

工學碩士 學位論文

LS-DYNA3D의 유체-구조 연성 해석기법을  
이용한 LNG선 탱크의 슬로싱 응답해석

*Sloshing Response Analysis of LNG Carrier Tank using  
Fluid-Structure Interaction Analysis Technique of LS-DYNA3D*

指導教授 李 相 甲

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋시스템工學科

蔣 仁 浩

본 논문을 장 인호의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 현 범수 (인)

위 원 : 공학박사 조 효제 (인)

위 원 : 공학박사 이 상갑 (인)

2007년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 장 인호

# 목 차

목 차 .....	<i>i</i>
List of Tables .....	<i>iii</i>
List of Figures .....	<i>iv</i>
Abstract .....	<i>vi</i>
1. 서 론 .....	1
2. 유체구조연성 해석기법 .....	3
2.1 라그랑지안 기법 .....	3
2.2 오일러리안 기법 .....	3
2.3 ALE 기법 .....	4
2.3.1 Advection .....	5
2.4 AMME .....	8
2.5 Grouping 알고리즘 .....	8
2.6 유체-구조연성 알고리즘 .....	10
3. 강체탱크 슬로싱 수치해석 시뮬레이션 .....	12
3.1 해석모델의 제원 및 해석조건 (model 1) .....	12
3.2 해석결과 및 압력측정위치 선정에 따른 결과 비교 .....	13
3.3. 해석모델의 제원 및 해석조건 (model 2) .....	16
3.4 해석결과 .....	17

4. 박스모델의 wet drop 수치해석 시뮬레이션 .....	20
4.1 실험모델의 제원 및 실험결과 .....	20
4.2 수치시뮬레이션 해석모델 및 해석결과 .....	21
4.3 라그랑지안 및 오일러리안 요소와의 상관관계 검토 .....	23
4.3.1 라그랑지안 및 오일러리안 요소의 크기 .....	23
4.3.2 라그랑지안 및 오일러리안 요소의 상대적 크기비율 .....	24
4.3.3 박스모델과 자유수면 사이의 공기층 수 .....	25
4.3.4 박스모델과 자유수면 사이의 공기층 요소의 두께 .....	26
5. 결    론 .....	29
참    고    문    헌 .....	30

## *List of Table*

Table 3.1 Analysis Condition (model 1) .....	12
Table 3.2 Finite element numbers of Sloshing model .....	13
Table 3.3 Analysis Condition (model 2) .....	16
Table 3.4 Finite element numbers of Sloshing model .....	17
Table 4.1 Analysis Condition .....	21
Table 4.2 Finite element numbers of Sloshing model .....	21
Table 4.3 Analysis scenario according to mesh size .....	23
Table 4.4 Analysis scenario according to ratio of Lagrangian & Eulerian mesh size .....	24
Table 4.5 Analysis scenario according to the number of air layer between box model and free surface .....	25
Table 4.6 Analysis scenario according to the thickness of air layer between box model and free surface .....	27

## 그림 목록

Fig. 2.1 Example of Lagrangian Formulation .....	3
Fig 2.2 Example of Eulerian Formulation. ....	4
Fig 2.3 Flow chart of Advection process .....	4
Fig 2.4 Advection .....	5
Fig 2.5 Node moving process of Equipotential Algorithm .....	6
Fig 2.6 Node moving process of simple average Algorithm .....	6
Fig. 2.7 Density advection process of Van Leer Algorithm .....	7
Fig. 2.8 Free drop test on an inclined rigid plate .....	9
Fig. 2.9 Free drop test and surface location .....	9
Fig. 2.10 Sketch of Coupling Algorithm .....	10
Fig. 2.11 Algorithm for Fluid-Structure Interaction Analysis .....	11
Fig. 3.1 Configuration and dimensions of tank model 1 (unit : mm) .....	12
Fig. 3.2 FE model of membrane tank(model 1) .....	13
Fig. 3.3 Configuration of fluid sloshing behavior in tank model 1 .....	14
Fig. 3.4 Element construction case considering pressure measuring location ·	15
Fig. 3.5 Comparisons of impact pressures of sloshing test and simulation ·	15
Fig. 3.6 Configuration and dimensions of tank model 2 (unit : mm) .....	16
Fig. 3.7 F.E model tank model 2 .....	17
Fig. 3.8 Configuration of fluid sloshing behavior in tank model 2 .....	18
Fig. 3.9 Comparisons of impact pressures of sloshing test and simulation ·	19
Fig. 4.1 Box type steel model and pressure gauge locations .....	20
Fig. 4.2 Pressure response results of box type specimen .....	20

Fig. 4.3 F.E. configuration of box model for wet drop test .....	21
Fig. 4.4 Configuration of stiffened box model .....	22
Fig. 4.5 Impact pressure measurement position at box bottom plate .....	22
Fig. 4.6 Fluid behavior after impact of box bottom to fluid .....	22
Fig. 4.7 Comparisons of impact pressures of wet drop test and simulation ..	23
Fig. 4.8 Impact pressure responses according to mesh size .....	24
Fig. 4.9 Impact pressure responses according to ratio of Lagrangian & Eulerian mesh size .....	25
Fig. 4.10 Impact pressure responses according to the number of air layer between box model and free surface .....	26
Fig. 4.11 Impact pressure responses according to the thickness of air layer between box model and free surface .....	27

# **Sloshing Response Analysis of LNG Carrier Tank using Fluid-Structure Interaction Analysis Technique of LS-DYNA3D**

*Jang, In-Ho*

*Division of Marine Systems Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University*

## **Abstract**

Recently, as the demand of LNG(Liquefied Natural Gas) is rapidly increased, the construction of LNG carrier is active and the sloshing problem is also greatly on the rise causing the structural damage in containment system inside cargo tank. Sloshing is a typical field of Fluid-Structure Interaction(FSI) problem, and its numerical analysis approach becomes possible and is actively in progress with an advent and ongoing advances in numerical simulation capabilities and its sophisticated tools.

In this study, numerical analyses for the sloshing of tank model and wet drop test of box model, typical FSI problems, were carried out using ALE Multi-Material Eulerian(AMME) technique of hydrocode LS-DYNA3D. LS-DYNA3D code and analysis technique were also validated through the comparison of simulation results with experimental ones. Through this study, the opportunity could be obtained to establish a more new and effective analysis of FSI problems.

The more accurate solution could be obtained and much less number of finite elements could make an analysis by the application of Grouping algorithm together with AMME technique. It was found that the selection of pressure measuring locations would be very important to get the more close responses to the experimental ones, and that the more exact fluid response behavior, such as breaking wave etc., could be realized.

Through the examination of the correlation between Lagrangian and Eulerian elements in box type model wet drop simulation, it was also confirmed that the simulation results could more coincide with experimental ones, as the element size becomes smaller, the ratio of Lagrangian element size to Eulerian one, the same, air layers, more than four between box model and free surface, and the element of air layer, a regular hexahedron.

# 1. 서 론

최근 액화천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)가 청정에너지로서 점차 그 수요가 증대되어 LNG선의 건조도 증가하고 있는 추세이다. LNG선 화물창의 단열시스템(containment system)은 LNG선 건조에 있어 가장 중요한 부위로서 그 특성상 매우 복잡한 구조배치와 재질로 구성되어 있다. 특히 극저온에 노출된 화물창 구조는 취성과파괴로 인한 손상에 대한 우려와 함께 슬로싱(sloshing)의 유체충격력 등에 의한 화물창의 탱크선각과 내부 부착물 등의 손상이 자주 발생하고 있다. 이에 작용하는 유체충격력 또한 그 현상의 복잡성으로 인하여 단열시스템의 동적응답 거동을 정확히 파악하는 것도 매우 어렵다[1].

1960년대 우주항공분야에서 연료탱크내의 유체유동으로 인한 안정성과 관련된 슬로싱 연구가 시작된 이래, 과학 분야뿐만 아니라 다양한 공학 분야에서도 많은 관심을 가져왔으며 최근 조선해양 분야에서도 자유표면(free surface)의 유동에 따른 탱크선각의 손상 가능성 등의 문제가 제기되고 있다. 현재 슬로싱 응답해석을 위해 이론적, 실험적 및 수치 해석적인 방법이 사용되고 있으나 아직 슬로싱 현상을 정확하게 해석할 수 있는 체계적인 방법은 제시되지 못하고 있다.

이론적 방법으로는 선형이론[2, 3]과 비선형 이론[4]에 근거하여 슬로싱 문제의 해를 구하고 있다. Faltinsen[4]이 자유표면의 비선형 항을 포함하여 해를 구하였지만, 대부분의 이론적 방법은 선형해석에 그치고 있으며 주로 작은 진폭과 주기의 슬로싱 문제에만 적용이 가능하다. 그러나 유체가 탱크의 천장에까지 치솟는 충격압력을 동반하는 실제 화물창에서의 슬로싱 문제의 비선형 해석을 수행하기에는 매우 어려운 것으로 알려져 있다[5].

실험적 방법으로는 탱크의 형상, 내부 부재의 위치 및 크기 등 다양한 변수에 따라 영향을 받으므로 모형시험법을 이용한 실험적 연구가 많이 이루어져 왔다. 모형시험법은 보통 1/70 ~ 1/50배 정도의 스케일의 탱크 모형실험을 수행하여 탱크 벽면에서의 최대 충격압력의 발생 시간과 위치를 추정하여 화물창 방열시스템 해석의 기초 자료로 활용하고 있다[6]. 이러한 크기의 모델에서 유체 입자의 매우 높은 운동성을 구현하기가 매우 어렵고 복잡한 구조로 된 화물창을 모두 고려하기 어려우므로 방열시스템의 일부를 시편 모델로 하여 높은 위치에서 떨어뜨리는 수면낙하시험(wet drop test)을 병행하여 수행하고 있다[7].

이에 반해 최근 전산기 환경의 급속한 발전과 함께 LS-DYNA3D[8] 및 MSC/DYTRAN[9] 등의 고도의 시뮬레이션 도구의 개발이 됨에 따라 다양한 분야의 내충격 실험과 동등한 유용성을 갖는 내충격 응답해석 기술 개발이 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 이러한 시뮬레이션 도구를 이용한 유체-구조 연성(Fluid-Structure Interaction, FSI) 문제의 수치해석 기법도 최근에 크게 발전하

였다. 내충격 응답해석을 통한 대상 구조물의 다양한 설계변경에 따른 동적응답거동 특성을 보다 정확히 파악하기 위해서는 내충격 실험을 통한 검증을 수행하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 해석코드 및 해석기법 사용의 타당성을 검증하고자 3차원 탱크 모델 슬로싱 거동 실험[10, 11]과 LNG선 화물창 박스 모델(box model)의 수면낙하시험[7]을 LS-DYNA3D의 유체-구조 연성해석 기법을 이용한 수치해석 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 비교 검토하였다. 여기서 유체-구조 연성 해석기법 중에서 ALE Multi-Material Eulerian(AMME) 기법을 사용하였다. 3차원 강체탱크 모델의 슬로싱 수치해석 시뮬레이션을 통해서 충격압력 측정지점 선정의 영향을 고려하였고, 박스 모델의 수면낙하시험의 결과를 이용하여 박스 모델의 수면낙하 수치 시뮬레이션에 있어서의 오일러리안(Eulerian) 요소와 라그랑지안(Lagrangian) 요소와의 상관관계를 검토하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 본 연구의 필요성, 목적 및 연구내용을 기술하였다. 2장에서는 유체-구조 연성해석을 수행하기 위한 기법(technique)에 대해 설명하였다. 3장에서는 3차원 강체탱크 모델의 슬로싱 수치해석 시뮬레이션을 통해서 충격압력 측정지점 선정의 영향을 고려하였다. 4장에서는 LNG 탱크 화물창 박스 모델의 수면낙하시험의 결과를 이용하여 박스 모델의 수면낙하 수치 시뮬레이션에 있어서의 오일러리안(Eulerian) 요소와 라그랑지안(Lagrangian) 요소와의 상관관계를 검토하였다. 5장에서는 본 연구를 통해 도출된 주요한 결과를 요약하였다.

## 2. 유체-구조연성 해석기법

유체-구조 연성 해석기법에는 라그랑지안, 오일러리안, ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 및 ALE Single/Multi-Material Eulerian(ASME/AMME) 기법으로 크게 나눌 수 있다. 일반적으로 기법의 선택은 특정 문제의 특성을 고려하여 선택하게 되며 수치 해석적 방법으로 정확하게 슬로싱 현상을 예측하기 위해서는 자유수면(free surface)을 정확하게 정의하는 것이 요구된다.

### 2.1 라그랑지안 기법

순수한 라그랑지안 기법은 Fig. 2.1에서와 같이 요소망(mesh)이 대상체에 붙어서 대상체를 따라가면서 바라보는 관점으로 서로 다른 재료(material) 사이에 경계(interface)가 존재하는 유체문제에서는 라그랑지안 요소를 사용함으로써 쉽게 모델을 구성할 수 있다. 작은 변형의 문제에서는 빠른 결과를 주는 장점이 있으나 대변형(large deformation)이 발생하는 문제에서 발생하는 라그랑지안 요소의 비틀림(distortion)은 계산을 계속 수행하기 위해서 필요한 요소 재생성 단계(mesh remeshing step)를 사용하기 어렵게 만든다. 즉, 해석수행에 필요한 시간간격이 짧아져서 해석이 중단되므로 적용하기 어렵다.

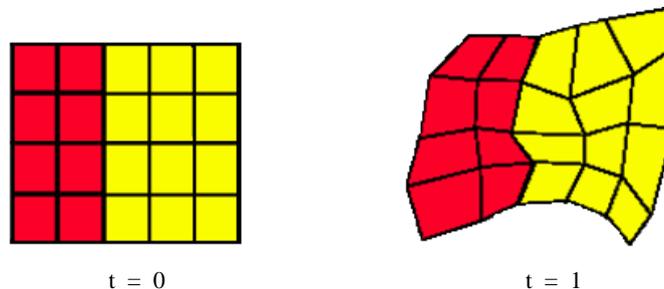


Fig. 2.1 Example of Lagrangian formulation

### 2.2 오일러리안 기법

순수한 오일러리안 기법은 Fig. 2.2에서와 같이 공간에 고정된 점에서 대상체를 바라보는 관점으로 요소는 공간에 고정이 되어 있으며 이런 요소들을 통하여 유동이 발생하는 기법이다. 검사체적(specific volume)을 구성하여 해석을 수행하며 대변형이 발생하는 문제를 쉽고 정확하게 해석할 수 있다는 장점이 있으나 요소와 요소사이를 이동하는 유동이 많아지면 에너지 소실이 발생하여 해석해의 신뢰성이 떨어지고 한 요소 내에는 오직 하나의 재료만 존재 가능하므로 두 개 이상

의 유체가 존재하는, 즉 자유수면을 가지는 문제에 있어서는 정확한 경계를 정의하기가 어려운 단점이 있다.

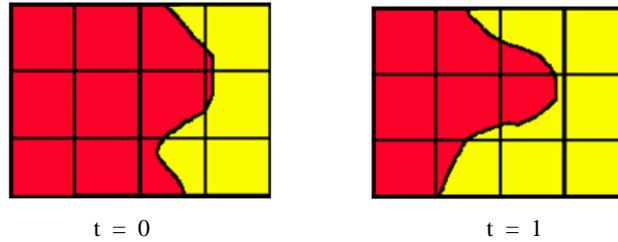


Fig. 2.2 Example of Eulerian formulation

오일러리안 기법의 적용에 있어서 가장 큰 문제점은 경계면의 추적(interface tracking)[12]와 요소와 요소사이를 이동하는 물성치의 advection이다. 이런 문제를 해결하기 위해서 라그랑지안 단계에 대해서는 외연 유한요소법(explicit finite element method)[13], advection 단계에서는 유한체적법(finite volume method)를 사용하는 ALE기법을 적용하는 것이다. 범용 유한요소 프로그램인 LS-DYNA3D에서는 advection 단계를 포함시켜 적용 범위를 넓혔으며 ALE기법과 함께 사용할 수 있도록 하였다.

### 2.3 ALE 기법

ALE 기법은 라그랑지안 기법과 오일러리안 기법의 단점을 보완하고 장점들만을 적용하여 상황에 맞게 적절하게 사용하는 기법이다. 연산자 분해(Operate Spirit)이라는 분해연산기법을 이용하여 Fig. 2.3에서와 같이 첫 번째 단계인 라그랑지안 단계에서는 요소의 변형이 크게 발생할 경우 적절한 smoothing 알고리즘(algorithm)을 이용하여 절점들을 이동하게 하여 요소를 수정하게 하고, 두 번째 단계인 오일러리안 단계에서는 절점들이 이동하기 전의 요소의 물성치를 절점이 이동한 후 수정된 요소로 물성 데이터를 변환하게 한다.

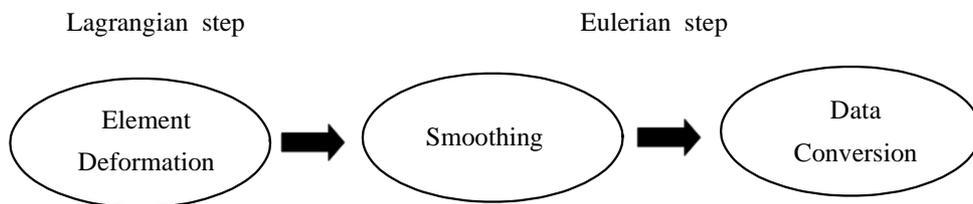


Fig 2.3 Flow chart of Advection process

ALE 기법은 위에서 언급한 바와 같이 대변형이 발생하는 문제와 유체-구조 연성문제에 있어서 요소의 형상을 유지하면서 해석을 수행할 수 있는 장점이 있지만 각 시간 스텝마다 2개의 단계를 거치면서 계산을 수행하므로 해석시간이 늘어나는 단점이 있다. 여기서 smoothing 알고리즘과 데이터 변환과정을 advection이라고 한다[14~19].

smoothing 알고리즘에는 Fig. 24에서와 같이 Equipotential, Simple Average, Kikuchi's 알고리즘이 있으며, 요소 비틀림을 최소화하기 위한 방법으로 Equipotential, Simple Average가 가장 적절하다. Equipotential은 Fig. 2.5에서와 같이 경계에 위치한 절점은 유지하면서 일정하지 않은 요소의 간격을 내부절점을 이동시킴으로써 일정한 간격으로 배열하는 알고리즘이다. Simple Average 알고리즘은 Fig. 2.6에서와 같이 한 절점을 둘러싸고 있는 절점들의 좌표의 평균 위치로 절점을 이동시키는 방법이고, Kikuchi's 알고리즘은 한 절점을 둘러싸고 있는 요소의 부피 중심 좌표의 평균값을 사용하여 절점을 배치시키는 방법이다. 또한 위의 세 개의 알고리즘을 가중평균을 적용함으로써 사용될 수 있다.

위에서 언급한 smoothing 알고리즘을 적용하여 절점이 이동한 후에 데이터 변환을 하게 된다. 데이터 변환과정에서 요소의 경계를 이동하는 질량, 운동량, 내부 에너지를 계산하게 되며 Fig. 2.4에서와 같이 Donor Cell, Van Leer 알고리즘을 사용한다. Donor Cell 알고리즘은 외부조건에 의해 한 요소에서 이웃하는 다른 요소로 유동이 발생할 때 기존 요소의 물성치를 가지고 다른 요소로 이동하는 것으로 1차원의 정확도를 가지고 있으며 Van Leer 알고리즘은 Fig. 2.7에서와 같이 공간을 통하여 물성치가 이동을 하는 것으로 2차원의 정확도를 가지고 있다[20].

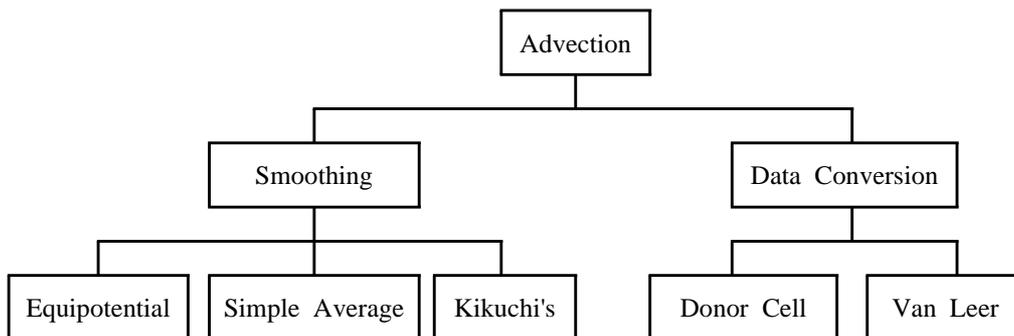


Fig 2.4 Diagram of Advection

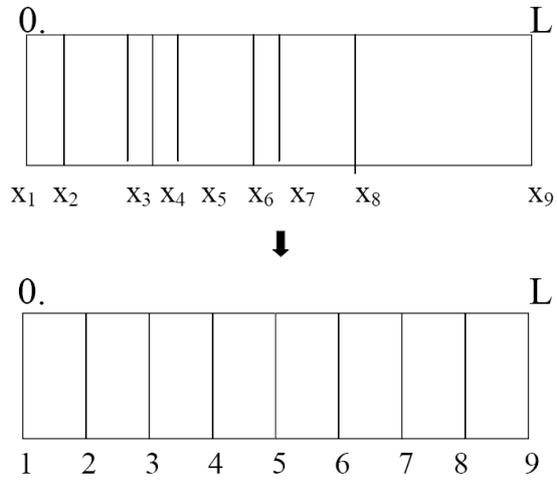


Fig. 2.5 Node moving process by Equipotential algorithm



Fig. 2.6 Node moving process by Simple Average algorithm

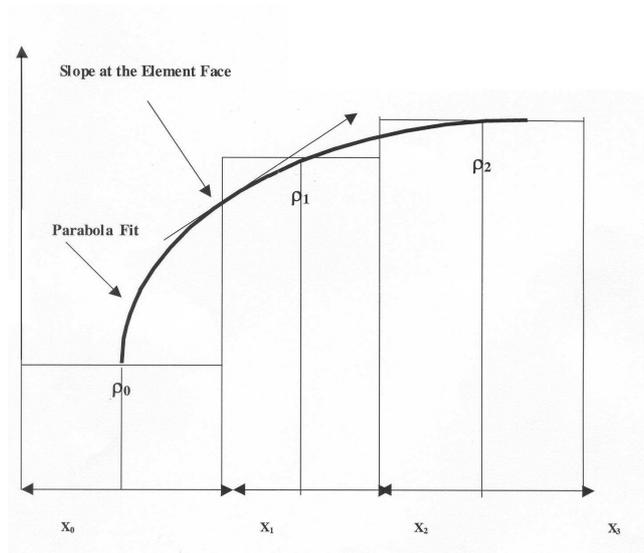


Fig. 2.7 Density advection process of Van Leer algorithm

## 2.4 AMME 기법

위에서 언급한 라그랑지안 기법과 전형적인 ALE 기법을 이용하여 슬로싱과 수면낙하 수치 시뮬레이션을 수행하기가 어렵다. 왜냐하면 슬로싱과 같이 쇄파(breaking wave)가 발생하는 대변형 문제에서는 해석해의 정밀도가 저하되고 또한 요소의 비틀림으로 인해 해석수행을 위한 시간간격이 짧아져 해석이 중단되기 때문이다. ALE 기법에는 위에서 언급한 것 외에도 AMME 기법이 있다. 이 기법은 오일러리안 기법을 한 단계 발전시킨 기법으로써 순수한 오일러리안 기법은 하나의 요소 내에 두 개 이상의 유체가 존재할 수 없지만 이 기법에서는 가능하다. 즉, 한 요소 내에 두 개 이상의 유체가 존재하여 경계를 정의할 수 있다. 그러나 이 기법은 오일러리안 기법의 단점 중의 하나를 해결하였지만 요소와 요소사이의 유동이 많을 경우 에너지 소실이 발생하게 되며 또한 요소가 공간에 고정되어 있으므로 해석영역이 방대할 경우 많은 수의 요소를 요구하게 되는 단점을 해결할 수 없으므로 이 기법을 단독으로 사용할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 LS-DYNA3D에서는 Grouping 알고리즘을 제공한다.

## 2.5 Grouping 알고리즘

오일러리안 요소는 항상 공간에 고정되어 있으므로 구조물의 이동영역이 넓을 경우 그만큼 넓은 검사체적을 구성해야 하고 그로 인해 많은 요소를 구성해야 한다. 또한 많은 요소를 거쳐서 이동하게 되므로 에너지 소실이 발생하여 해석해의 신뢰성이 떨어지게 된다. LS-DYNA3D에서는 이것을 해결하기 위한 방법으로 Grouping 알고리즘을 제공한다. 이것은 슬로싱 해석에 필수적이다. 특히 병진운동이나 회전운동을 하는 슬로싱 해석에 유용하다. 이 알고리즘은 공간에 고정되어 있는 오일러리안 요소가 라그랑지안 요소와 함께 이동하는 것이다. 이 알고리즘을 적용함으로써 요소의 비틀림이 발생하지 않아 해석수행을 위한 시간간격이 유지되어 안정적이며, 공간에 고정되어 있는 오일러리안 요소가 같이 이동하므로 보다 적은 요소로 해석이 가능하고 에너지 소실이 적게 발생하여 해석해의 신뢰성이 높아지는 장점이 있다.

Figs. 2.8과 2.9는 Grouping 알고리즘을 적용한 예를 보여주고 있으며 기울어진 강체 벽(rigid wall)에 부분적으로 유체가 차있는 강체 탱크의 자유낙하를 묘사하고 있다. 강체 탱크가 기울어진 강체 벽과 부딪힌 후에 움직이며 회전을 하게 되고 라그랑지안 요소에 붙어 있는 좌표계를 따라서 유체 요소도 같이 움직이게 된다. Fig. 2.9는 시간  $t = 0, 5, 10$  및  $20$  msec에서의 탱크의 위치와 유체의 거동을 보여주고 있다[21].

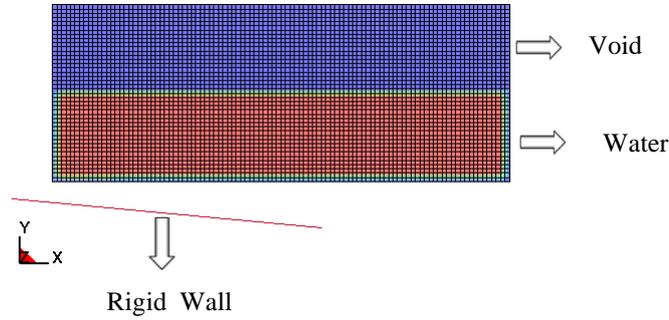


Fig. 2.8 Scenario of free drop simulation of rigid tank on an inclined rigid wall

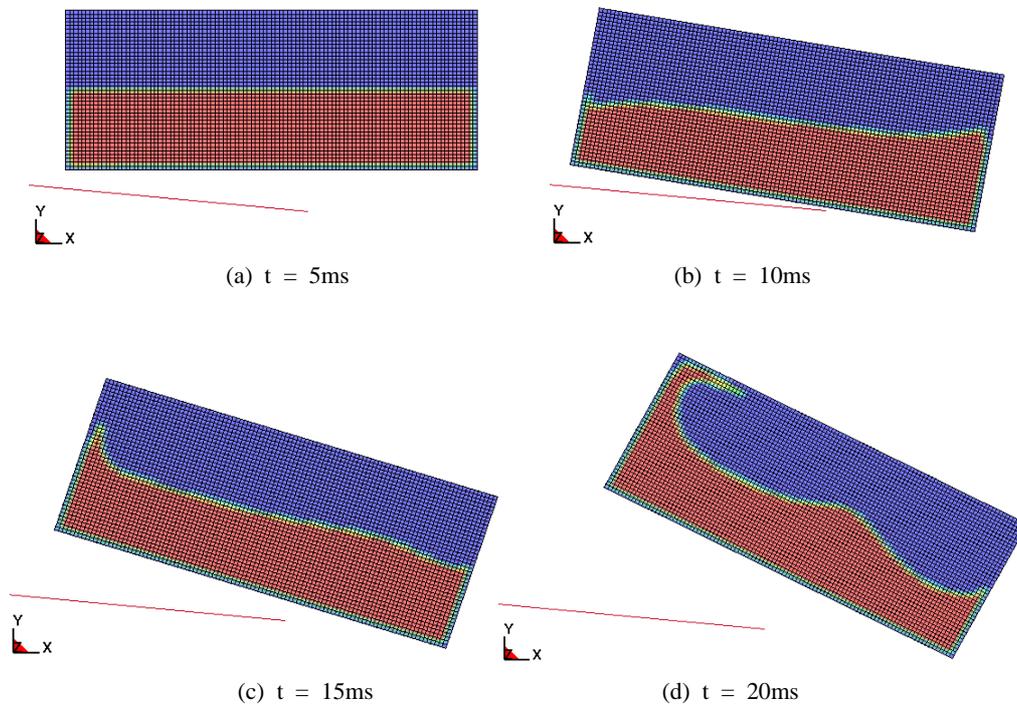


Fig. 2.9 Free drop simulation of rigid tank on an inclined rigid wall

## 2.6 유체-구조 연성 알고리즘

유체-구조 연성에는 두 가지 알고리즘이 고려된다. 첫 번째가 접촉(contact) 알고리즘이다. 접촉 경계(contact interface)는 구조요소로부터 유체요소를 분리하고 유체로부터 구조에 적용되는 접촉력(contact force)를 계산하는데 사용된다. 외연적 시간적분법(explicit time integration method)에서는 접촉 경계에서의 절점력(nodal force)들이 접촉력을 계산하기 위해 각 시간간격마다 계산된다. 접촉 경계

에서의 유체 절점들은 라그랑지안 요소와 함께 접촉을 유지하기 위해서 이동을 해야 하고 유체 영역의 요소의 재생성을 요구하게 된다. 역시 작은 변형문제에서는 라그랑지안 기법 또는 전형적인 ALE 기법과 함께 사용될 수 있지만 대변형이 발생하는 문제에서는 사용되기 어렵다.

대변형 문제에 사용될 수 있는 알고리즘이 Euler-Lagrange Coupling이다. 처음에는 연계(coupling) 알고리즘을 Constraint Based Method로 사용하였지만 이 방법은 많은 운동에너지가 소실되므로 충격(impact) 문제의 적용에 문제가 있었다. 그러므로 시스템 내에서 가능한 한 전체 에너지를 보존하기 위해서 Fig. 2.10에서와 같이 Penalty Method를 도입하였다. 이것은 연계되는 라그랑지안 요소의 절점과 오일러리안 요소의 절점 사이의 상대적 변위( $d$ )를 추적하는 개념으로 연계력(coupling force,  $F$ )은 이런 변위들에 비례하도록 정의된다[22]. 라그랑지안 요소의 절점과 오일러리안 요소의 절점에 연계력을 분배하게 된다.

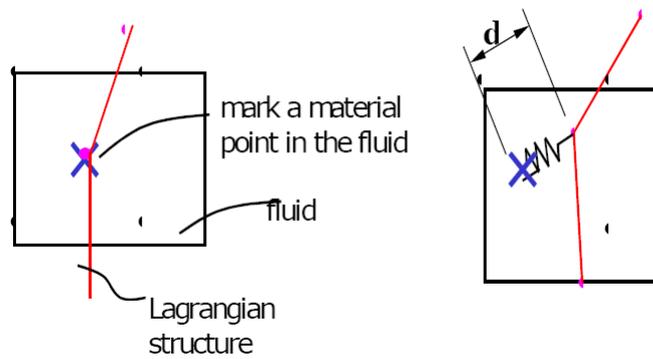


Fig. 2.10 Sketch of Coupling algorithm

3장에서 수행하게 될 강제탱크 슬로싱 수치 시뮬레이션을 수행하기 위하여 이장에서 언급한 AMME 기법, Grouping 알고리즘 그리고 연계 알고리즘 중 Penalty Method를 적용하여 수행하였다.

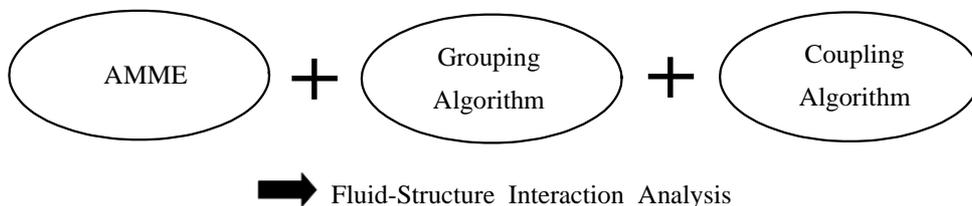


Fig. 2.11 Algorithm for Fluid-Structure Interaction Analysis

### 3. 강체탱크 슬로싱 수치해석 시뮬레이션

탱크 슬로싱 수치해석의 검증을 위해 2가지 모델의 실험결과를 사용하였다[10, 11]. 탱크 슬로싱 수치해석은 오일러리안 요소가 라그랑지안 요소와 함께 운동하도록 LS-DYNA3D의 AMME 기법을 사용하였다[21]. 여기서는 탱크를 강체로 가정하여 슬로싱 수치해석을 수행하였다.

#### 3.1 Tank Model 1의 슬로싱 수치해석 시뮬레이션

첫 번째 모델 Tank Model 1의 제원은 Fig. 3.1과 같이 전후의 횡단면 형상이 동일하며 탱크 모형의 두께는 20mm인 아크릴로 제작되었다. 충격압력의 측정지점은 PT1과 PT2이며 선수방향에 위치하고 있다. 해석조건으로서는 Table 3.1에서와 같이 탱크 모형의 실험주기 1.12sec, 진폭 20mm의 정현운동(surge)을 시켰고, 수심은 탱크 모형 높이의 0.7이었다[10].

Fig. 3.2는 Tank Model 1의 탱크 및 유체 모델의 유한요소 모델을 보여주고 있으며, 사용한 절점의 수와 요소의 수는 Table 3.2에 요약하였다. 탱크는 쉘 요소(shell element)를, 유체는 입방체 요소(solid element)를 사용하였다.

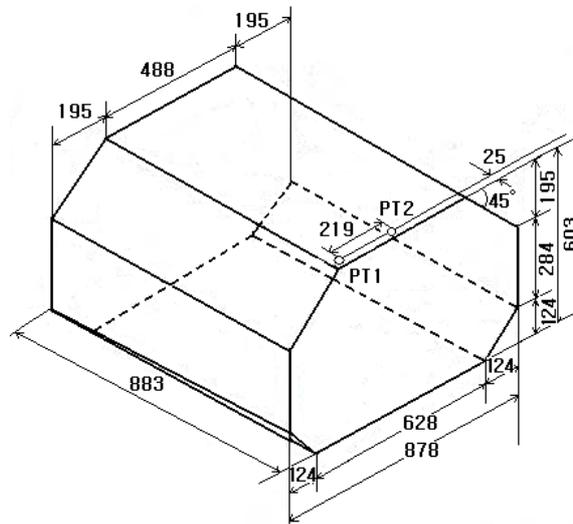


Fig. 3.1 Configuration and dimensions of Tank Model 1 (unit : mm)

Table 3.1 Analysis condition of Tank Model 1

Analysis condition	Surge
Period	1.12 sec
Amplitude	20 mm
Filling depth of water	0.7 of tank height
Pressure measuring locations	PT1, PT2

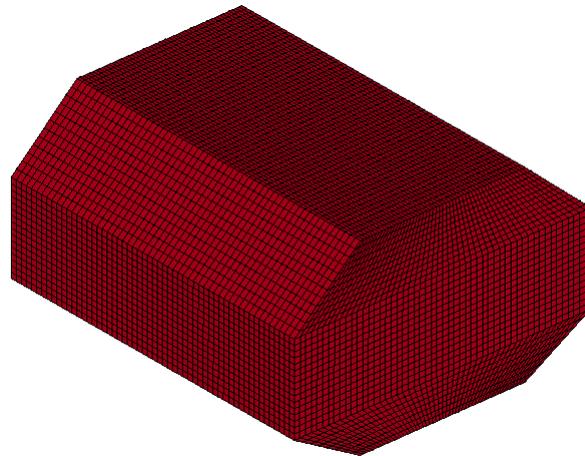


Fig. 3.2 Configuration of Finite Element model of Tank Model 1

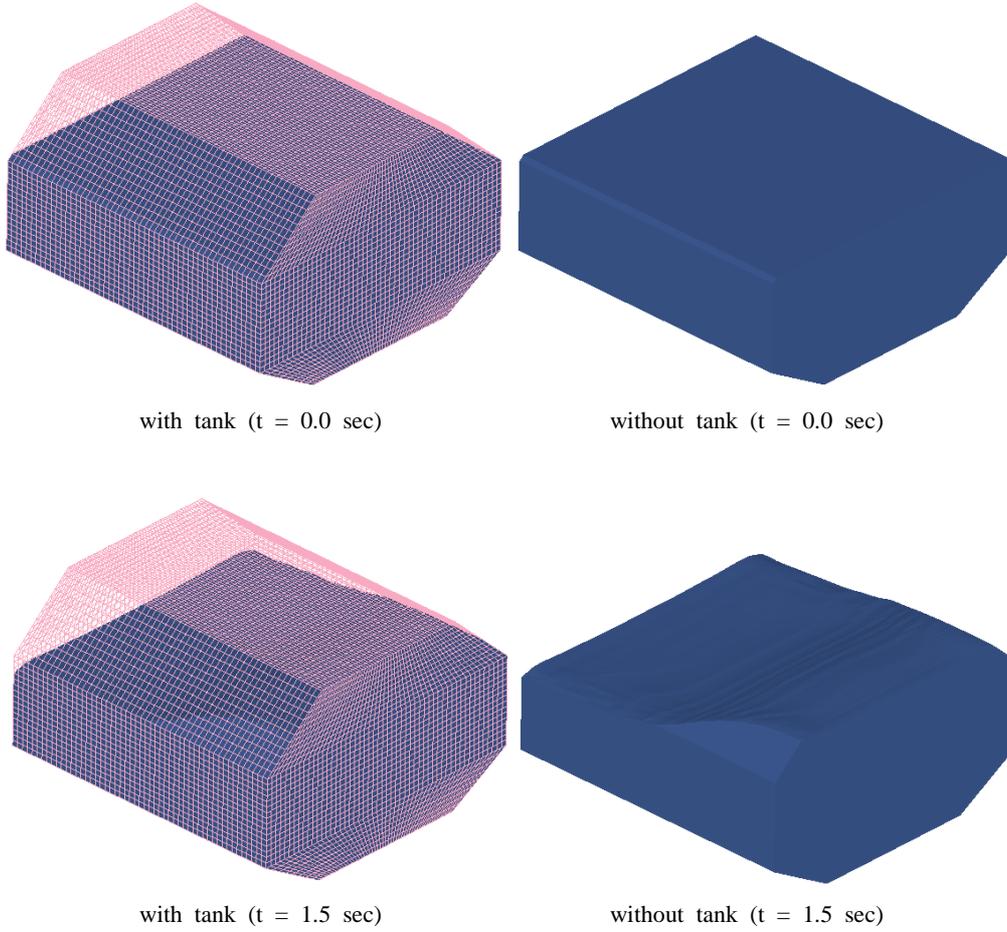
Table 3.2 Finite element numbers of Tank Model 1

Node	138,602
Shell element	12,896
Solid element	124,544

Fig. 3.3은  $t = 0.0, 1.5, 3.0$  및  $6.0$  sec에서의 탱크 모형내의 유체 슬로싱 거동을 보여주고 있으며, 쇠파 등의 거동 등을 매우 정교하게 구현할 수 있었다. 본 탱크 모형의 슬로싱 수치해석에서는 탱크 모형의 충격압력 측정지점에서의 위치 선정이 슬로싱 거동의 응답에 미치는 영향을 검토하였다. 첫 번째 시뮬레이션에서는 라그랑지안 요소 격자를 등분 간격으로 분할함으로써 충격압력 측정지점이 요소의 중앙에 위치시키지 않았다. 본 논문에서는 측정지점이 라그랑지안 요소 격자의 중앙에 위치하도록 하였으며, Fig. 3.4에서와 같이 전자를 case 1, 후자를 case 2로

구분하였다.

Fig. 3.5에서와 같이 측정지점이 라그랑지안 요소 격자의 중앙에 위치하도록 한 경우(case 2)의 충격압력 수치해석 응답결과가 실험결과에 보다 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.



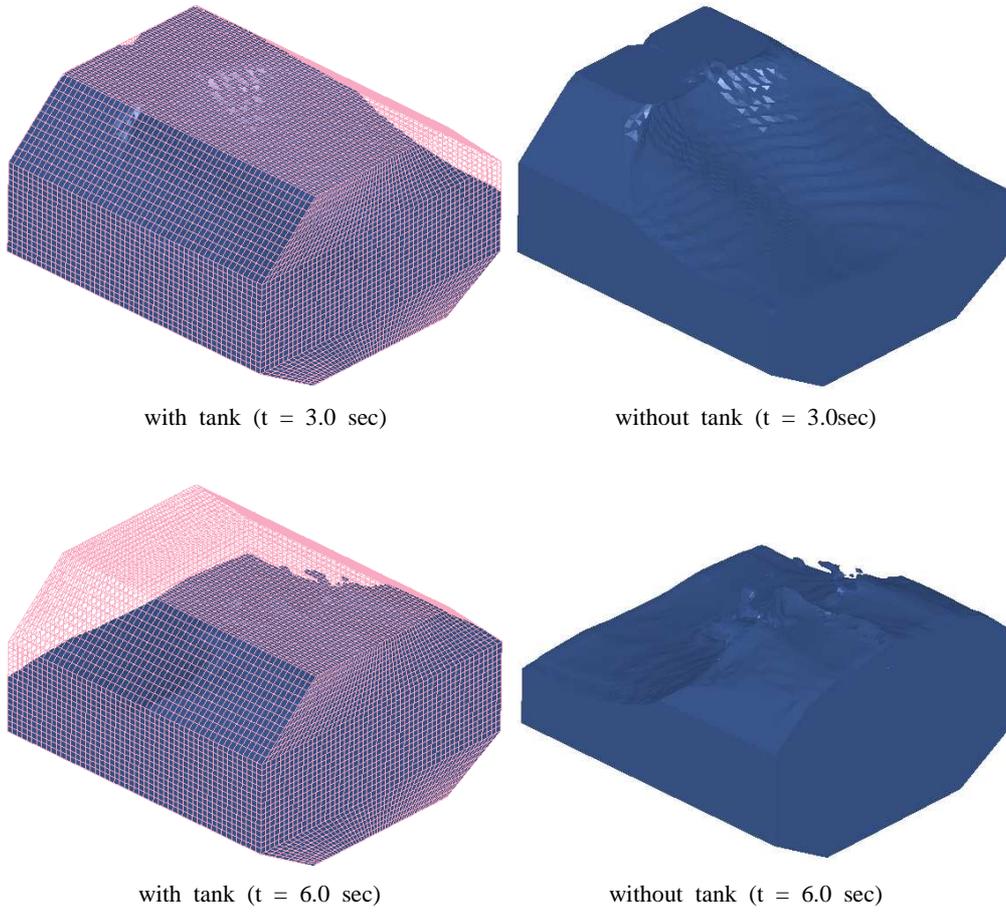
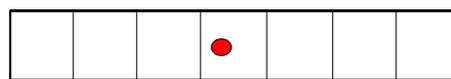
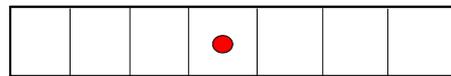


Fig. 3.3 Configuration of fluid sloshing behavior in Tank Model 1



(a) case 1



case 2

Fig. 3.4 Pressure measuring locations

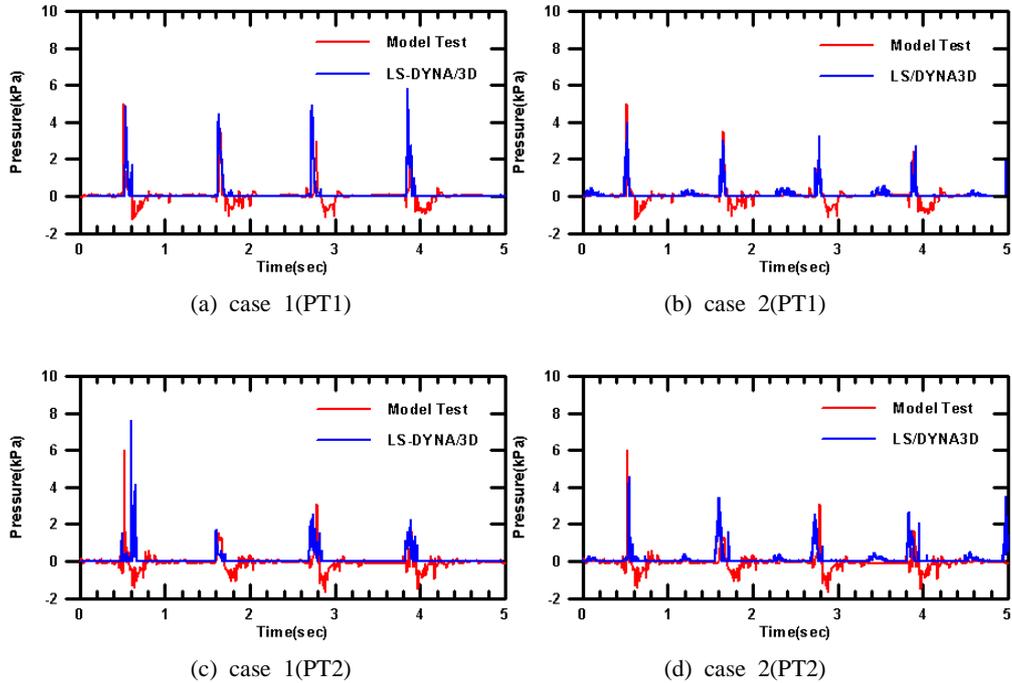


Fig. 3.5 Comparison of impact pressure of sloshing test and simulation(Tank Model 1)

### 3.2 Tank Model 2의 슬로싱 수치해석 시뮬레이션

두 번째 모델 Tank Model 2의 제원은 Fig. 3.6과 같이 좌우의 횡단면 형상이 동일하며 탱크 모형의 두께는 10mm인 아크릴로 제작되었다. 충격압력 측정지점은 탱크 모형의 선수방향 전면의 PT1, PT2 및 PT3이다. 해석조건으로서는 Table 3.3에서와 같이 탱크 모형의 실험 주기 1.00sec, 진폭 0.5cm의 정현운동(sway)을 시켰고, 수심은 탱크 모형 높이의 0.5이었다[11].

Fig. 3.7은 Tank Model 2의 탱크 및 유체 모델의 유한요소 모델을 보여주고 있으며, 사용한 절점의 수와 요소의 수는 Table 3.4에 요약하였다. 탱크는 쉘 요소(shell element)를, 유체는 입방체 요소(solid element)를 사용하였다.

Fig. 3.8은 시간  $t = 0.0, 1.5, 3.0$  및  $6.0$  sec에서의 탱크 모형내의 유체 슬로싱 거동을 보여주고 있으며, 충격압력 측정지점은 탱크 모형의 라그랑지안 요소 격자의 중앙에 위치하도록 하였다. 각 측정지점에서 충격압력의 수치해석 결과와 실험 결과를 Fig. 3.9에 나타내었다. 충격압력 수치해석 결과가 실험결과에 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

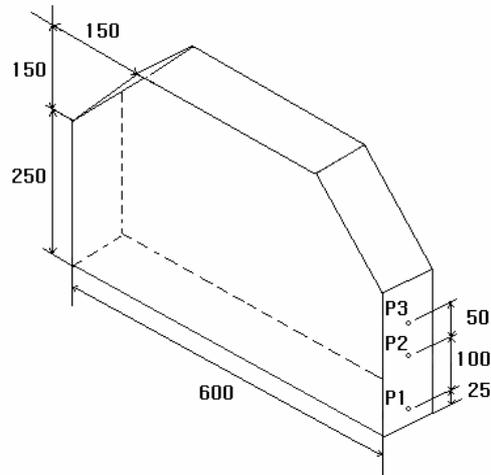


Fig. 3.6 Configuration and dimensions of Tank Model 2 (unit : mm)

Table 3.3 Analysis condition of Tank Model 2

Analysis condition	sway
Period	1.00sec
Amplitude	5mm
Filling depth of water	0.5 of tank height
Pressure measuring locations	P1, P2, P3

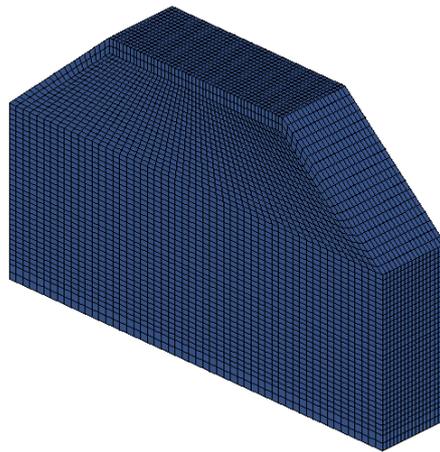
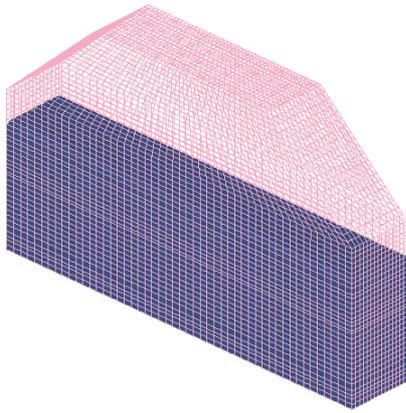


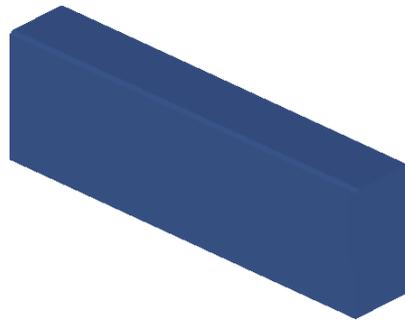
Fig. 3.7 Configuration of Finite Element model of Tank Model 2

Table 3.4 Finite element numbers of Tank Model 2

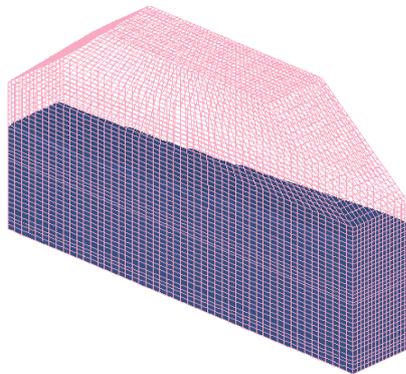
Node	143,226
Shell element	16,270
Solid element	126,504



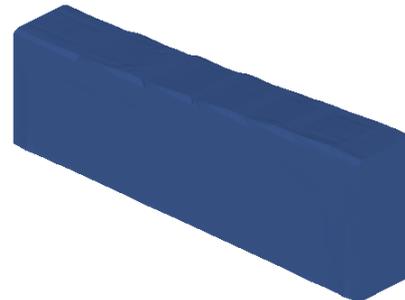
with tank (t = 0.0 sec)



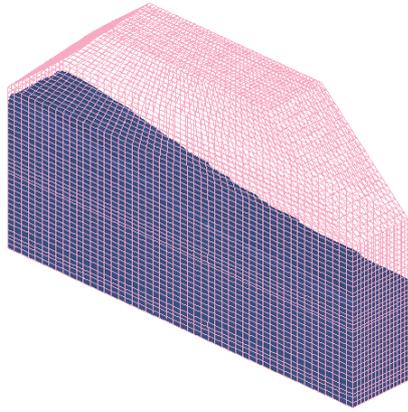
without tank (t = 0.0 sec)



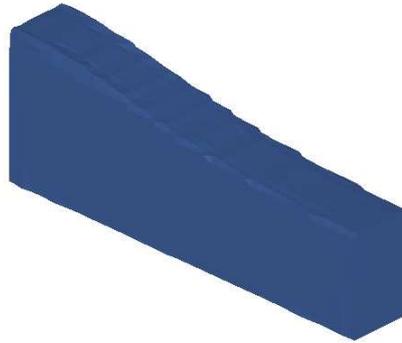
with tank (t = 1.5 sec)



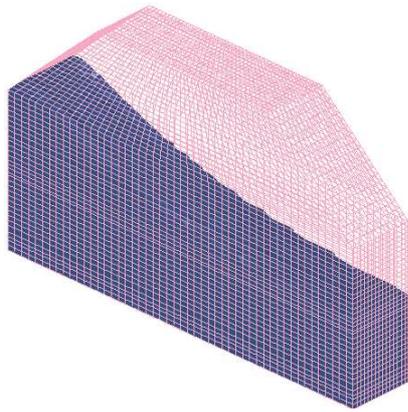
without tank (t = 1.5 sec)



with tank (t = 3.0 sec)



without tank (t = 3.0 sec)

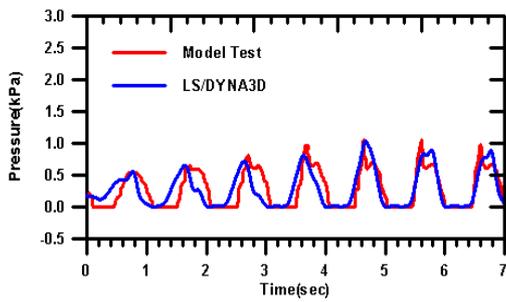


with tank (t = 6.0 sec)

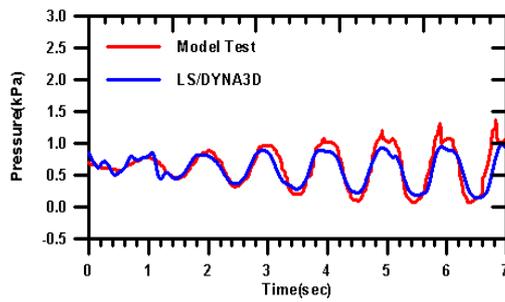


without tank (t = 6.0 sec)

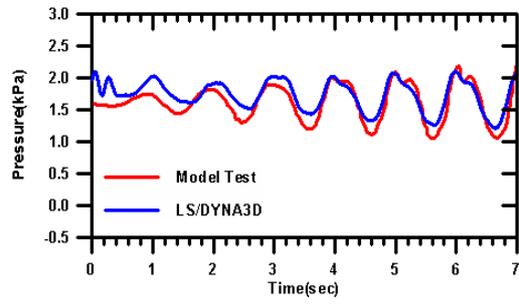
Fig. 3.8 Configuration of fluid sloshing behavior in Tank Model 2



(a) pressure history at P1



(b) pressure history at P2



(c) pressure history at P3

Fig. 3.9 Comparison of impact pressure of sloshing test and simulation(Tank Model 2)

## 4 . 박스 모델 수면낙하 수치해석 시뮬레이션

Fig. 4.1은 수면낙하시험을 위한 박스 모델과 충격압력 측정지점을 보여주고 있다. 박스 모델의 크기는 1.655×1.655×0.5m이고, 5×5×3m 크기의 물탱크에서 낙하 높이 2m에서 기울기 각이 0도로 수행한 실험결과[7]을 이용하여 박스 모델의 수면낙하 수치 시뮬레이션에 있어서의 오일러리안 요소와 라그랑지안 요소와의 상관관계를 검토하였다.

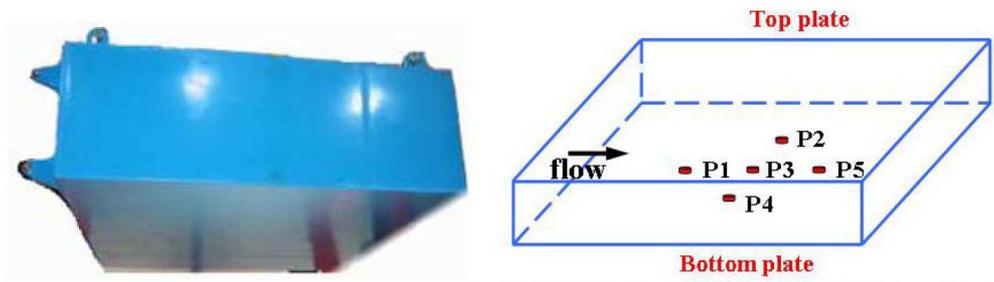


Fig. 4.1 Box type steel model and pressure gauge locations[7]

Fig. 4.2는 박스 모델의 수면낙하시험에 의한 각 측정지점에서의 충격압력에 대한 결과를 보여주고 있다. 전반적으로 모든 측정지점에서 약 15.0 bar 정도의 극치 (peak)와 약 4~5msec 정도의 지속시간(duration)을 갖고 있다는 것을 알 수 있다.

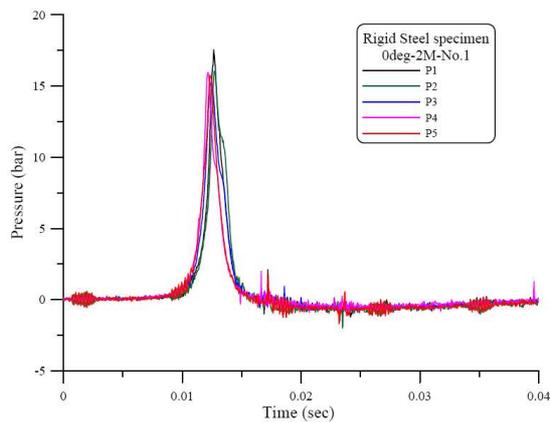


Fig. 4.2 Pressure response results of box type specimen[7]

본 논문에서는 대칭조건을 이용하여 물탱크와 박스 모델의 1/4의 모델을 사용하였으며, Fig. 4.3은 수치 시뮬레이션을 위한 유체와 박스 모델에 대한 유한요소 모델을, Fig. 4.4 및 4.5는 각각 박스 모델의 내부 보강구조와 바닥의 압력측정 지점을 보여주고 있다. 본 박스 모델의 수면낙하 시뮬레이션에 사용한 절점의 수와 요소의 수는 Table 4.1에 요약하였다. 박스 모델은 쉘 요소를, 유체는 입방체 요소를 사용하였다. 그리고 Fig. 4.6은 박스 모델이 유체에 입수된 직후의 유체의 거동을 보여주고 있다.

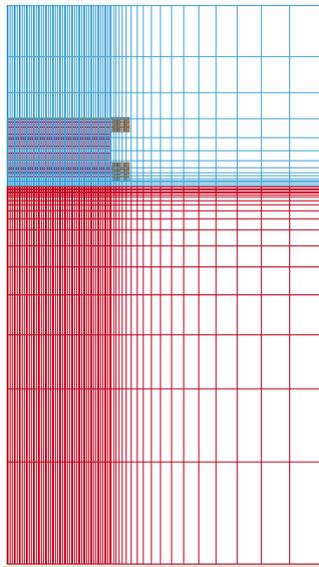


Fig. 4.3 F.E. configuration of box and fluid model for wet drop test simulation

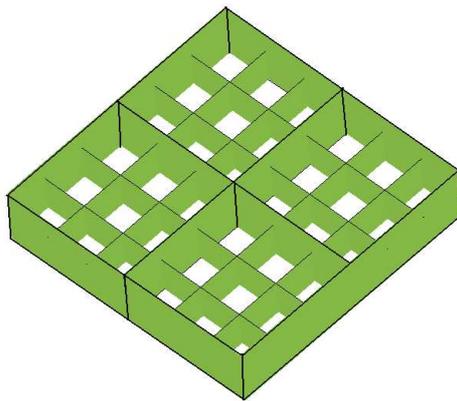


Fig. 4.4 Configuration of stiffened box model

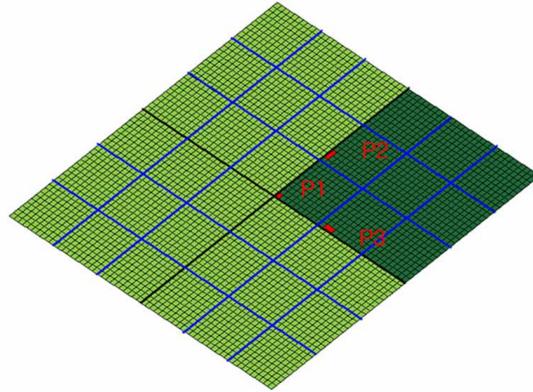


Fig. 4.5 Impact pressure measurement positions at box bottom plate

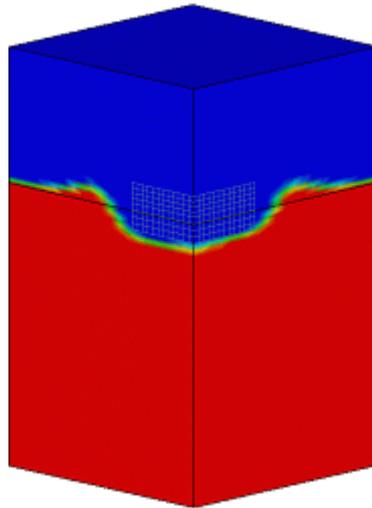


Fig. 4.6 Fluid behavior after impact of box bottom to fluid

Table 4.1 Finite element numbers of box and fluid model for wet drop simulation

part \ F.E.	nodes	elements
water	118,579	109,512
air	99,856	91,260
box	20,874	22,440

본 논문에서는 박스 모델의 수면낙하 수치해석의 검증을 위해 라그랑지안 요소와 오일러리안 요소의 상대적 크기, 박스 모델 아래 공기층 요소의 개수 등 라그랑지안 및 오일러리안 요소와의 상관관계에 대하여 검토하였다.

#### 4.1 라그랑지안 및 오일러리안 요소 크기

라그랑지안 요소 및 오일러리안 요소의 크기를 Table 4.2에서와 같이 각각 50.0, 25.0 및 12.5mm로 구성한 시나리오에 대한 충격압력 측정지점에서의 압력에 대한 응답은 Fig. 4.8과 같다. 요소의 크기가 가장 작은 12.5mm(case 3) 일 경우 측정지점에서의 충격압력 응답이 실험결과와 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 4.2 Analysis scenario according to mesh size

case \ item	mesh size(mm)
case 1	50.0
case 2	25.0
case 3	12.5

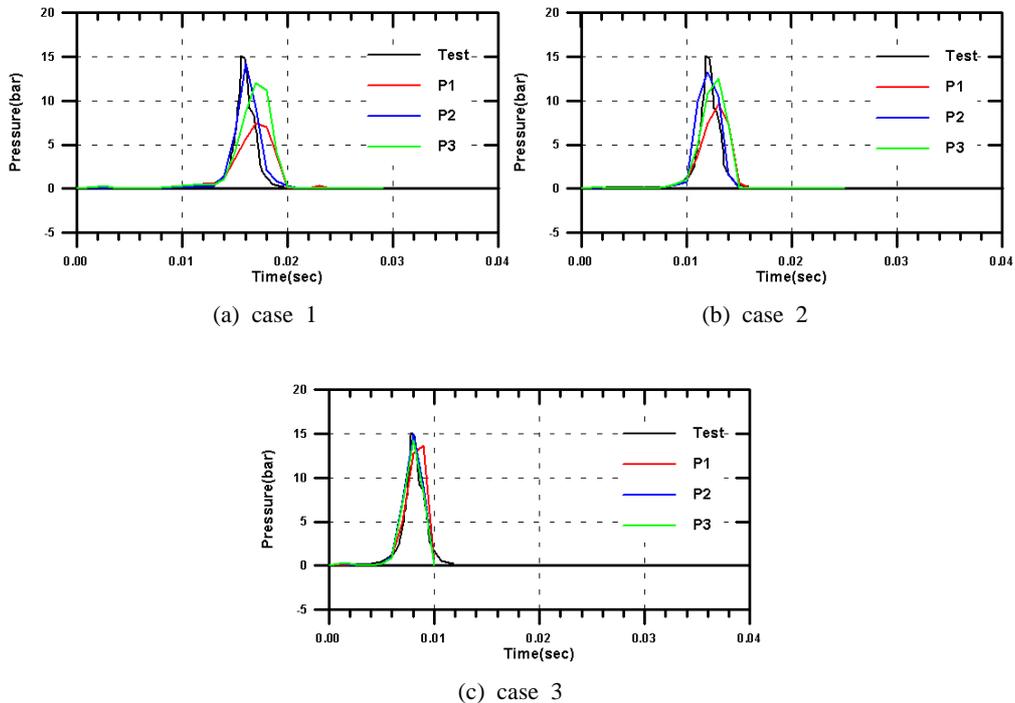


Fig. 4.7 Impact pressure responses according to mesh size

## 4.2 라그랑지안 및 오일러리안 요소의 상대적 크기

라그랑지안 요소와 오일러리안 요소의 상대적 크기 비율을 Table 4.3에서와 같이 2:1, 1:2, 1:1 로 구성된 시나리오에 대한 충격압력 측정지점에서의 압력의 응답은 Fig. 4.9와 같다. 라그랑지안 요소와 오일러리안 요소와의 비율이 같을 때 측정지점에서의 압력이 실험결과와 대체로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Table 4.3 Analysis scenario according to the ratio of Lagrangian & Eulerian mesh size

case \ item	ratio of Lagrangian & Eulerian mesh size
case 1	Lagrangian & Eulerian = 2:1
case 2	Lagrangian & Eulerian = 1:2
case 3	Lagrangian & Eulerian = 1:1

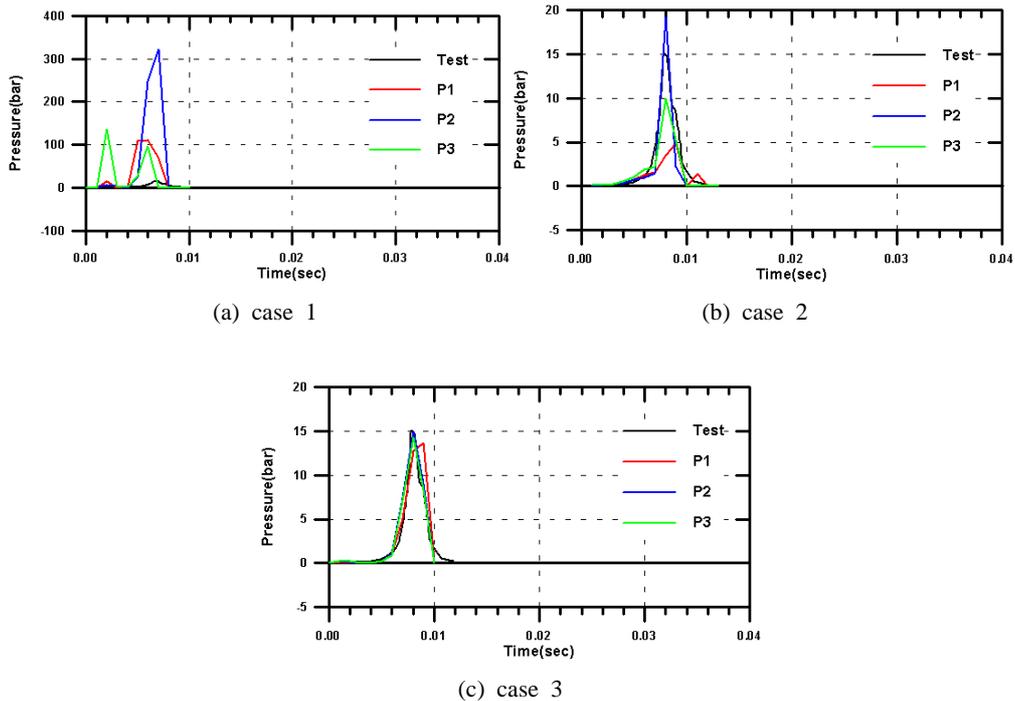


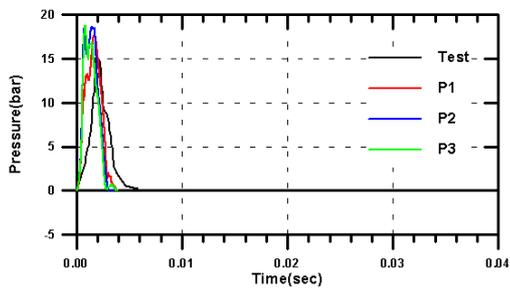
Fig. 4.8 Impact pressure responses according to the ratio of Lagrangian & Eulerian mesh size

### 4.3 박스 모델과 자유수면 사이의 공기층 수

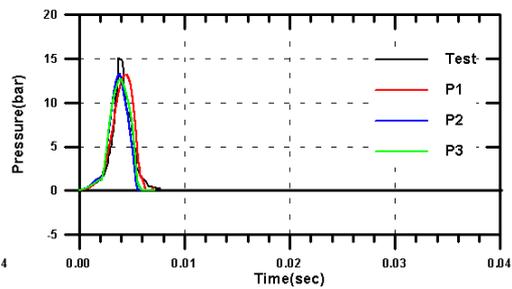
박스 모델과 자유수면 사이의 공기층 수를 Table 4.4에서와 같이 1개, 2개, 3개, 4개, 5개로 구성된 시나리오에 대한 충격압력 측정지점에서의 압력의 응답은 Fig. 4.10과 같다. 공기층의 수를 4개 이상 구성한 경우 측정지점에서의 압력이 실험결과와 대체로 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Table 4.4 Analysis scenario according to the number of air layer between box model and free surface

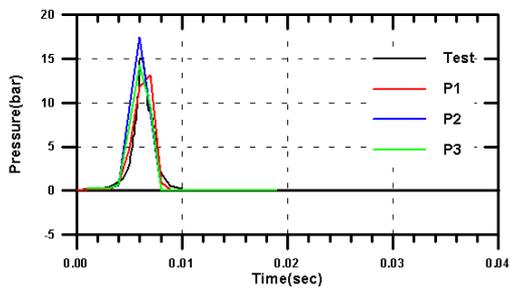
case \ item	number of air layer
case 1	1
case 2	2
case 3	3
case 4	4
case 5	5



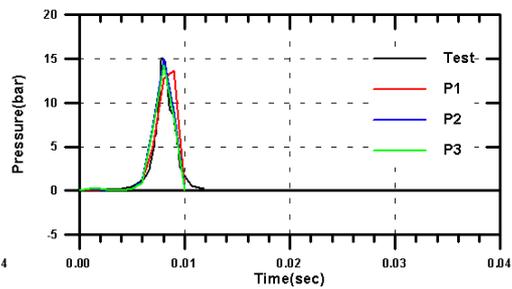
(a) case 1



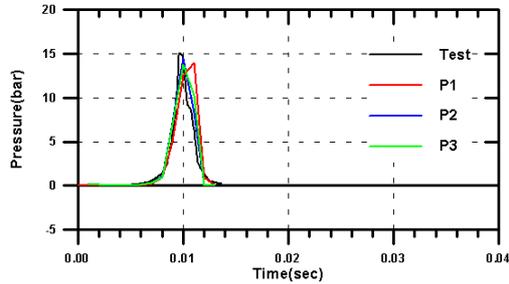
(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4



(e) case 5

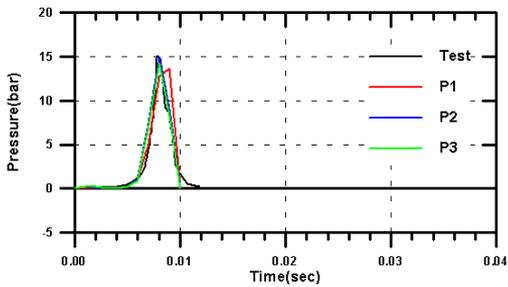
Fig. 4.9 Impact pressure responses according to the number of air layer between box model and free surface

#### 4.4 공기층 요소의 두께

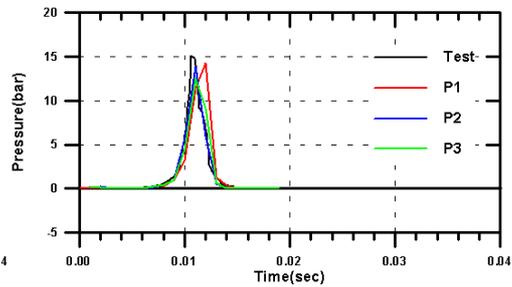
박스 모델과 자유수면 사이의 공기층 요소의 두께를 Table 4.5에서와 같이 12.5, 18.75, 25.00, 31.25 및 37.50mm로 구성한 시나리오에 대한 충격압력 측정지점에서 압력의 응답은 Fig. 4.11과 같다. 공기층의 요소의 두께가 작을수록 즉, 요소가 정육면체가 될수록 실험결과와 대체로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 4.5 Analysis scenario according to the thickness of air layer between box model and free surface

case \ item	thickness of air layer(mm)
case 1	12.50
case 2	18.75
case 3	25.00
case 4	31.25
case 5	37.50



(a) case 1



(b) case 2

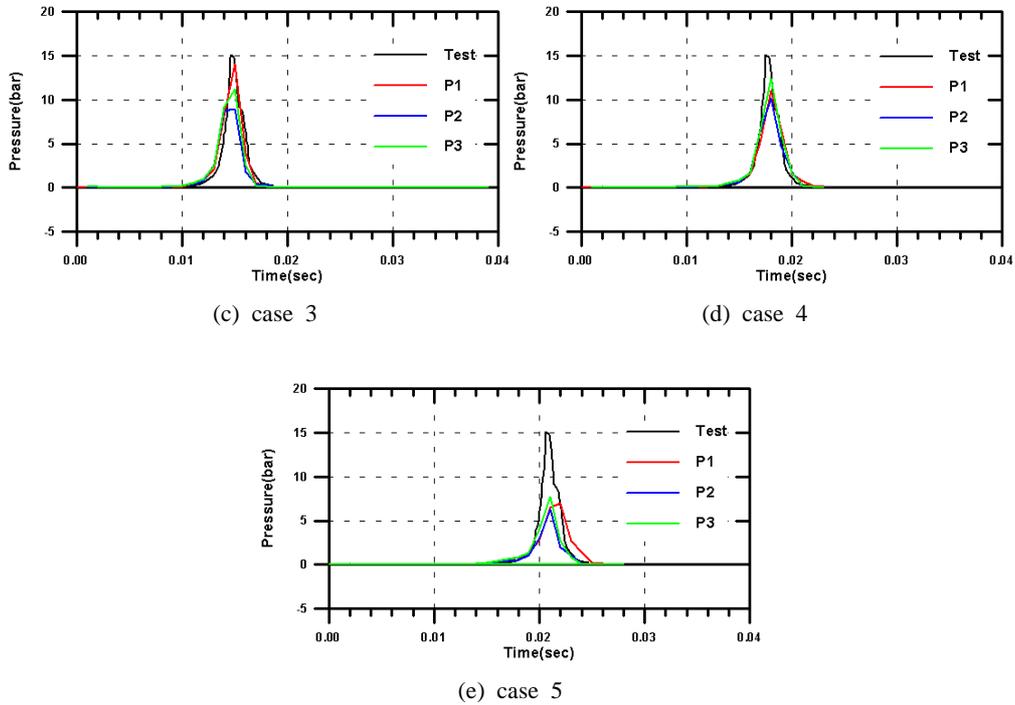


Fig. 4.10 Impact pressure responses according to the thickness of air layer between box model and free surface

라그랑지안 요소 및 오일러리안 요소의 크기, 두 요소의 상대적 크기 비율, 박스 모델과 자유수면 사이의 공기층의 수, 공기층 요소의 두께 등 라그랑지안 요소와 오일러리안 요소와의 상관관계에 대한 검토를 통하여 두 요소의 크기는 작을수록, 두 요소와의 상대적 크기 비율이 같을 경우, 박스 모델과 자유수면 사이의 공기층 수는 4개 이상일 경우, 공기층의 요소가 정육면체가 될수록 수치해석 시뮬레이션의 응답결과는 수면낙하시험 결과와 잘 일치하다는 것을 알 수 있었다.

실험결과와 수치해석 시뮬레이션을 통한 충격압력의 경향은 기울기 각이 0도이기 때문에 모든 측정지점에서의 충격압력의 응답은 동시에 발생하고 또한 극치를 기준으로 대체로 대칭의 형상을 가진다는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 전형적인 유체-구조 연성 문제인 탱크 슬로싱과 박스 모델의 수면낙하시험 문제를 LS-DYNA3D의 AMME 기법을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 실험 결과와의 비교 검토를 통하여 사용 중인 LS-DYNA3D 해석코드와 해석기법의 타당성을 검증하였다.

LS-DYNA3D의 AMME 기법과 함께 Grouping 알고리즘을 적용함으로써 정밀도 높은 해를 얻을 수 있었으며 동시에 해석영역에 관계없이 적은 요소로 해석이 가능하였다. 압력측정지점 선정의 중요성을 실험데이터와의 비교를 통해 알 수 있었으며 쇠과 등의 정확한 유체 거동도 충분히 구현할 수 있었다. 수면낙하 수치시뮬레이션에서 라그랑지안 요소와 오일러리안 요소의 상관관계의 검토를 통해 요소의 크기는 작을수록, 두 요소와의 비율이 같을 경우, 박스 모델과 자유수면 사이의 공기층 수는 4개 이상일 경우, 공기층의 요소가 정육면체가 될수록 수치해석 시뮬레이션 결과가 수면낙하시험 결과와 잘 일치하다는 것을 알 수 있었다.

위의 연구를 통하여 보다 새롭고 효과적으로 유체-구조 연성문제를 해석할 수 있는 계기를 마련할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 노병재, 안호중, 하재근, 2006, "멤브레인 LNG 운반선의 화물창 기술개발 동향," 기술현대중공업, Vol. 25, No. 4, pp. 111~118.
- [2] Belvins, R., 1995, "Formulas for Natural Frequency & Mode Shape, Frierger Publishing Corporation.
- [3] Verhagen, J.H.G. and van, Wijngaarden, L., 1965, " Nonlinear Oscillations of Fluids in a Container," J. Fluid Mech. Vol. 22, Part 4, pp. 537~571.
- [4] Faltinsen, O.M., 1974, "A Non-Linear Theory of Sloshing in Rectangular Tanks," J. of Ship Research, Vol. 18, No. 4, pp 224~241.
- [5] 이동연, 1998, "유탄성을 고려한 탱크내 슬로싱에 관한 연구," 서울대학교 석사학위논문.
- [6] Lee, Y.B., Lee, J. M., Kim, Y.S., Jung, J.H., Jung, D.W. and Kwon, S.H., 2006, "An Experimental Study of Impulsive Sloshing Load Acting on LNGC Tank," Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 193~198.
- [7] Chung, J.Y., Kwon, J.H., Ha, M.K., Bang, C.S., Lee, J.N. and Kim, J.J., 2006, "Wet Drop Test for LNG Insulation System," Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, pp. 199~204.
- [8] LSTC, 2003, LS-DYNA3D User's Manual, Version 970, Livermore Soft Technology Corporation, USA.
- [9] MSC/Software, 2005, MSC/DYTRAN User's Manual, Version 2005, The MacNeal Shwendler Corporation, USA.
- [10] Mitsuyasu, N., Shinichi, N. and Yukiharu, T., 1992, "A 3-Dimensional Analysis of Sloshing by means of Tank Wall Fitted Coordinate System," Journal of the SNAK of Japan, Vol. 172, pp. 487-499.
- [11] Arai, M., 1984, "Experimental and Numerical Studies of Sloshing Pressure in Liquid Cargo Tanks, Journal of the SNAK of Japan, Vol. 155, pp. 114-121.
- [12] Nakayama, T. and Mori, M., 1996, "An Eulerian Finite Element method for time-dependent free-surface problems in hydrodynamics," International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 22, pp. 175-194.
- [13] Hallquist, J.O., 1998, LS-DYNA theoretical manual, Livermore Software

Technology Company.

- [14] 한익승, 2003, "ALE를 적용한 가변 유체력을 받는 구조물의 동적 거동해석에 관한 연구," 서울대학교 공학석사 학위논문.
- [15] Ma, J. and Usman, M., 2004, "Modeling of Fuel Sloshing Phenomena Considering Solid-Fluid Interaction," The 8th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, pp. 15~20.
- [16] Olovsson, L. and Souli, M., 2000, "ALE and Fluid-Structure Interaction Capabilities in LS-DYNA," The 6th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, pp. 37~46.
- [17] Souli, M., Wang, J., Do, I. and Hao, C., 2004, "ALE and Fluid Structure Interaction in LS-DYNA," The 8th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, pp. 39~44.
- [18] Souli, M., 2003, "Fluid-Structure Interaction in LS-DYNA", The 4th European LS-DYNA Users Conference, Ulm, pp. 35~42.
- [19] Vesenjak, M., Mullerschon, H. and Hummel, A., 2004, "Simulation of Fuel Sloshing - Comparative Study," LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, pp. 1~8.
- [20] Souli, M., 2004, "LS-DYNA Advanced Course in ALE and Fluid/Structure Coupling," Livemore Software Technology Corporation, pp. 55~71.
- [21] Aquelet, N. and Souli, M., 2003, "A new ALE formulation for sloshing analysis," Structural Engineering and Mechanics, Vol. 16, No. 4, pp. 1~18.
- [22] Aquelet, N., Souli, M. and Olovsson, N., 2005, "Euler-Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, pp. 110~132.

## 감사의 글

어느덧 대학원에 입학한지 2년이라는 시간이 흘러 졸업을 앞두고 되었습니다. 뭔가를 마무리 한다는 것은 시원하기도 하면서 아쉽기도 합니다. 지난 5년간의 학부와 대학원 생활을 돌아보면 제가 감사해야 할 분들이 너무나 많이 떠오릅니다. 먼저 부족한 저에게 처음이나 지금이나 늘 한결같은 모습으로 호된 꾸지람과 함께 격려를 아끼지 않으시며 많은 것을 깨닫게 해주신 이 상갑 교수님께 머리 숙여 감사드립니다.

또한 본 논문을 위해 끝까지 세심한 심사와 조언을 아끼지 않으신 현 범수 교수님과 조효제 교수님께 감사드리며, 학위과정 중 여러 가지 도움과 격려를 주신 해양시스템공학부의 교수님들께 감사드립니다.

학문적인 토론이나 인생에 대해 함께 얘기하며 힘이 되어준 우열이형, 정일이형에게도 깊은 감사를 드리며 학부 때부터 힘든 실험실 생활 속에서도 같이 고생했던 정대, 여훈, 승영에게도 고맙다는 말과 수고했다는 말을 함께 전하고 싶습니다. 그리고 항상 옆에서 많은 도움을 주며 항상 웃게 만들어주었던 정오와 언주에게도 고마움을 전합니다.

저의 졸업을 기다리며 항상 옆에서 격려해 주던 친구 철호, 주성, 종국, 윤주, 석재, 경원, 황, 미정, 승훈에게 감사드리고 주현이형, 정원이형 등 너무 많아 실지 못한 동아리 선후배에게도 감사드립니다.

생각해보면 더 많은 분들이 저에게 도움을 주셨을 것입니다. 살아가면서 기억하고 감사하는 마음을 가지는 것이 중요하다고 생각합니다. 항상 감사하며 겸손한 자세로 살아가도록 하겠습니다.

마지막으로 부족한 아들을 항상 옆에서 믿고 격려해주신 부모님께 감사드립니다.