 Case 2의 스펙트럼을 동일한 구간으로 고정하였다. 각 Case의 밀도, 유체 속도, material fraction 등을 비교해보면, 밀도와 유체 속도 결과에서 약간의 오차가 발생하고 있으나, 이는 상세화 모델 해석의 효율성 및 계산 시간 비용 감소 측면에서 감안할 수 있는 정도의 오차로 판단된다. 또한 Fig. 5에서 보는 것과 같이 Case 1의 100초와 Case 2의 0초에서의 material fraction이 0.5인 지점을 나타내는 자유표면(free surface)을 비교해 보면 거의 동일한 결과를 나타낸다.

Fig. 6에서와 같이 지정된 지점의 요소인 36번, 38번 요소가 받는 압력값을 전역 모델(global model)과 국부 모델(local model)에서의 분포를 Fig. 7과 Fig. 8에서와 같이 나타내었다. 입계 시간(100초)를 기준으로 하여 Local 모델의 지정된 요소에서 발생하는 압력값은 초기부터 약 5초간 국부 시점에서 큰 오차를 나타내지만 그 이후 시간대부터는 거의 동일한 압력 결과값을 나타내고 있다.

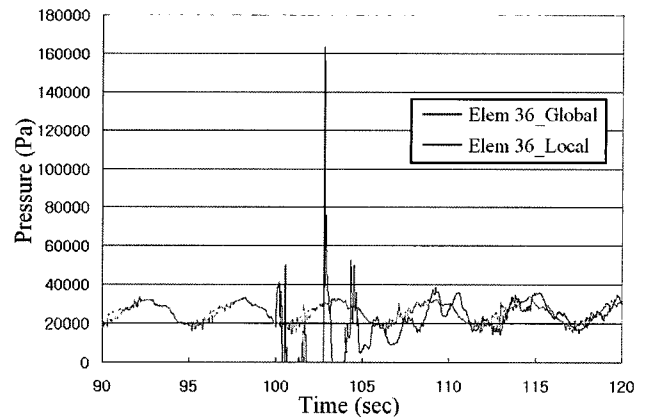


Fig. 7 Comparison of pressure at element 36

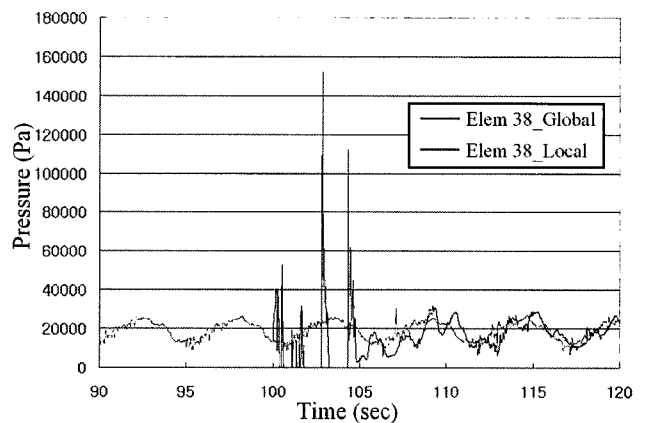


Fig. 8 Comparison of pressure at element 38

이와 같이 여기서 발생하는 수치 오차는 Case 1의 입계 시간에서의 유체에 대한 결과를 Case 2의 유체 초기 조건으로 사상시키고, Case 1의 운동 위치와 운동 상태를 Case 2에 정의하는데 이는 정지 상태에 운동 상태를 정의하여 발생한 구조물의 오차로 이러한 오차는 본 전역-국부 해석 기법을 이용한 대형 유체-구조물 연계 문제에 대한 접근에서 부차적인 모델의 사용 등의 방안을 통해 구조물에서 발생하는 수치적 오차를 저감시킬 수 있다. 또한 본 전역-국부 해석 기법은 대형 유체-구조물 연계 시스템의 국부적 거동 및 응답에 대한 관찰이 효율적인 해석 시간으로 가능하게 함은 물론 내포하고 있는 수치 오차는 여러 방안들로부터 저감이 가능하기 때문에 이 기법의 효율성 및 타당성이 입증된다.

## 4. 해석결과

### 4.1. 해석 모델

전처리 해석 방법에 대한 타당성이 입증되고, 이 해석 방법을 이용하여 전처리 해석 단계에서는 Fig. 9와 같은 강체 셀 구조의 강체 탱크를 구성하여 선박의 운동 조건에 따른 강체

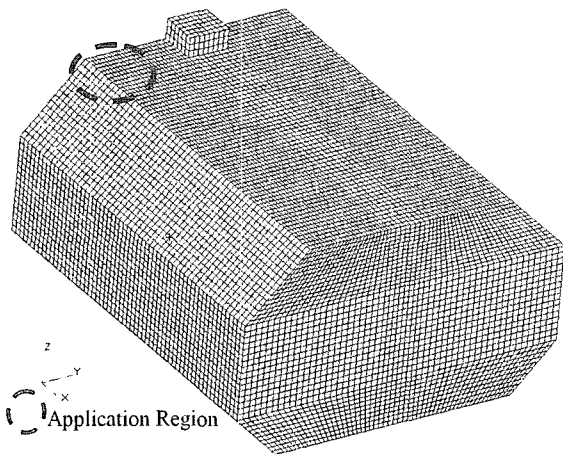


Fig. 9 LNGC cargo model and location of local model

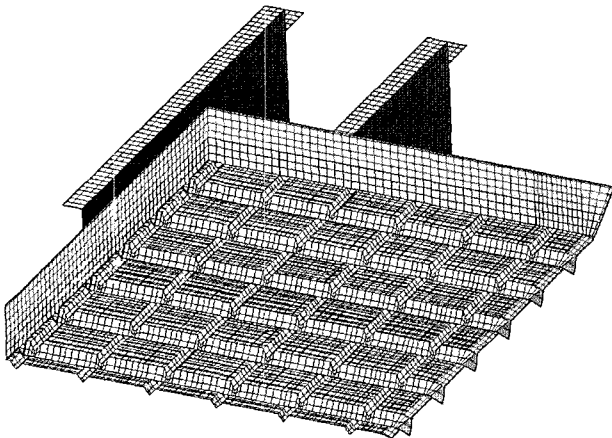


Fig. 10 Local flexible model

슬로싱 해석을 수행한다. 이와 같은 전처리 해석을 통해서 강체 슬로싱 해석의 임계 시점으로 판단되는 임계 시각에서의 유체의 거동을 초기 조건으로 적용하여 국부 상세화 모델링된 LNG 운반선의 화물창 단열층에 대한 유탄성 해석을 수행하게 된다. 전처리 과정에서 언급한 것과 같이 내부 유체인 LNG를 동일한 저장 조건(저장 높이) 상태로 롤링 운동이 지배적인 선박 운항 조건에 상응하는 운동 조건을 부여 한다. 여기서 임계 시점에서의 유체의 동적 거동을 나타내는 유체의 상태(밀도, 유체 속도, material fraction 등)를 초기 조건으로 사용한다. 또한 MARK-III 타입의 LNG 운반선의 화물창의 경우 내부 유체의 슬로싱에 의해 전체 구조물 중에서 Fig. 9에서 표시된 지점과 같은 지점에 집중 하중과 같은 형태로 구조물에 영향을 미치기 때문에 이와 같은 지점을 임계 지점으로 지정하여 해당하는 MARK-III 타입 LNG 운반선의 화물창 단열층 구조를 Fig. 10과 같이 상세화 모델링하여 해석 모델로 정의한다. Fig. 10에서는 단열층의 최내곽(最內郭) 부분인 주름(corrugation)을 가진 Membrane부터 Membrane을 고정시키는 Anchor strip이 위치하며, 그 다음으로 상부

Plywood가 위치한다. 상부 Plywood는 상부 R-PUF와 접착제로 부착 되어 있으며, 상부 R-PUF와 하부 R-PUF 사이에 Triplex가 각각 접착제로 부착되어 있으며, 하부 R-PUF 하부에는 하부 Plywood와 접착되어 있으며, 하부 Plywood와 내부 Hull(inner hull) 사이에는 Mastics가 위치하게 된다. 이와 같이 Membrane, Plywood, R-PUF, Triplex, Mastics, Inner Hull 부분 등이 실물 모델과 최대한 동일하게 상세화 모델링되어 임계 시각에서의 응답을 살펴보게 될 화물창의 임계 지점 단열층을 구성하게 된다.

전처리 해석에서 얻은 유체의 결과를 초기 조건으로 사용하고, 전처리 해석에서 임계 시각으로 지정된 시점에서부터의 운동 조건을 상세화 모델링 된 구조물에 적용하여 동일한 운동조건을 부여한다. 이를 통해 임계 지점에 대하여 임계 시점에서 해석을 수행하게 된다. 또한 여기서는 전체 구조물에 대한 해석이 아닌 국부 모델에 대한 해석이기 때문에 전처리 해석에서 사용한 ALE 연계 방법이 아닌 일반 연계 방법(general coupling method)을 사용한다. 이를 위해서 국부 상세화 모델을 구성하는 단계에서 일반 연계 방법을 사용하기 위한 연계면(coupling surface)으로 강체 셀 요소를 사용한 모델을 함께 구성한다. 구성된 강체 셀 모델과 함께 국부 상세화 모델링 된 단열 구조의 최내곽에 해당하는 Membrane을 전체 연계면으로 정의한다.

#### 4.2 수치 해석 결과 및 고찰

LNG 운반선의 화물창의 단열층에 대한 동적거동을 파악하기 위하여 전처리 해석을 통해 얻어진 유체의 거동을 초기 조건으로 입력 받고, Fig. 11과 같이 x축 방향에 대한 회전 운동이자 선박의 지배적인 운동 상태인 횡요동(rolling)운동을 Fig. 12와 같은 시간에 따른 각속도(angular velocity) 운동 조건을 부여하여 강체 슬로싱 유탄성 해석을 하였다. 또한 여기서 유체의 임계 시점 근방에서의 결과를 입력 받아 해석을 함으로써 거동을 관찰하고자 하는 임계 시점의 구조

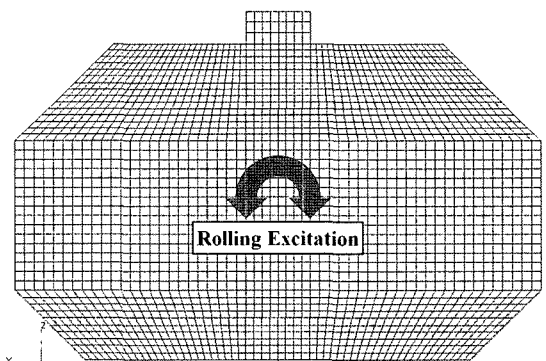


Fig. 11 Rolling excitation of LNGC cargo

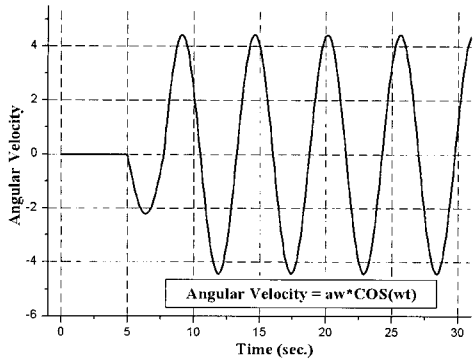


Fig. 12 Angular velocity field

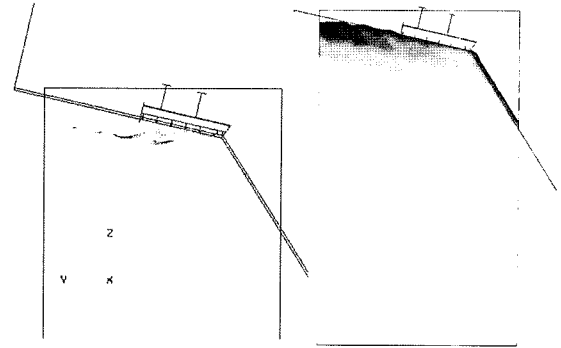


Fig. 13 Free surface and material fraction at critical time

물의 거동을 파악하였다.

본 연구에서 앞서 정의된 운동 조건 및 경계 조건에 의하여 해석을 수행한 결과로 전처리 해석에서 임계 시각 근방으로 판단하는 시점에서의 유체 상태를 입력하여 임계 시점으로 판단되는 시점에 대한 LNG 운반선의 화물창 내부의 유

체, 즉 LNG의 자유표면(free surface)과 material fraction을 Fig. 13에서와 같이 나타내었다. 임계 시점에 대한 선정은 Fig. 13에서 보는 것과 같이 국부 상세화 모델이 적용된 임계 지점에 대하여 유체, 즉 LNG가 직접적으로 영향을 미치기 시작하는 시점으로 한 것이며, 이는 Fig. 13을 통

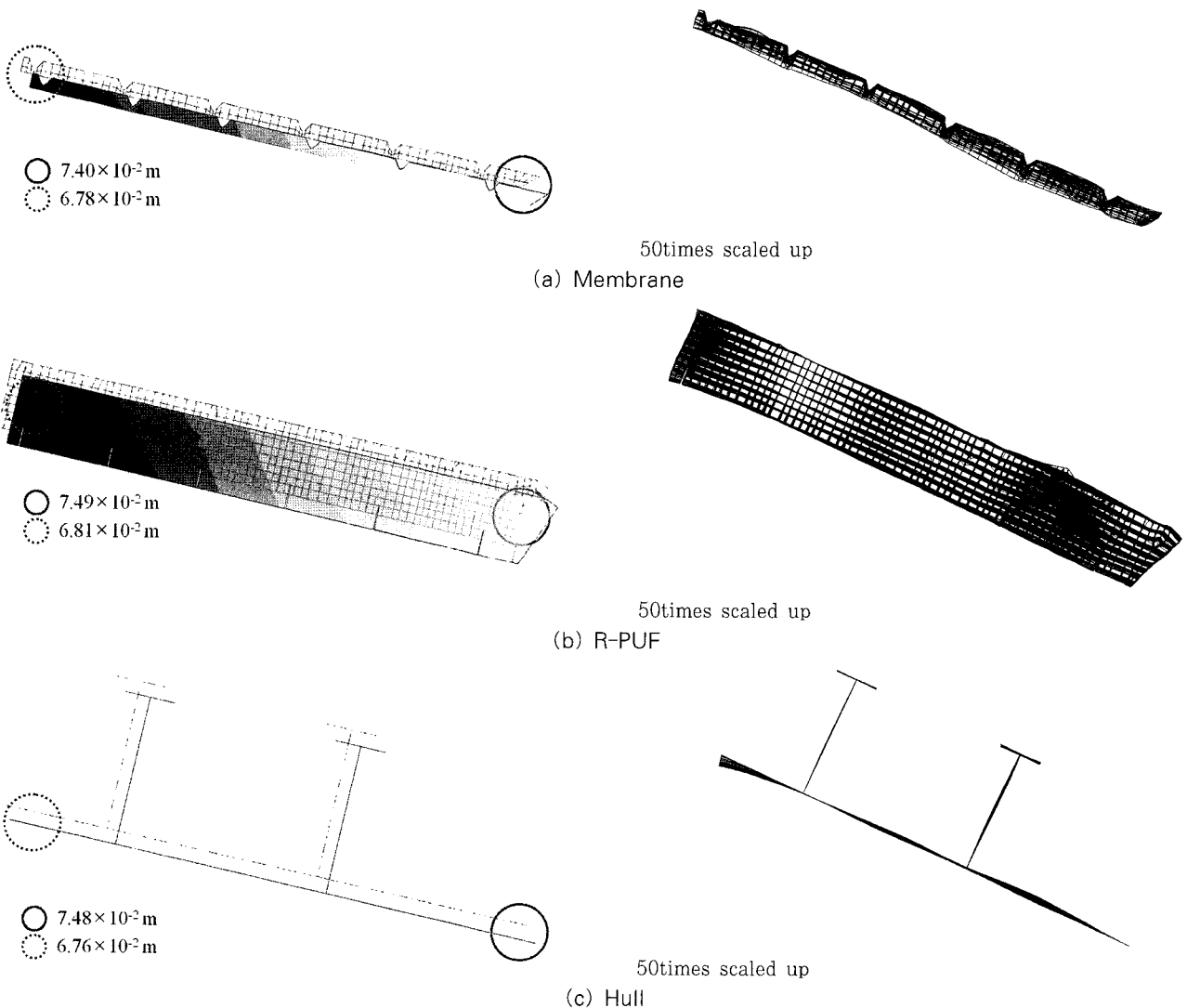


Fig. 14 Deformed shapes at critical time

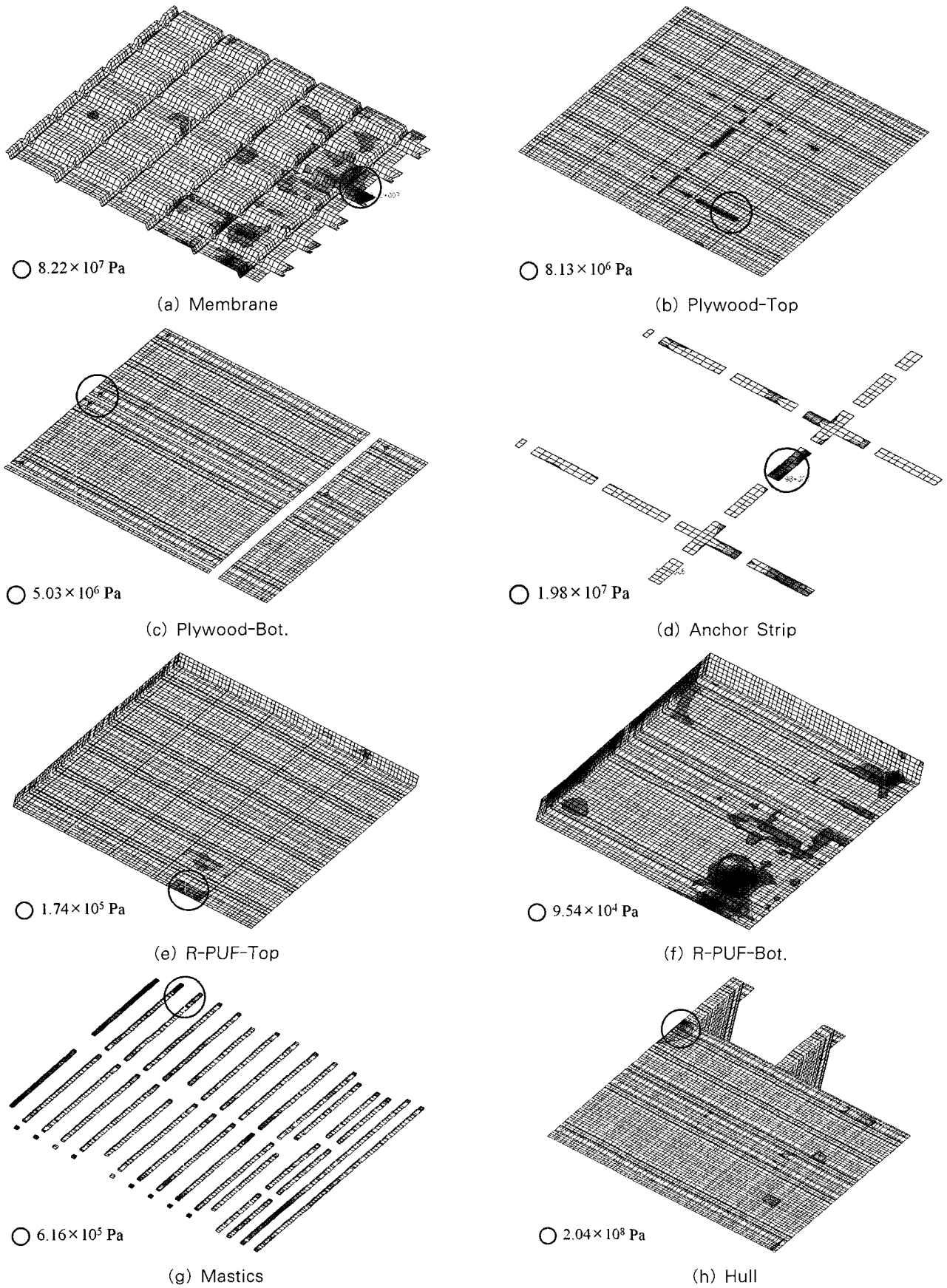


Fig. 15 Stress distributions obtained by the local model locally detailed model



해 확인할 수 있다.

이와 같이 선박의 롤링 운동 조건에 따라 내부 유체의 슬로싱이 발생하고 이로 인하여 임계 시각으로 판단되는 시점에서 임계 지점의 상세화 모델링된 단열층이 유체와 직접적인 접촉이 발생하게 될 시점의 내부 유체의 영향이 가장 클 것으로 예상하고 구조물의 거동 및 응답을 관찰하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

화물창의 각 단열층 중에서 주요 부분인 Membrane과 R-PUF, Hull에서의 거동을 임의의 임계 시각에서 나타낸 결과를 Fig. 14와 같이 정리하였다. 각 부분에 대한 결과의 오른쪽 그림은 전처리 해석을 통해 얻은 유체 상태의 입력 시점부터 임계 시점까지의 운동한 거리와 구조물의 변형에 의해 발생한 총 변형량을 나타낸 것이며, 왼쪽 그림은 변형을 50배 왜곡하여 주요 변형이 발생하는 지점에 대하여 확인하였다.

화물창의 각 단열층에서 나타나는 임의의 임계 시각에서의 등가 응력 분포를 Fig. 15에서 정리하였다. Fig. 15의 (a)와 같이 단열층의 최내곽 구조인 Membrane의 거동 및 응력 분포 뿐만 아니라 (b), (c)와 같이 단열층의 위치에 따른 Plywood의 거동 및 응력 분포를 확인 할 수 있으며, (d), (h)와 같이 Anchor strip, Hull 부분에서의 거동 및 응력 분포도 확인 할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 단열층에 대한 상세화 모델의 경우, Membrane, Plywood, Anchor strip, Hull 등은 모두 2차원 쉘 요소를 사용하여 모델링 되어 있기 때문에 응력에 대한 응답은 중립면(mid-surface)에서의 결과를 산출하였다. 뿐만 아니라 (e), (f), (g)와 같이 3차원 라그랑지 요소를 사용하여 모델링 된 R-PUF와 Mastics 부분의 경우도 각각의 거동 및 응력 분포를 확인 할 수 있으며, 응답을 관찰하고자 하는 시점의 각 단열층에서의 최대 응력 발생 지점 및 최대 변형 지점 등을 확인할 수 있다.

여기서 Fig. 13~15에서 나타난 결과는 과도응답해석의 특정 시각(임계 시각)에서의 응답만을 관찰한 결과로, 이 뿐만 아니라 과도응답 해석을 통해서 시간에 따라 단열층의 각 부분에 나타나는 거동, 응력의 분포, 내부 유체와 직접적인 접촉이 발생하는 최내곽부인 Membrane의 표면에서 발생하는 시간에 따른 압력 분포 등도 함께 확인할 수 있다.

따라서 전처리 해석을 통한 임계 시점의 결과를 이용한 유탄성 해석 기법은 대형 유체-구조물 연계 시스템의 국부적인 거동을 파악하는데 시간적 효율 측면에서 가치 있는 해석 방법이 될 수 있다. 비록 임계 시점의 결과를 사용하는데 있어서 해석 초기에 응답의 오차가 발생하지만 이는 정지 상태의 구조물을 운동상태의 구조물로 정의하는데 있어서 발생하는

오차이며, 이 부분에 대한 검토를 통해 응답 오차 부분은 충분히 보완될 수 있다. 비록 상용 해석 프로그램을 사용한 해석 기법이지만 대형 유체-구조물 연계 시스템의 유탄성 해석을 위한 기법으로 효용성에 대한 가치는 충분하다고 생각된다. 본 연구에서 제시된 해석 기법이 보다 효용성을 갖기 위해서는 앞서 밝힌 것과 같이 해석 초기의 응답 오차를 저감할 수 있는 방안을 마련해야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 대표적인 대형 유체-구조물 연계 시스템인 LNG 운반선의 화물창 단열층에 대한 국부적인 유탄성 해석 기법 소개하였다. 이 해석 기법은 우선 전처리 해석 단계에서 강체 슬로싱 해석으로 임계시점의 유체의 거동을 획득한다. 획득된 결과를 사용하여 임계 지점으로 판단되는 지점에 대한 국부 상세화 모델에 적용한 유탄성 해석을 수행한다. 이를 통해 구조물의 내부 유체의 영향에 따른 구조물의 거동이 어떻게 나타나는지 파악한다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 전처리 해석을 통해 얻은 임계 시점에서의 유체의 거동을 나타내는 결과를 사용했을 경우, 각 결과가 완전히 동일하게 반영되지는 않았으나 비교적 근사하게 반영되었으며, 이를 통해 임계 시점의 유체 응답을 획득하기 위한 전처리 해석 방법의 타당성을 확인하였다.

(2) 타당성이 입증된 전처리 해석 방법을 사용한 국부 상세화 모델의 유탄성 해석 결과, 해석 초기에 응답 오차가 다소 발생하였으며, 이는 정지상태의 구조물에 운동상태의 구조물의 운동조건을 부여하여 발생한 오차로 판단되며, 이와 같은 오차 발생을 저감시킬 수 있는 방안이 필요하다.

(3) 임의의 임계 시점에서의 유체 응답을 사용하여 LNG 운반선의 화물창 단열층에 대한 국부 상세화 모델의 유탄성 해석을 통해서 각 단열층의 거동 및 응답을 파악하였으며, 이를 통해 본 연구에서 제시된 방법을 보다 보완하여 다른 대형 유체-구조물 연계 시스템의 임계 국부 지점의 응답을 효율적으로 파악하는데 유용하게 활용될 수 있으며, 해석 시간의 효율성도 획기적으로 향상시킬 수 있다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Cho J. R., Lee S. Y.** (2003) Dynamic Analysis of Baffled Fuel-Storage Tanks using the ALE Finite Element Method, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 41(2), pp.185~208.
- Cho J. R., Song J. K., Park S. H., Lee J.N.** (2000) Free Vibration Analysis of above Ground LNG-Storage Tanks by the Finite Element Method, *KSMIE International Journal*, 14(6), pp.633~644.
- Cho J. R., Song J. K., Lee J. K.** (2001) Finite Element Techniques for the Free-Vibration and Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks, *Finite Elements in Analysis and Design*, 37(6-7), pp.467~483.
- MSC.Software Corporation** (2004) *MSC.Dytran Theory Manual version 2005*, MSC.Software Corporation, Santa Ana.
- Okamoto T., Kawahara M.** (1990) Two-dimensional Sloshing Analysis by Lagrangian Finite Element Method, *International Journal For Numerical Methods in Fluids*, 11, pp.453~477.
- Soulaimani A., Saad Y.** (1998) An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method for Solving Three-Dimensional Free Surface Flows, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 162(1-4), pp.79~106.
- Yamamoto K., Kawahara M.** (1999) Structural Oscillation Control using Tuned Liquid Damper, *Computers and Structures*, 71(4), pp.435~446.