

# LNG 화물창 단열구조의 슬로싱 충격응답 간이해석법에 관한 연구

노인식<sup>1,†</sup> · 기민석<sup>1</sup> · 김성찬<sup>2</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>1</sup>  
인하공업전문대학 선박해양시스템과<sup>2</sup>

## A Study on Simplified Sloshing Impact Response Analysis for Membrane-Type LNG Cargo Containment System

In Sik Nho<sup>1,†</sup> · Min-Seok Ki<sup>1</sup> · Sung-Chan Kim<sup>2</sup>  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>1</sup>  
Department of Ship and Ocean System, Inha Technical College<sup>2</sup>

### Abstract

To ensure structural integrity of membrane type LNG tank, the rational assessment of the sloshing impact responses of tank structures should be preceded. The sloshing impact pressures acting on the insulation system of LNG tank are typical irregular loads and the resulting structural responses show very complex behaviors accompanied with fluid structure interaction. So it is not easy to estimate them accurately and immense time consuming calculation process would be necessary. In this research, a simplified method to analyse the dynamic structural responses of LNG tank insulation system under pressure time histories obtained by sloshing model test or numerical analysis was studied. The proposed technique based on the concept of linear combination of the triangular response functions which are the transient responses of structures under the unit triangular impact pressure acting on structures. The validity of suggested method was verified through the example calculations and applied to the dynamic structural response analysis of a real Mark III membrane type insulation system using the sloshing impact pressure time histories obtained by model test.

**Keywords** : LNG CCS(LNG 화물창), Sloshing impact response(슬로싱 충격응답), Transient dynamic response analysis(동적과도응답해석), Triangular response function(삼각형 응답함수)

## 1. 서론

LNG 선박의 탱크 내부에서 발생하는 슬로싱 현상 때문에 발생하는 유체 충격력은 멤브레인형 LNG 선박의 화물창과 단열구조(Fig. 1)를 설계함에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 하중요소이다. 따라서 구조물에 작용하는 유체 충격력을 산정하기 위하여 여러 가지 이론적 접근 방법이 제안되고 있고 (Graczyk & Mban, 2008), 다양한 수치해석법의 적용이 시도되고 있다 (Yum & Yun, 2008).

이러한 여러 가지 정밀한 수치적 해석 기법, 이와 함께 실시되는 모형실험 등은 부분적으로 좋은 결과를 보이고 있지만(Nahm, et al., 2007) 수치적 해석기법은 막대한 계산 시간이 필요하며 모형실험의 경우에는 방대한 계측자료의 처리 방안, 축척 효과와 초저온에 기인하는 여러 가지 문제에 대한 명확한 해법이 아직 마련되지 못하고 있다. 실선 계측은 실험 자체가 어려울 뿐만 아니라 많은 비용이 들어 이를 일반화하여 실제 LNG 탱크의 단열구조 설계에 적용하기에는 아직 여러가지 문제점들이 남아있다.

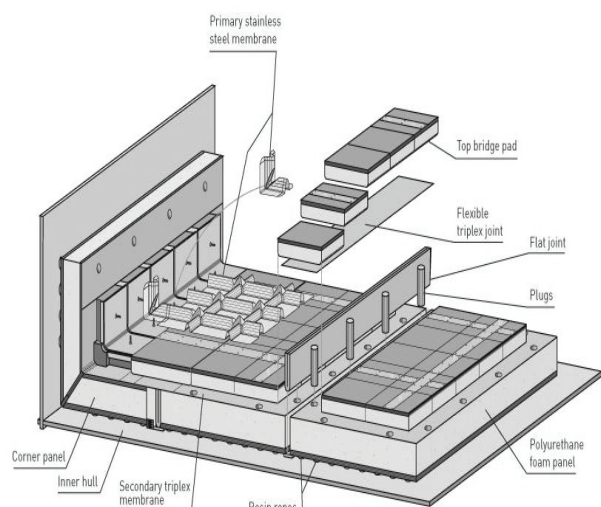


Fig. 1 Schematic view of Mark III membrane type LNG CCS(www.gtt.fr, 2009)

따라서 최근에는 모형실험으로 얻어진 방대한 유체충격압력 시간이력에 대한 단열구조 응답을 간편하게 계산하기 위하여 시간영역 과도응답해석이 적용되고 있다. 특히 ABS (2006)에서 제안한 충격압력의 시간이력을 여러 개의 삼각형 충격압력으로 분할하고, 하나의 단위 삼각형 충격압력에 대한 구조응답만을 구하여, 이를 조합하여 전체 해를 구하는 방법은 주목할 만하다.

본 논문에서는 Mark III 멤브레인 형 LNG 탱크의 단열구조의 슬로싱에 대한 구조응답을 좀 더 간편하게 계산하기 위한 2가지 방향의 연구를 정리하였다. 먼저 단열구조의 구조거동에 대한 이해를 바탕으로 합리적이고 간편한 구조해석 모델링 방안을 제시하였으며, ABS 방법을 개선하여 삼각형 응답함수를 이용한 간이해석법을 제안하였다. 이 간이 해석법과 모형실험 과정에서 계측을 통하여 얻어진 압력 시간이력을 이용하여 실제 단열구조의 시간영역 과도응답해석을 수행함으로써 이 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 단열구조의 간이 해석 모델

시간영역 과도응답해석법이 CFD(계산유체역학)법에 비해 계산량이 적은 것은 사실이지만, 3차원 단열 박스 전체를 모델링하는 경우에는 방대한 요소 수 때문에 상당한 계산량을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 대상구조물을 간단하게 모델링하기 위하여 2차원 평면문제로 이상화하는 방안과 함께 전체 모델의 일부분을 절취하여 절단부에 대칭경계조건을 적용한 부분 모델에 대해 각각 정적해석, 고유진동해석, 시간영역 과도응답해석을 수행하여 그 결과를 비교함으로써 합리적인 모델링 방안을 모색하였다.

### 2.1 해석 모델 및 경계조건

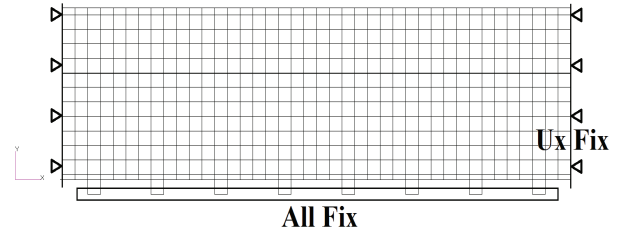
본 연구에서는 Fig. 2와 같이 하나의 단열구조 블록을 4가지 방법으로 모델링하였다. 2차원 평면 및 3차원 전체 모델, 그리고 해석 시간 단축을 위해 전체 모델에서 하나의 마스틱으로 지지되는 2차원, 3차원 부분모델(Fig. 2(b), (d))에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 마스틱 하단은 고정, 블록의 절단면은 대칭 경계조건을 적용하였다. 이때 해석결과와 요소의 크기에 따라 달라질 수 있지만 모델링 방법과 해석 기법 간의 상호 비교만을 목적으로 하여 25×25(mm)의 경우를 기준으로 하였다.

### 2.2 재료 물성치

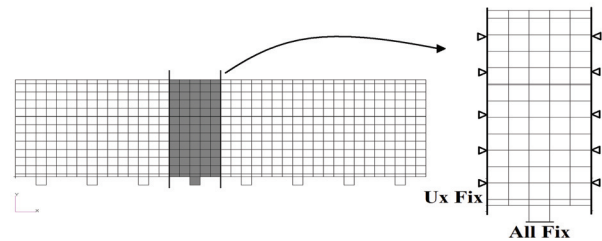
본 연구에서 적용한 Mark III 단열 구조에 사용된 재료 물성치는 Table 1과 같다. 실제로 마스틱은 등방성 재료, Plywood는 이방성 재료이고 Reinforced-PUF(이하 R-PUF)는 점탄성 재료이지만 여기서는 모델링에 따른 결과 비교에 초점을 맞춰 3가지 재료 모두 등방성으로 간주하였다.

Table 1 Material properties of MARK III membrane-type CCS

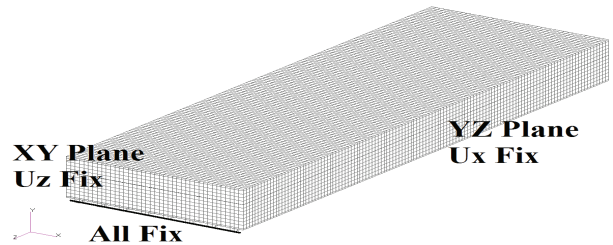
Item	E (MPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Mastic	2,880	1,500	0.3
Plywood	8,900	710	0.17
R-PUF	84	120	0.18



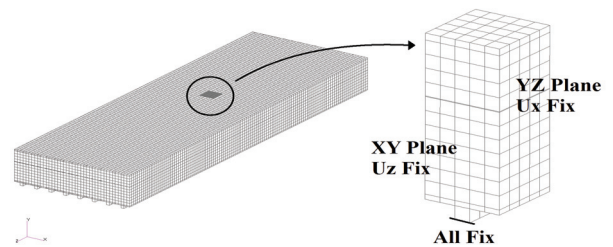
(a) 2-D full model



(b) 2-D partial model



(c) 3-D full model



(d) 3-D partial model

Fig. 2 Structural analysis modeling cases

정적해석의 경우 하중 조건은 모든 경우에 동일하게 크기 1의 단위 정압력을 적용하였고 과도응답해석은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 가장 단순한 이등변삼각형 형태의 충격하중을 적용하였다. 이때, 충격압력의 작용시간 Tduration은 단열구조의 1차 고유진동주기 Tn과의 상대적인 크기로 나타내어 Tn~Tn/16까지 5단계로 줄여 가면서 해석하고 그 결과를 비교하였다.

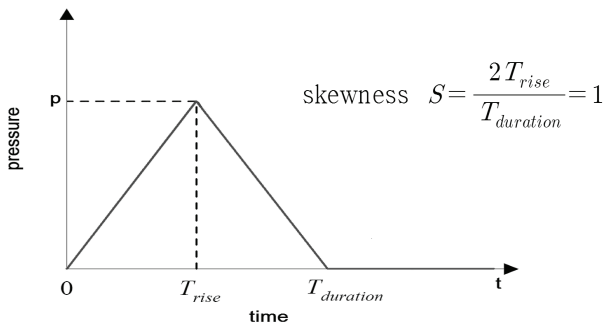


Fig. 3 Triangular impulse loading

### 2.3 해석결과 분석

4가지 해석 모델에 대하여 정적해석, 고유진동해석과 함께 과도응답해석을 수행하였다. 먼저 단위 정압력에 대하여 가장 큰 응력을 보이는 마스틱 접합부의 응력성분들과 각 모델로 계산된 1차 고유진동수를 Table 2 및 3에 정리하였다. 두 Table에서 보는 바와 같이 4가지 모델 모두 동일한 결과를 보이고 있어 부분 모델만으로도 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Table 2 Maximum static stress components of mastic under unit pressure according to analysis modeling (unit : Pa)

	2-D partial	2-D Full	3-D partial	3-D Full
$\sigma_x$	12.24	12.24	12.24	12.24
$\sigma_y$	-0.641	-0.641	-0.641	-0.641
$\sigma_z$	-	-	1.972	1.972
$\tau_{xy}$	0.759	0.759	0.759	0.759

Table 3 1st Natural frequencies according to analysis modeling

	2-D partial	2-D Full	3-D partial	3-D Full
Freq. (Hz)	653.3	653.3	653.3	653.3

다음으로 각 해석 모델에 Fig. 3과 같은 삼각형 충격압력을 가하여 시간영역에서의 과도응답을 검토하였다. 압력 작용시간을 1차 고유진동주기  $T_n$  대비  $T_n \sim T_n/16$ 으로 줄여가면서 해석하고, 이에 따른 구조거동의 변화를 살펴보았다. 작용시간이 짧아질수록 구조 거동은 거의 수렴하고 있어 Nho, et al. (2010)에서 밝힌 바와 같이 구조응답의 크기는 역적에 의존함을 확인할 수 있다. 압력 작용시간이  $T_n/16$ 일 때, 가장 큰 변형이 발생하는 단열구조 상단에서의 수직변형을 고찰한 결과 Table 4에서 보는 바와 같이 4가지 모델의 해석결과는 거의 정확히 일치하고 있다. 변형의 시간이력 역시 4 경우 모두 거의 동일하였으며 그 결과를 Fig. 4에 보였다.

이상의 해석 결과를 종합해 보면 단열구조 블록 하나를 대상으로 하여 선체 지지부의 강성을 무시한 국부적인 구조응답만을 고려한다면 4가지 모델 모두 거의 동일한 해석 결과를 주고 있기 때문에 해석 시간이라는 관점에서 보면 2차원 부분모델만으로도 효율적으로 충분히 정확한 계산이 가능한 것으로 판단된다.

Table 4 Maximum displacements according to duration time of each analysis modeling ( $\times 10^{-9}$  mm)

	2-D partial	2-D Full	3-D partial	3-D Full
$T_n$	4.542	4.543	4.544	4.544
$T_n/2$	7.003	7.003	7.004	7.004
$T_n/4$	7.524	7.524	7.547	7.547
$T_n/8$	8.122	8.122	8.164	8.164
$T_n/16$	8.354	8.354	8.403	8.403
cpu (sec.)	4.0	6.5	11.3	1,110

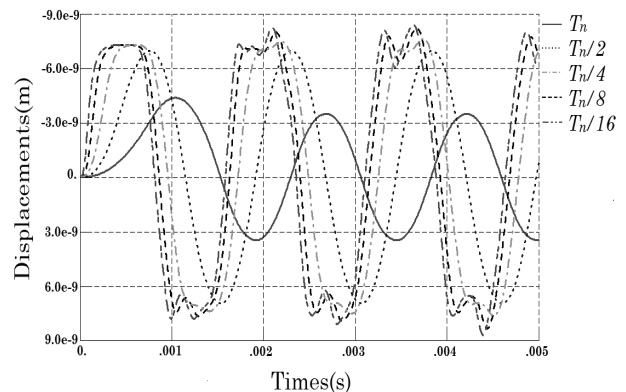


Fig. 4 Comparison of displacement time histories according to duration time of triangular impulse

## 3. 과도응답의 간이해석법

슬로싱 충격력을 받는 LNG 탱크 단열구조의 과도응답해석을 손쉽게 하기 위해 ABS에서 제안한 방법을 좀 더 개선한 간이해석법을 개발하였다. 실제 Mark III 단열구조를 대상으로 유체 충격압력 시간이력에 대한 과도응답해석을 수행하고 그 결과를 검토하였다. 해석 모델은 2장의 결론을 토대로 2차원 부분 모델을 적용하였다.

### 3.1 삼각형 응답함수

먼저 임의 형태의 압력 시간이력은 Fig. 5에 보인 바와 같이 짧은 주기의 삼각형 충격압력들의 합으로 표현할 수 있다.

$$p(t) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot p_N^i(t) \tag{1}$$

여기서,  $p_i$ 는 시간  $t=t_i$ 에서의 충격 압력 크기,  $\Delta t$ 는 시간 증분의 크기이며 동시에 압력계측 시 자료 취득(sampling) 주기로 생각할 수 있다.  $p_N^i(t)$ 는 Fig. 6에 보인 작용시간  $2\Delta t$ 의 단위 삼각형 충격압력이며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p_N^i(t) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta t}(t-t_{i-1}) & \text{when } t_{i-1} \leq t \leq t_i \\ 1 - \frac{1}{\Delta t}(t-t_i) & \text{when } t_i \leq t \leq t_{i+1} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \tag{2}$$

이때, (1)식으로 나타낸 임의 형태의 압력 시간이력에 대한 구조물의 동적과도응답  $R(t)$ 는 삼각형 응답함수(triangular response function)  $L_i(t)$ 의 선형 합으로써 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R(t) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot L_i(t) \tag{3}$$

여기서,  $L_i(t)$ 는 Fig. 6의 단위 삼각형 충격압력  $p_N^i(t)$ 가 작용할 때 단열구조의 과도동적구조해석을 통하여 구할 수 있다.

### 3.2 간이 과도응답 해석법의 타당성 확인

간단한 압력 시간이력에 대하여 Fig. 2에서 보인 2차원 부분 모델의 과도응답해석을 수행하여 3.1절의 알고리즘을 검증하였다. 단열구조에 작용하는 충격압력을 삼각형의 초기 충격압력 이후 일정 크기의 압력이 상당 시간 지속되는 Fig. 7과 같은 형태의 시간이력으로 가정하고 이에 대해 간이해석과 직접 과도응답해석을 수행하여 결과를 비교하였다.

먼저 단위 삼각형 충격압력에 대한 과도응답 즉 삼각형 응답함수를 구하기 위하여 하나의 단위 삼각형 충격압력에 대한 시간영역 과도응답해석을 수행하였다. 응답의 크기 비율이 최대 응답의  $10^{-5}$ 수준에 이르는 시간까지 해석하였고 그 이후의 응답은 모두 0으로 간주하였다. 이때 구조 감쇠비는 충격 초기의 최대 응답에 주안점을 두었으므로 큰 의미가 없으나 5%로 가정하였으며, 시간증분 크기는 정확한 결과에 수렴하는 범위에서 결정하였다.

이렇게 얻어진 삼각형 응답함수(Fig. 8)를 이용하여 전체 충격압력에 대한 구조응답을 계산하였다. 그리고 이를 전체 충격압력에 대하여 직접 해석한 응답과 비교하였고, Fig. 9에서 보인 바와 같이 거의 동일한 구조응답을 얻을 수 있었다. 두 해석 결과를 정밀하게 비교한 결과 상호 오차가  $10^{-5}$ 이내이므로 간이 해석 알고리즘의 타당성이 확인되었다.

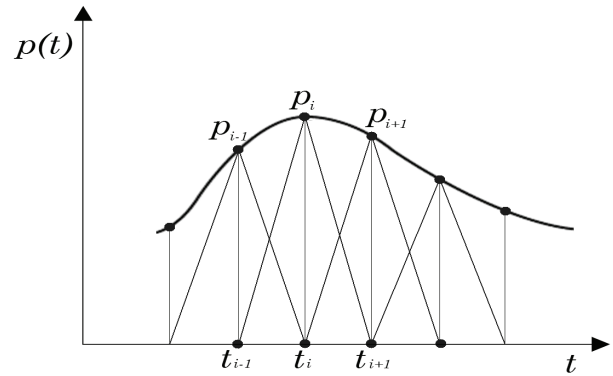


Fig. 5 Synthesis of a pressure time history by unit triangular impulses

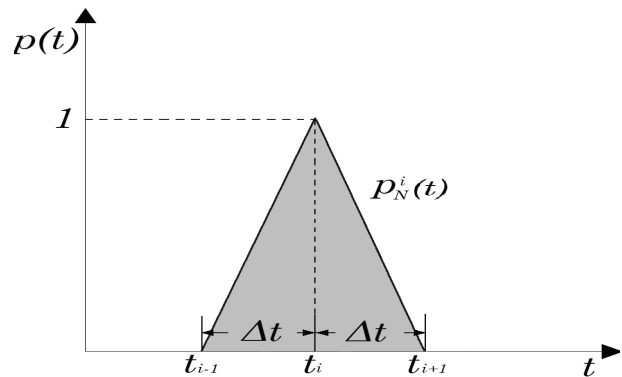


Fig. 6 Unit triangular impulse  $p_N^i(t)$

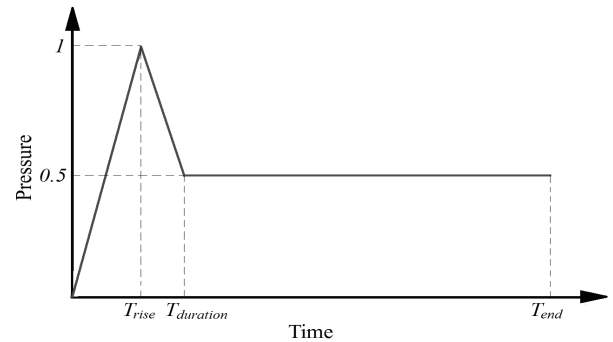


Fig. 7 Impact pressure curve with constant tail

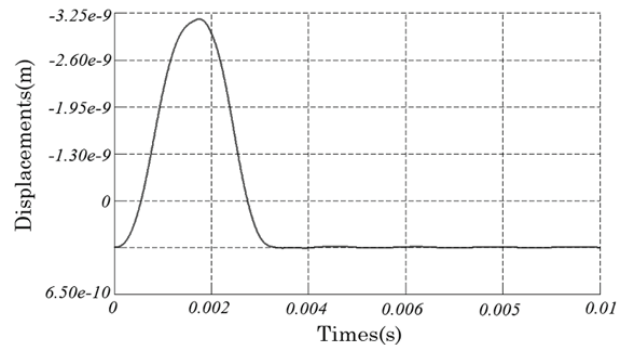


Fig. 8 Triangular response function by unit triangular pressure impulse

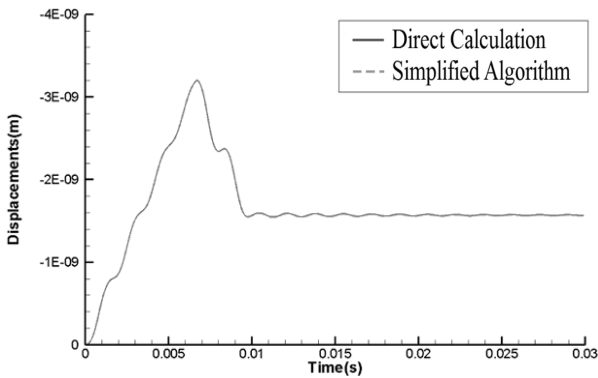


Fig. 9 Comparison of responses simplified algorithm and direct analysis

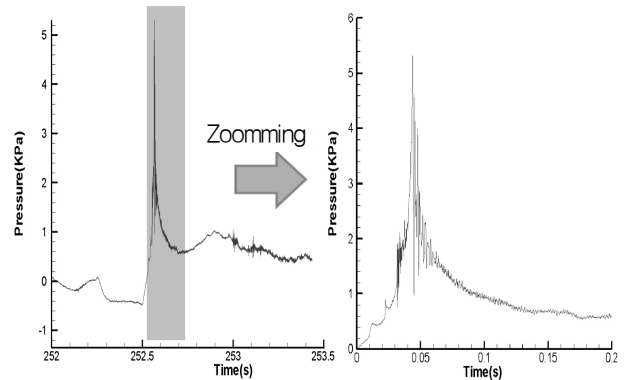


Fig. 10 Pressure response of sloshing model test

### 4. LNG 탱크 단열구조의 과도응답해석

1/50 축척(축척비  $\lambda=50$ )의 모형실험(20% low filling level)을 통해 얻어진 탱크 유체 충격압력의 시간이력 중 일부를 이용하여 과도응답해석을 수행하였다. 20% filling level에서 300초 동안 계속된 탱크하부의 압력 시간이력 중에서 최대 압력을 나타내는 구간(Fig. 10)을 선정하여 과도응답해석을 수행하였다. 모형실험 계측자료를 실선으로 확장하기 위하여 축척법칙을 적용한다. 여러 가지 연구결과들이 발표되고 있으나 우선, 해석의 편의를 위하여 가장 광범위하게 받아들여지고 있는 비압축성 유체의 Froude 축척법칙을 적용하여 단위 삼각형 충격압력의 작용시간  $T_{duration}$ 을 결정하였다. 이때, 모형실험에서 압력의 자료취득 주기는 0.0001초이므로 단위 삼각형 충격압력의 작용주기는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta t = T_{duration}/2 = 0.0001 \times \sqrt{\lambda} = 0.000707 \text{ sec.}$$

다음 단계로서, 단위 삼각형 충격압력에 대한 삼각형 응답함수를 구하기 위하여 시간분분 크기를  $\Delta t/20$ 으로 하여 동적응답해석을 수행하였다.

Fig. 11에 3.1절의 알고리즘을 사용한 간이 과도응답해석 결과와 직접계산에 의한 과도응답해석 그리고 동적 관성 효과를 배제한 준 정적해석을 수행하여 계산된 변위의 시간이력을 상호 비교하여 보였다. 3가지 해석법의 결과가 거의 동일함을 확인할 수 있으며 이것으로 간이 해석법의 타당성은 다시 한 번 입증된 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 10의 압력 시간이력과 Fig. 11 변위 시간이력의 형태가 유사하며 이것은 충격 압력에 의한 단열 시스템의 과도 응답이 동적 효과가 거의 없는 준정적 거동임을 의미한다. 이는 모형실험에서 압력계측의 자료 취득 간격이 단열구조의 고유진동 주기에 비하여 너무 길기 때문에 단열구조 거동의 관점에서 본다면 거의 준 정적 압력으로 표현되고 따라서 충격응답의 동적인 효과를 고려할 수 없기 때문으로 판단된다.

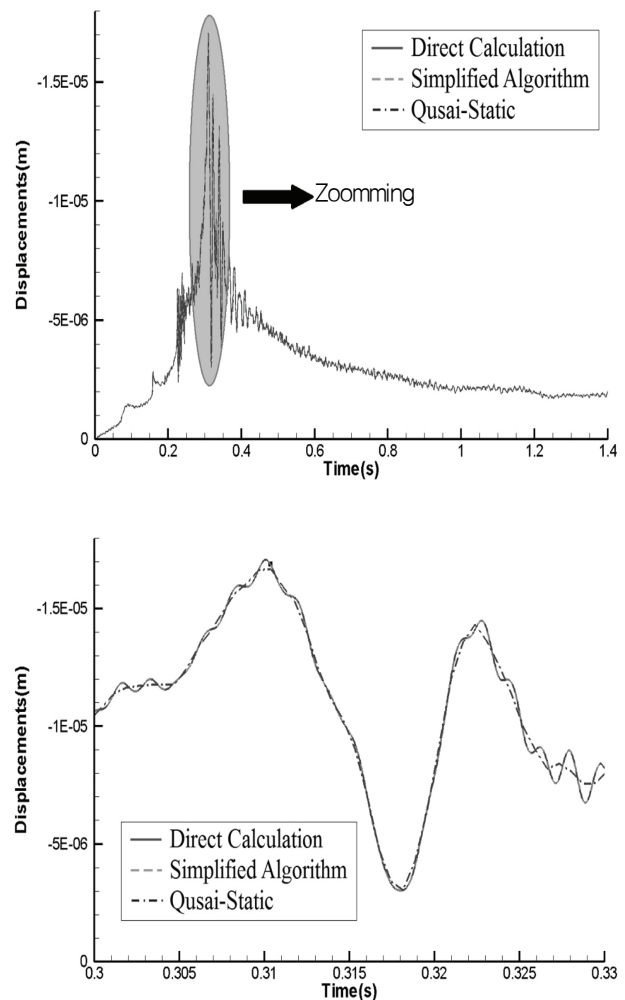


Fig. 11 Displacement responses of 3 analysis approaches

본 연구에서는 단열구조 자체만을 모델링함으로써 지지부족 선체구조의 탄성지지 영향을 고려하지 않았기 때문에 구조 응답 역시 선체를 포함한 전체 구조물의 변형과 연관된 응답의 영향을 무시하고 있다는 것도 문제점으로 지적될 수 있다. 차후 모델링 범위를 넓혀 선체 구조의 탄성지지 효과를 고려한다면 좀 더 현실적인 연구결과가 얻어질 것으로 보인다.

## 5. 결 론

Mark III LNG 탱크 단열구조의 유체충격 응답을 간편하게 해석하기 위하여 여러 가지 모델링에 의한 해석 결과를 비교 검토함으로써 최적의 모델링 방안을 제안하였다. 또한 단열구조의 시간영역 과도응답을 간편하게 해석하기 위하여 삼각형 응답함수를 이용한 간이 해석법을 제안하였고 이 알고리즘을 이용한 과도응답해석을 수행하여 제안된 해석 알고리즘의 효율성과 타당성을 확인하였다. 또한, 실제 1/50 축척 모형실험에서 얻어진 압력 시간이력을 간이 과도응답해석법을 적용하여 가능성을 확인하였다.

본 연구에서 제안된 간이해석법의 장점은 한 번 단위 삼각형 충격압력에 대한 삼각형 응답함수를 구해 두면 임의의 충격압력에 대한 구조응답을 손쉽게 구할 수 있기 때문에 슬로싱에 대한 단열구조의 구조안전성을 평가할 때 정밀 유탄성 해석기법을 적용하기 전 단계에서 모형시험에서 얻어진 방대한 압력 시간이력의 계측 자료 중에서 관심 대상 부분을 선별하는 수단으로서 그 효율성을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “LNG 관련 선박 또는 해양구조물의 탱크 설계를 위한 슬로싱 해석 기술 개발 및 관련 인프라 구축(10033656)”과제로 수행된 결과의 일부입니다.

## 참 고 문 헌

- ABS, 2006. Guidance note on Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems under Sloshing Loads.
- Graczyk, M. & Moan, T., 2008. A Probabilistic Assessment of Design Sloshing Pressure Time Histories in LNG Tanks. *Ocean Engineering*, 35, pp.834-855.
- Nahm, J.O. et al., 2007. An Experimental Study on Slamming Phenomenon by Forced Impact. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 21(1), pp.40-44.
- Nho, I.S. Lee, J.M. Yeom, C.W., 2010. A Fundamental Study for Time History Modeling of Fluid Impact Pressure. *Journal of the society of Naval Architecture of Korea*, 47(2), pp.242-247.
- Yum, D.J. & Yoon, B.S., 2008. Numerical Simulation of Slamming Phenomena during Water Entry of 2-D Wedges. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.477-486.

