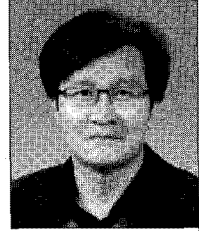


# 조선해양공학 분야에서의 슬로싱 문제

## Sloshing Problem in Ships and Offshore Structures



김용환\*

\* 선박해양성능고도화 연구사업단 단장, 로이드기금 선박유탄성 연구센터 센터장, 서울대학교 조선해양공학과 부교수

### 1. 문제의 정의

슬로싱(sloshing)이란 용기 내에 부분적으로 차 있는 액체가 용기의 운동에 의해 움직이는 유동을 칭하는 말이다. 우리가 매일 마시는 물 컵에서의 유동이 바로 슬로싱 현상인 것이다. 이러한 슬로싱 현상은 여러 공학분야에서 관심의 대상이 된다. 예를 들어 액체연료를 사용하는 미사일 및 우주발사체의 연료 탱크를 위해서는 슬로싱 현상에 대한 고려가 필수적이다. 비행 중 액체를 소모하며 부분적으로 차게 되는 연료탱크 내부에서 슬로싱으로 인해 용기 자체에 힘이나 모멘트를 발생시키고, 결국 비행궤적을 바꾸게 되는 요인이 될 수도 있기 때문이다. 또한, 슬로싱 유동으로 인한 압력장의 변화는 균일한 연료분사를 방해하는 요인이

되기도 한다.

이러한 슬로싱 현상은 액체화물을 적재하는 선박 및 해양구조물의 설계에 있어서도 반드시 고려되어야 하는 문제이다. 조선해양공학 분야에서의 슬로싱 문제는 크게 두 가지 관점에서 연구의 대상이 된다. 우선, 선박이나 해양구조물의 운동과 관련된 연성효과의 문제이다. 단순하게는 탱크 내 부분적으로 적재된 액체화물의 자유표면 효과로 메타센터의 높이가 바뀌는 정적인 문제에서부터, 미사일이나 우주비행체의 경우처럼, 탱크 내부에서 슬로싱이 유기하는 힘과 모멘트가 물체의 파랑 중 동적운동특성을 변화시키는 복잡한 경우에 까지 이르게 된다. 슬로싱과 관련한 두 번째 주된 관심은 슬로싱이 유기하는 충격압력의 발생과 관련된 구조적 손상 위험성 문제이다. 이 문제는 최근 많은 관심을

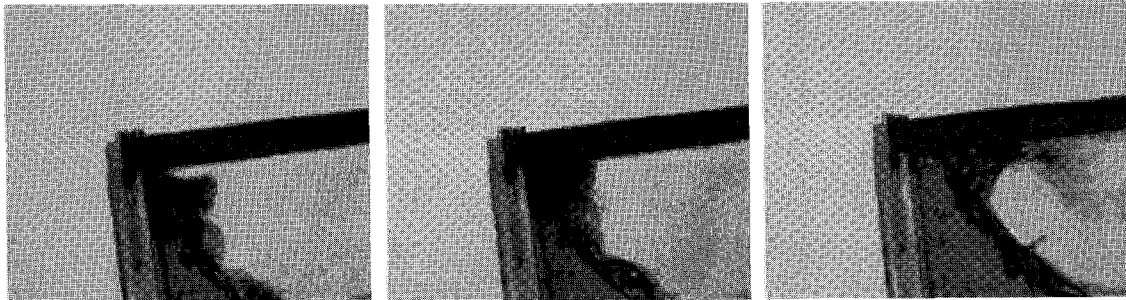


그림 1 슬로싱 유동으로 인한 충격발생의 예

받고 있는 조선해양공학 분야에서의 슬로싱 문제이다. 탱크의 움직임이 내부 유동과 공진하는 경우에 이르게 되면, 심한 유동으로 인해 탱크 벽면에 충격적 특성의 유체 동압력을 발생시키고, 이러한 충격하중은 탱크내부를 이루는 구조물에 심한 손상을 일으킬 가능성이 높다. 특히, 최근 대형 LNG선이나 해양구조물의 증가로 인해 화물창 크기가 증가하고 이에 따라 슬로싱 충격압력 또한 커짐에 따라 대단히 많은 관심을 끌고 있다.

본 기고에서는 조선해양공학 분야의 슬로싱 문제에서 현재 가장 관심이 되고 있는 슬로싱 충격하중과 관련된 여러 문제들의 일반적인 내용들에 대해 간략히 언급한다.

## 2. 선박해양 분야에서의 최근 해석요구 증가

최근 선박이 대형화되는 추세는 확연하다. 그림 2는 최근 5년간 국내 조선산업체들이 건조한 대형 LNG 운반선의 척수를 선박의 적재용량에 따라 정리한 것이다. 2005년의 경우 150,000m<sup>3</sup>이하의 용량을 가지는 선박이 전체인 것이 비해 2009년에는 거의 모든 선박이 이보다는 더욱 대형화되었으며, 심지어 250,000m<sup>3</sup>를 넘는 용량의 선박들이 건조되고 있다. 이러한 선박의 대형화에 비해 LNG 화물창의 수는 4개 혹은 5개를 그대로 유지하고 있으며, 이는 결국 화물창의 대형화를 의미한다.

최근 건조되는 이러한 대형 LNG 운반선들은 여러 장점으로 인해 거의 대부분 멤브레인 형태로 지어지고 있는데, 멤브레인 형태도 단열구조물의 재질 및 배치에 따라 MARK III와 NO.96의 두 가지 종류가 가장 널리 건조되고 있다. 그런데, 이러한 멤브레인 형상의 탱크는 형상의 특성상 슬로싱으로 인한 충격압력의 발생 가능성이 매우 높으며, 실제로 운항 선박들의 손상사례들이 최근 보고되고 있는 상황이

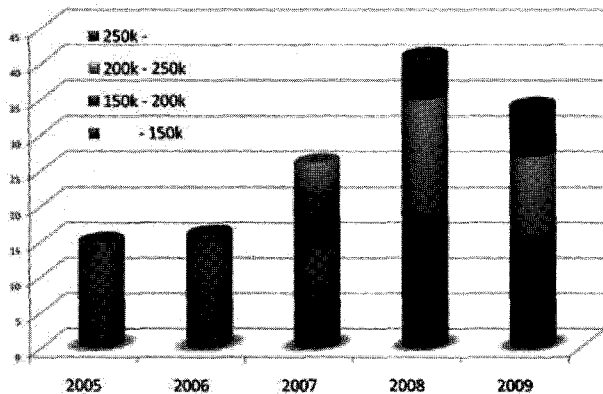


그림 2 최근 한국 조선소들의 LNG 운반선 크기별 건조척수 (단위: 10000m<sup>3</sup>)

다. 일반적으로 슬로싱 유동이 발생하는 동적인 압력은 특성길이와 특성길이의 제곱근 사이의 범위에서 비례한다고 알려져 있다. 따라서, 최근의 선박 대형화, 즉 화물창 크기의 대형화는 결국 슬로싱 압력의 증가를 초래하게 된 것이다.

적재높이를 제한할 수 있는 선박과 달리, LNG 화물창을 필요로 하는 LNF-FPSO, FPSO, FSRU 등과 같은 해양구조물의 경우에는 화물창 내부의 적재깊이에 제한을 둘 수 없다. 또한, 황천시 혹은 슬로싱 공진이 일어나는 해상상태를 피할 수 있는 선박과 달리 이들 해양구조물은 해상에서 발생하는 모든 조건을 견디어야 한다. 이러한 환경은 슬로싱 유동의 공진현상을 겪을 가능성을 더욱 높여준다. 이러한 해양구조물의 신규 시장 형성은 분명하며, 따라서 슬로싱 현상에 대한 해석 요구는 더욱 늘어나고 있는 실정이다.

## 3. 슬로싱 충격하중과 관련된 주요 핵심문제

슬로싱으로 인한 충격하중 현상과 관련하여 핵심적인 것은 충격압력의 크기 및 시계열에 대한 정확한 예측과 이러한 충격압력에 대한 탱크 내부 구조물의 구조응답 해석이다. 슬로싱 해석의 주요 핵심내용들이 대부분 이러한 문제들에 집중되어 있다. LNG 운반선 및 관련 해양구조물의 슬로싱 해석과 관련해서는 다음과 같은 대표적인 내용들이 주된 관심이다.

### 유체역학적 관점

- 충격압력발생 가능성에 대한 예측
- 충격압력계측 실험 및 통계해석
- 축척효과(scale effect)
- 수치계산을 이용한 슬로싱 유동해석 및 충격압력 예측
- LNG의 유체 특성을 고려한 실험 및 계산
- 선박 혹은 해양구조물의 운동과 연성된 슬로싱 해석

### 구조역학적 관점

- 충격압력의 크기, 형상 및 지속시간의 모델링
- 충격하중에 대한 복합 단열구조물의 동적 구조응답 해석
- 유탄성 효과 및 해석 모델링
- 단열복합재의 저온 물성치 및 온도 영향
- 단열구조물의 동적충격하중에 대한 구조강도 및 안전성 평가
- 설계적용 기술, 설계 및 운항 지침

#### 4. 최근 기술동향

최근 슬로싱 현상의 해석을 위한 여러 노력들이 경주되고 있는데, 많은 문제의 특성상 유체역학적 관점에서 이루는 연구들이 전체 기술개발을 선도하고 있는 상황이다. 슬로싱 유동 현상을 규명하고 이로부터 충격압력을 예측하고자 하는 노력은 크게 두 분야, 유동 수치계산 및 실험계측에서 이루어지고 있다. 특히, 최근 전산유체역학의 발달에 힘입어 수치계산을 이용한 슬로싱 유동현상 모사에 많은 노력들이 있고, 여러 기법 및 상용프로그램을 이용한 결과들이 소개되고 있으나 현실적인 적용에 아직도 많은 한계

를 가지고 있다. 이에 비해 실험적 연구는 고가의 장비와 정확도 구현의 어려움 등으로 인해 현실적으로 일부 기관들에서만 가능하다.

최근, 선박의 대형화 추세에 따른 실험장비의 대형화도 진행되어(그림 3 참조) 2008년 GTT가 6톤용량의 실험장비를 설치한 바 있고, 중국이나 한국에서도 장비의 설치가 계속 이루어지고 있다. 그러나 축척효과에 대한 불확실성 등과 같이 모형실험에 대한 한계 또한 분명한 상황이므로 이를 극복하기 위한 노력들이 경주되고 있다. 최근 실험의 대형화 추세를 잘 나타내는 것이 DNV의 1/10축척 실험 및 GTT와 BV가 주도하고 있는 SLOSHEL 과제의 실험이다.

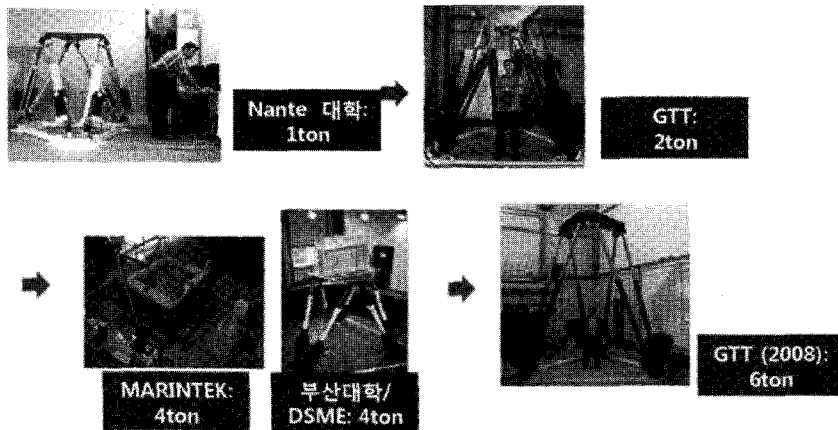


그림 3 슬로싱 실험장비의 대형화 추세

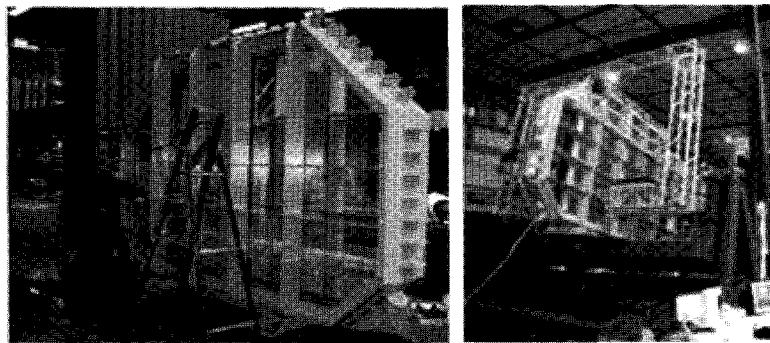


그림 4 DNV에 수행된 1/10 축척의 2차원 실험 (ComFlow II 과제, 2007)



그림 5 토목수조에서의 충격압력 발생 실험 (SLOSHEL 과제, 2009)

국내의 경우, 한국가스공사의 주도로 수년간 진행된 한국형 화물창 설계를 위한 연구과제를 통해 여러 연구들이 진행된 바 있으며, 대우조선해양공업(주)의 지원으로 부산대학교 내에 4톤 용량의 강제동요장치가 설치되어 있고 낙하실험도 가능하다. 최근 지식경제부의 산업원천기술개발 사업으로 서울대학교에 8~10톤 용량의 대형장비가 설치될 예정이어서 국내 산업체의 자체적 노력과 더불어 국내 연구가 더욱 활발해질 것으로 예상된다.

슬로싱으로 인한 화물창 단열구조물의 구조응답에 대한 연구는 문제의 특성 상 유체역학적 노력보다 상대적으로 적극적이지 못한 상황이다. 하지만, 수면으로의 낙하실험(wet-drop test) 등과 같이 구조물에 가해지는 충격압력에 대한 유탄성을 고려한 동적응답을 확인하려는 노력들이 꾸준히 이루어지고 있으며, 이러한 연구를 통해 세계 주요 선급들은 자체적인 구조해석 지침들을 발표하고 있다. 특히, 1980년대 초반 이후 큰 주목을 받지 못하던 통계기법에 기초한 설계하중의 추정기법들이 Exxon-Mobile 등과 같은 기관들의 제안에 의해 다시 많은 관심대상으로 떠오르고 있다. ABS 선급의 damage factor 나 로이드선급의 DLF, Exxon-Mobile에서 정의하는 유효압력(effective pressure) 등이 모두 이러한 통계적 해석을 전제로 발전된 개념들이다.

### 5. 충격압력 해석기법

현재 조선해양분야의 슬로싱 문제의 가장 핵심적 내용은 충격압력의 시간적 특성과 공간적 특성을 제대로 예측하는 것이다. 최근 수치계산기법 및 전산기의 발달과 함께, 비선형성이 강한 슬로싱 유동을 직접 수치적으로 모사하려는 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. 특히, CFX, FLUENT, FLOW3D, LS-DYNA 등 상용 프로그램을 이용한 해석들이 증가하고 있는데, 모든 연구결과들이 의미를 지니는 것은 아니며 슬로싱

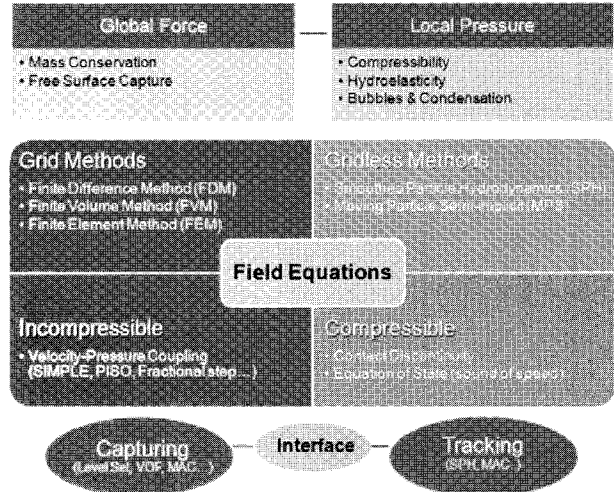


그림 6 강한 비선형 슬로싱 운동의 모사를 위한 수치유체해석 기법 요약

문제의 물리적 현상에 대한 충분한 이해가 부족한 상태에서 수치계산 결과만을 살펴보는 경우도 빈번히 나타나고 있다.

현재까지는 수치계산 기법보다는 모형실험을 통해 예측된 슬로싱 충격압력을 구조안정성 평가나 화물창 설계를 위한 자료로 활용하는 것이 일반적이다. 이는 정확한 실선에서의 압력계측이 이루어지지 않았기 때문에, 아직까지는 상대적인 압력비교를 통해 구조적 안전성을 평가하는 방법이 주로 적용되기 때문이다. 실험을 통한 충격압력의 추정 기법에서는 앞서 언급한 바와 같이 대형화가 진행되고 있다. 특히, 2008년부터 진행되고 있는 SLOSHEL 과제는 실선 크기의 실험을 위해 토목수조에서 파를 발생시키고 이를 반대 벽면에 파를 집중하도록 하는 방법으로 슬로싱의 충격압력을 모사하려는 노력을 한 바 있다. 이 때 파력에 노출된 위치에 NO.96의 단열구조를 설치하고 압력을 계측하였는데, 이로부터 flip-through 현상이 발생할 때 가장 큰 충격압력이 발생한다는 것을 보여준 바 있다.

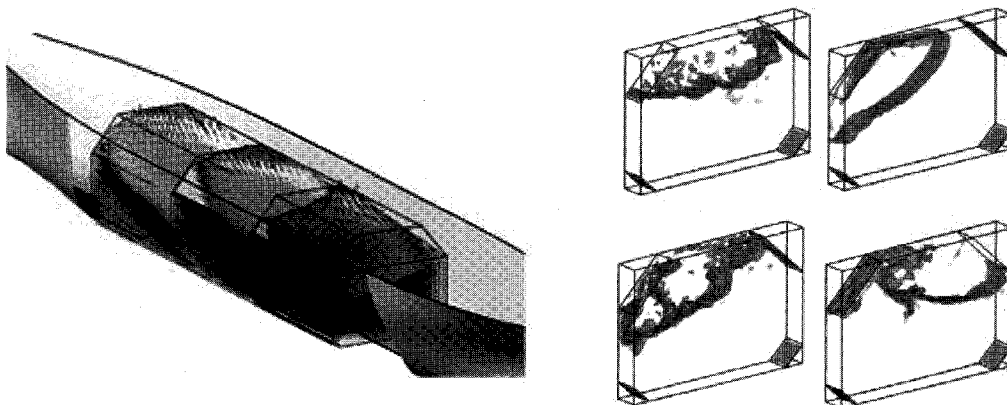


그림 5 수치기법을 이용한 슬로싱 유동 모사의 예

일반적으로 슬로싱 모형실험에서는 대상 선박이 실제 해상상태에서 겪는 운동을 적용하기 위해 장시간의 불규칙 운동을 모형탱크에 적용하고 이로부터 예측된 압력 신호를 받아 그 결과를 분석하게 된다. 최근 이러한 불규칙한 시계열(time history)이 포함하는 충격압력의 크기와 발생시간을 보다 체계적인 통계기법을 적용하여 해석하려는 노력이 진행되어, Weibull 분포나 Pareto 분포 등과 같은 수학적 통계모델을 적용한 장단기 초과확률 값들을 구하고 있다. 일반적으로 알려진 사실은 충격압력의 최대치가 빨리 일어날수록, 즉 소위 말하는 rising time이 짧을수록, 압력의 고점(peak)이 높은 경향을 보인다는 것이다. 그러나 이러한 통계해석에 있어 모든 충격압력이 의미가 있는 것은 아니다. 또한 구조응답의 관점에서는 충격압력의 고점들만 중요한 것은 아니다.

동일한 모형과 운동조건에 대한 실험결과와 계산결과를 비교하고 이로부터 충격압력 예측의 정확도를 높이려는 노력은 최근 들어 단편적으로 이루어지고 있으며, 이러한 노력은 큰 의미를 지닌다. 이러한 비교가 가능하든 것은 계산

과 실험 분야 모두 비교가 가능한 정도의 수준이 되었음을 의미하기 때문이다. 그러나, 현재까지는 누구나 자유롭게 사용할 수 있는 공개된 실험결과가 대단히 한정적이기 때문에 더욱 많은 실험자료의 확보가 필요한 실정이다. 예를 들어, 그림 8은 2009년 ISOPE 학회의 일부로 개최된 제 1차 Slushing Dynamics Symposium에서 공개된 여러 수치계산의 결과와 실험결과를 비교하고 있다. 이 비교연구에서는 최근 사용되는 여러 상용 및 in-house 프로그램들의 결과들이 실험결과와 비교된 바 있는데, 아직까지는 서로 차이가 많은 결과들을 보여준 바 있다.

모형실험의 결과를 실선으로 확장하는 축척방법은 아직까지도 분명한 정답이 제시되지 못한 상태이다. 이 점은 모형실험의 활용성이 아직까지는 제한적인 가장 근본적인 이유이다. 일반적으로 짐작이 되고 있는 것은 비압축성을 가정한 Froude 법칙이나 압축성을 가정한 Froude 법칙을 따르는 두 가지 해석결과의 범위에서 압력축척이 가능하다는 정도인데, 이 두 경우의 차이가 적지 않기 때문에 현실적 적용의 어려움이 존재한다. 이러한 축척효과의 정확한 이해는 앞으

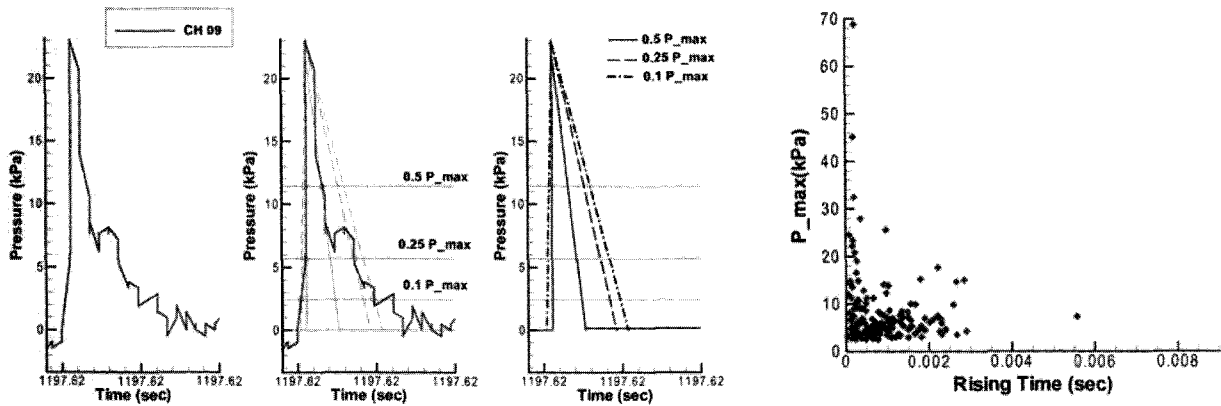


그림 7 충격압력 시계열 모델링 및 rising time과 압력 고점들의 분포 예 (Kim 등, 2010)

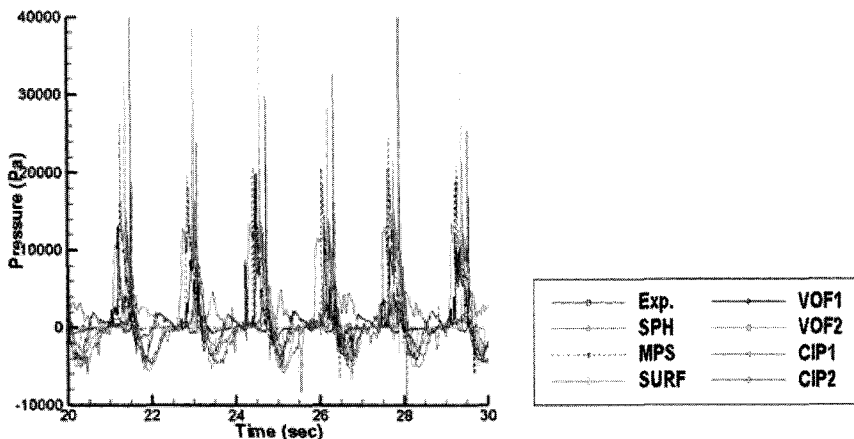


그림 8 다양한 수치계산 결과 및 실험결과의 압력 시계열 비교 (2009년 ISOPE, Slushing Dynamics Symposium)

로도 당분간 풀리지 않을 속제로 남을 것으로 보이지만, 유체의 특성과 구조의 유탄성 효과에 대한 이해가 많아질수록 점차 정확한 실선으로의 확장기법이 개발될 것이다.

### 6. 구조해석 및 안전성 평가

현대 멤브레인 형태의 LNG 화물창은 그림 7과 같은 NO.96와 Mark III의 두 가지 형태가 일반적이다. 두 구조물 모두 단열을 위한 복합재질로서 탱크 내부는 영하 164도 정도로 유지된다. 슬로싱 충격현상에 대한 구조해석은 바로 이러한 저온에서의 물성치를 고려하여 대단히 짧은 시간동안(몇 milli-sec) 시간적으로 또한 공간적으로 변화하며 발생하는 충격하중에 대한 구조적 응답을 해석하는 것이다. 따라서, 구조해석을 위한 주요 핵심적 내용은 온도와 관련된 재질특성 파악, 동적 구조해석을 위한 충격하중의 모델링, 유체와 연성된 동적구조응답해석 등이 문제의 핵심이 된다. 또한, 이러한 구조해석이 구조의 안전성 평가 및 설계에 직접 적용되도록 이어지는 적용기술 또한 이러한 핵심기술의 범주에 포함될 수 있다.

복합단열재의 저온으로 인한 효과들에 대해서는 전문가들 사이에서도 그 중요성에 대한 이견이 있는 것으로 보인

다. 하지만, 분명한 것은 구조응답해석을 위해서는 저온에서의 복합 단열재의 물성특성치 자료가 확보가 되어 있어야 한다. LNG선 건조기업이나 이와 직접적인 관련이 있는 GTT 및 대형선급들은 저온에서의 물성치들을 이미 확보하고 있는 것이 확실하지만, 외부로의 공개는 극히 꺼리고 있다. 다만, 몇 선급들의 슬로싱 관련 지침서들에서 개략적인 내용들을 찾을 수 있다.

슬로싱으로 인한 구조응답 해석은 예전부터 해석의 단순화를 위하여 정적압력으로 치환하려는 노력들이 있어 왔다. 예를 들어 DLF(dynamic load factor) 혹은 DAF(dynamic amplification factor)라는 개념이 슬로싱 구조해석을 위하여 1980대 부터 사용되어 왔고, 이러한 개념은 현재에도 다른 유사한 개념 혹은 명칭으로 사용되고 있다. 충격적 하중의 시간 변화에 대한 구조의 동적응답은 충격하중의 지속시간에 결정적으로 좌우되며, 특히 구조물의 고유진동 주기와 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 따라서, 앞서 언급한 바 있는 충격압력의 시계열의 적절한 모델링은 구조운동의 응답관점에서는 대단히 결정적일 수 있다. 최근, 전산구조해석기법이 충분히 동적해석을 위해 활용될 수 있는 상황이고, 따라서 자연스럽게 3차원 동적해석들이 진행되고 있어, 더욱 정확한 비선형 동적 구조거동을 살펴볼 수 있다.

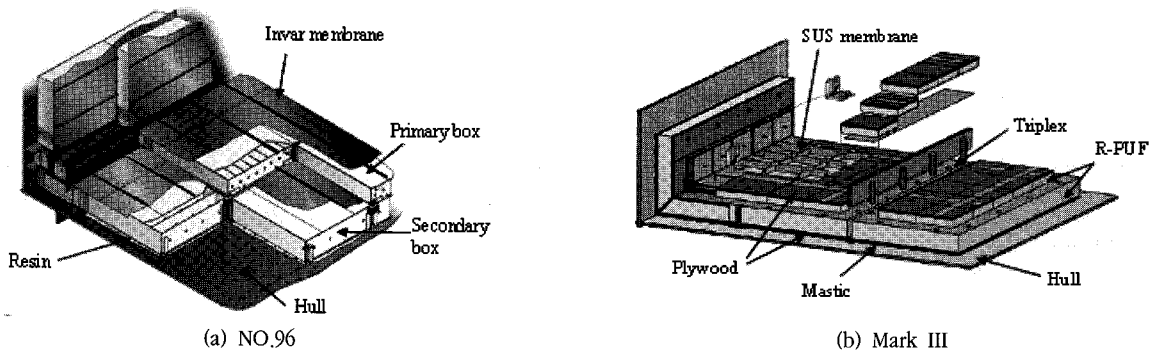


그림 8 LNG 화물창의 단열구조

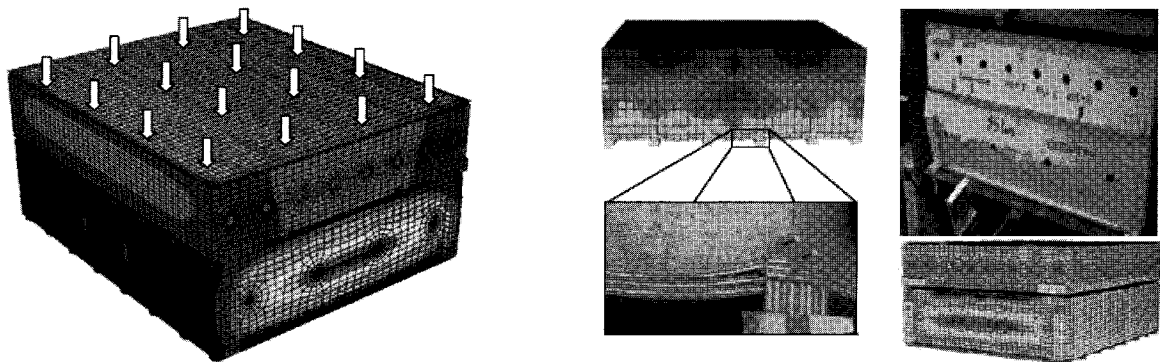


그림 9 NO.96에 대한 비선형 FE 해석 및 검증 예 (Exxon-Mobile, 2009)

슬로싱과 관련된 동적 구조응답해석에 있어 유탄성의 고려는 반드시 필요한 부분이다. 최근 진행된 SLOSHEL 과제에서도 이러한 유탄성의 효과가 지극히 중요하다는 것을 다시 확인해주고 있다. 그러나, 짧은 시간이 발생하는 슬로싱 충격현상에서 대해 유동과 구조응답을 연성하여 정확하게 해석하는 수치적 기법이 아직은 충분히 성숙된 단계가 아니며, 그 결과의 검증이 쉽지 않은 상황이다. 일부 상용 프로그램(예를 들어 LS-DYNA)을 사용한 결과들이 발표는 되고 있으나, 아직은 여러 수치해석 인자들에 대한 민감도가 지나치게 높은 것으로 보인다.

슬로싱과 관련된 구조응답의 최종 목적 중 하나는 구조강도에 대한 안전성의 예측과 평가이다. 이러한 안전성평가에 있어 가장 기초가 되는 복합단열구조에 대한 구조적 극한강도를 확인하기 위한 낙하실험들도 수행된 바 있고, 파괴모드나 좌굴강도를 살펴보기 위한 실험들도 꾸준히 연구들이 진행되고 있고 있다. 또한, 이러한 노력들이 최근 대형선급들의 슬로싱 안전성평가 지침에서도 그대로 반영되고 있는데, 예를 들어 ABS의 경우, 안전성 평가를 위해 크게 세 가지의 단계(critical load filtering, linear FE analysis, nonlinear FE analysis including fluid-structure interaction)로 구분하여 이를 적용하기를 권고하고 있다. 이러한 여러 평가방법 혹은 지침들의 한 가지 문제점은 개념적으로는 지극히 당연하지만 현실적으로 해석이 힘든 부분을 포함하고 있다는 것이다. 예를 들어, ABS의 구조평가를 위한 3단계에서 권고되고 있는 유체-구조 유탄성을 고려한 모델링(Hydro-viscoelastic model)은 앞서 언급한 바와 같이 해석이 쉽지 않다. 따라서, 보다 현실적이고 적용이 용이한 프로시

저의 필요성이 있으며, 국내 대형 조선산업체들의 경우 자체적인 평가기술을 꾸준히 개발하고 있으며 내부적으로 이를 설계에 반영하고 있기도 하다.

슬로싱 현상은 LNG 화물창 내 pump tower에 대한 구조적 문제를 유기하기도 한다. 이 문제는 충격적 하중보다는 슬로싱 현상으로 인해 유기되는 유동장 내 압력의 변화에 따른 pump tower의 변형과 장기적 피로파괴 문제가 주된 관심대상이다.

### 7. 해석의 난제 및 향후 연구방향

조선해양공학 분야에서 현재 관심이 되고 있는 슬로싱 현상은 대단히 비선형성이 강하고, 유동의 특성이나 유탄성 효과 등과 같이 아직도 정확히 규명되지 않는 문제들이 많다. 향후 더 많은 연구와 관심이 있어야 할 분야로서는 다음과 같은 내용들을 들 수 있다.

- LNG의 특성을 고려한 실험기법 개발
- 대형 실험을 통한 축척효과 연구
- 실선 화물창 내 슬로싱 하중 계측 및 분석
- 불규칙 충격압력에 대한 체계적 통계해석
- 충격 동적압력의 시간 및 공간 모델링
- 유탄성 현상을 고려한 비선형 구조해석기법의 모델링
- 실험이나 계산의 노력을 줄이기 위한 pre-screening 기법에 대한 연구
- 선박운동과 슬로싱 연성효과 및 충격압력의 변화
- 슬로싱 유동 및 충격압력 감소방안

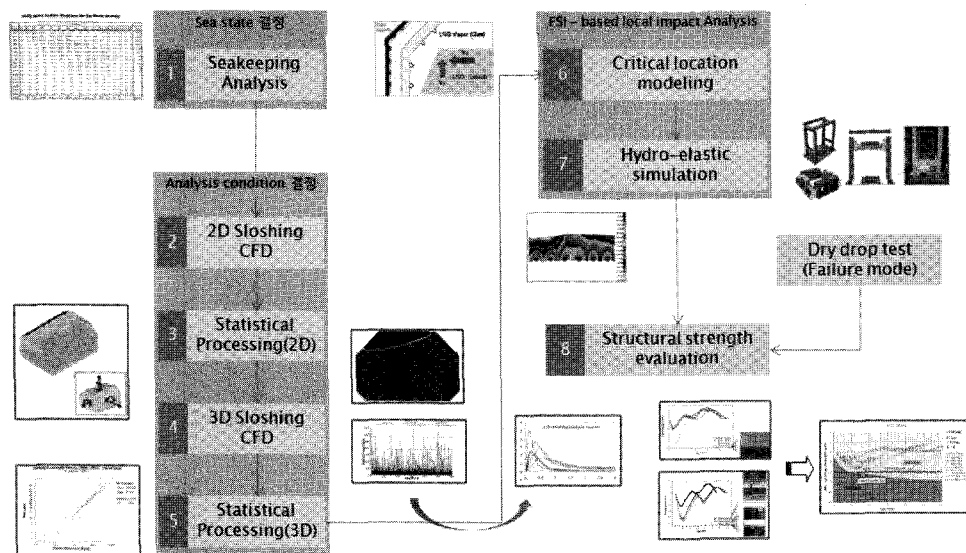


그림 10 국내 산업체의 슬로싱 해석 절차의 예 (삼성중공업)