

슬로싱 하중을 받는 LNG CCS 구조평가 기법

박종진, 한상민 (삼성중공업㈜)

1. 서론

최근 선박의 대형화 및 FLNG등장에 따라 LNG 화물창내의 슬로싱(Sloshing) 충격압에 대한 관심이 증대되고 있다. 슬로싱에 의한 유동은 주로 Tank의 형상 크기, 해상 상태등에 따라 변한다. 현재 LNG 선박의 대형화에 가장 중요시되는 부분은 Sloshing 충격압에 의한 LNG 화물창 내의 손상 가능성에 관한 내용이다. 이러한 문제점을 미리 예측하고 회피하기 위해서는 정도 높은 슬로싱 해석법이 요구된다. 특히 FLNG의 Partial Filling 운용평가를 위해서는 슬로싱-운동 연성해석이 고려되어야 한다. 정도 높은 LNG CCS의 구조 응답 평가를 위해서는 동적 구조 응답에 대한 합리적인 평가와 유체-구조 연성을 고려한 유탄성 해석기법의 적용이 필요하다.

2. 슬로싱 해석 기법

최근 선박의 대형화에 따른 슬로싱 해석의 중요성이 증대되고 이에 따라 실제 해상상태를 감안한 3차원 Irregular 해석법의 중요성이 증가되었다. 당사에서는 대형 LNG 선박의 개발에 irregular 해석법을 이용하였으며 해석방법을 간략히 설명하면 다음과 같다.

- A. 대상 선박의 운동해석
- B. 운동해석결과와 운항상태를 고려한 선박의 irregular 운동 재현

- C. 재현된 irregular운동을 이용한 LNG tank의 자유수면을 포함한 전산해석 및 모형실험.
 - D. 계산 시간마다 걸리는 최대 충격압 해석
- 여기서 운동해석은 주로 당사가 개발해서 사용하고 있는 SSMP(Samsung Ship Motion Program)을 이용하여 수행하며, 경우에 따라서는 타 기관에서 해석된 운동결과를 이용할 수 있다. 주어진 운동해석 결과를 이용한 자유수면을 포함한 탱크 내의 유동해석은 SHI-SLOSH 전산해석 프로그램을 이용하여 해석한다(박종진 외, 2005).

2.1. 선박의 운동해석

파랑중 운행하는 선박은 파도로 부터의 외력과 선박 자체의 복원력의 상관관계로 운동을 하게 되고 액화 화물을 운반하는 LNG선의 경우 저장 탱크 내부의 유체 유동으로 인해 선체에 충격을 주어

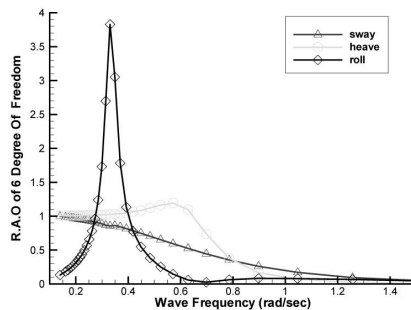


그림 1. FLNG 운동해석 RAOs

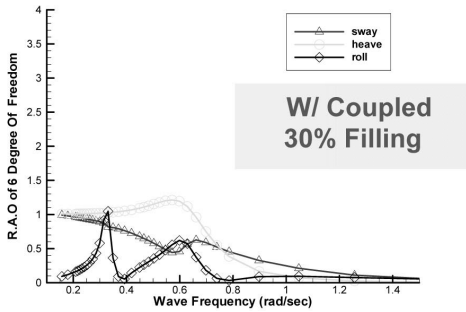


그림 2. 연성효과를 고려한 운동해석 RAOs

손상을 주는 경우가 있다. 따라서 정확한 선박 운동응답의 추정이 화물창 내부의 슬로싱 해석을 위한 기초자료가 되기 때문에 보다 정확한 운동응답 추정이 요구되며, 특히 안전한 LNG선을 건조하기 위한 필수 요소중 하나이다.

최근에는 LNG 탱크 내부유동을 고려한 운동해석법의 필요성이 증가하고 있다. 특히 FLNG와 같이 Partial Filling Operation이 필요한 경우에는 연성 효과를 고려해야 한다. 당사에서는 슬로싱-운동 연성해석 프로그램을 자체 개발하여 슬로싱 평가에 사용하고 있다. 그림 1 과 2는 Beam Sea조건에서 슬로싱 연성 효과에 따른 FLNG 운동 해석 결과 차이를 보여주고 있다. 이러한 연성운동 차이는 슬로싱 충격압에 큰 영향을 준다(Park et al. 2009).

2.2. 슬로싱 전산해석 및 모형실험

당사에서는 LNG선 개발의 초기설계 단계에서 슬로싱 전산해석 프로그램을 통해 개발하고자 하는 LNG선 Tank의 안전성을 평가해 왔다. 당사에서 개발 및 발전시켜온 SHI-SLOSH는 SOLA-VOF법을 사용하여 과도한 자유수면 유동을 계산할 수 있다. 또한 선박의 6자유도 운동을 고려한 Irregular 슬로싱 해석이 가능하다. 그림 3은 당사에서 수행 중인 LNGC tank design 슬로싱 평가법을 나타낸다. 전산해석은 주로 기준에 운항하고 있는 선박을 기준선으로 하여 개발하고자 하는 선박을 비교하여 안

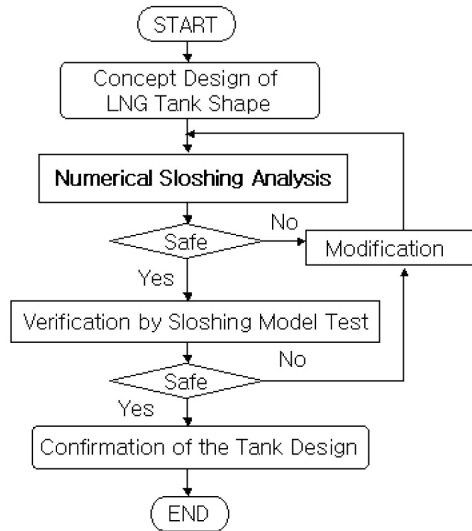


그림 3. LNG Tank 슬로싱 평가법

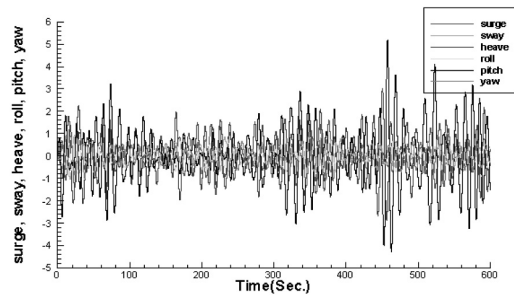


그림 4. LNG선의 6자유도 운동

전성을 평가하였다. 그림 3의 슬로싱 평가법은 LNGC Tank의 크기 및 형태를 정하는데 주로 이용해 왔다(Park et al. 2006).

선박이 대양을 운항 중에는 실제 해상상태에 따라 여러 형태의 파(Wave)를 접하게 되고 이에 따라 선박은 irregular운동을 하게 된다. 당사에서는 운동해석 결과(Motion RAOs)와 해상의 wave spectrum을 이용하여 선박의 실제 운동을 재현하여 슬로싱 해석을 수행한다. 그림 4는 LNG선의 Bow quartering sea condition ($\beta=150$ deg.)에서 시간에 따른 선박의 Irregular 6자유도 운동을 보여주고 있다.

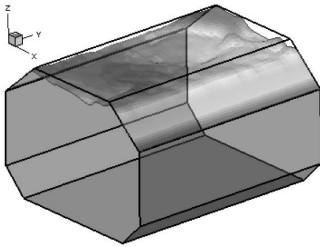


그림 5. 자유수면 계산 결과

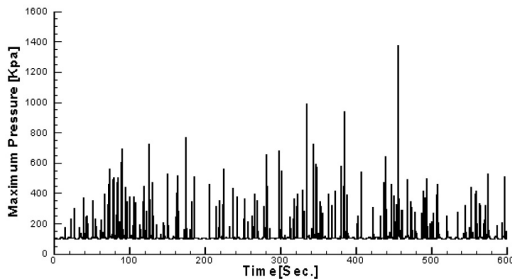


그림 6. 슬로싱 충격압 계산결과

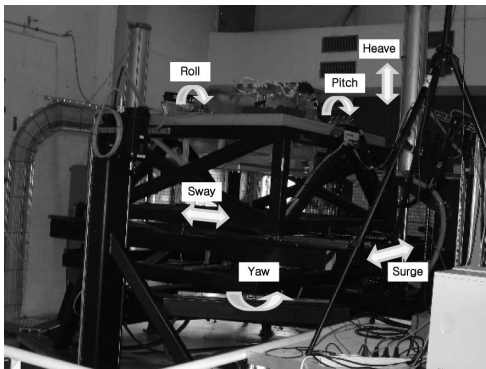


그림 7. MARINTEK 슬로싱 실험장비

그림 5는 Quartering sea condition에서 138K LNG 탱크의 3차원 자유수면 형상을 보여주고 있다. 선박의 6자유도 운동에 의한 자유수면의 비선형성을 잘 보여 주고 있다. 그림 6은 시간에 따른 LNG 탱크 내에 걸리는 최대 충격압을 보여주고 있다.

최종 설계에서는 필요에 따라 슬로싱 모형 실험을 수행 한다. 실험은 주로 MARINTEK에서 수행 하며, 그림 7은 MARINTEK의 6자유도 슬로싱 실험

장비를 보여주고 있다.

이러한 실험 및 계산을 통해 각 부위에 걸리는 슬로싱 충격압을 추정할 수 있다.

3. 슬로싱 하중을 받는 LNG CCS 구조평가 기법

슬로싱 충격하중을 받는 LNG CCS(Cargo Containment System)의 구조 응답을 평가하기 위해서는, 충격압에 의한 동적 거동에 대한 평가와 유체-구조 연성거동에 대한 평가가 필수적이다. 당사에서는 이와 같은 두 가지의 구조 거동을 고려하여 합리적인 구조 응답 평가를 수행하기 위해 그림 8과 같은 구조평가 프로시저를 개발하였다(Ito et al. 2008). 본 프로시저에는 LNG CCS 강도를 실험적으로 얻어내어 최종적으로 구조 안전성을 평가하는 것도 포함되어 있다.

3.1. 선박 운동해석 및 Tank 운동 시나리오

슬로싱 하중을 얻어내기 위한 첫 단계의 해석으로 2.1의 내용과 동일하다. 여기서는, 선박 하중 조건, 해상 조건, 조우각, LNG 적재 비율 등을 고려하여 탱크 운동 시나리오가 결정된다.

3.2. 2D Rigid Tank 슬로싱 단기 시뮬레이션

탱크 운동 시나리오를 바탕으로 2차원 단기 슬로싱 시뮬레이션을 수행한다. 본 과정을 통하여 슬로싱 충격압이 크게 나타나는 위치와 압력 크기를 알아낼 수 있다. 본 과정은 Rigid Tank를 가정하여 수행한다.

3.3. Extreme 슬로싱 조건에 대한 통계 해석

단기 시뮬레이션에서 얻어진 슬로싱 Peak 압력이 특정한 확률 분포를 따른다고 가정하고, 최대 Peak 압력을 특정한 확률 레벨에서 추정한다. 본 과정에서는 결과적으로, 최대 Peak 압력이 크게 나타난 몇 개의 Tank 운동 시나리오를 얻을 수 있다.

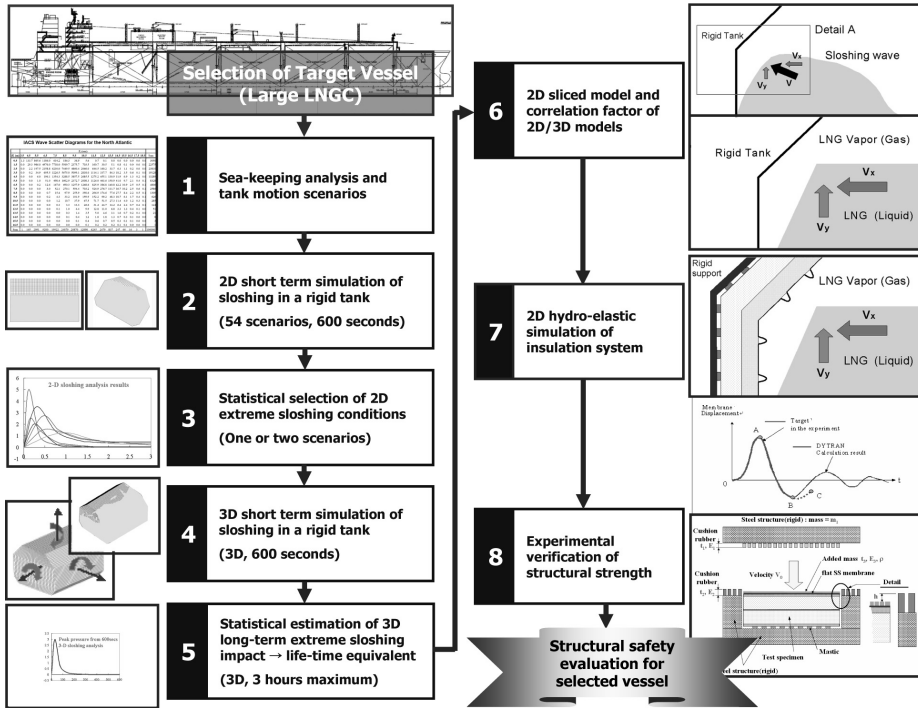


그림 8. 슬로싱 하중 하 LNG CCS 구조평가 프로시저

3.4. 3D Rigid Tank 슬로싱 단기 시뮬레이션

3.3에서 얻어진 최대 Peak 압력이 나온 몇 개의 Tank 운동 시나리오를 바탕으로, 3차원 슬로싱 단기 시뮬레이션을 수행한다. 즉, 선택된 선박 하중 조건, 해상 조건, 조우각, LNG 적재 비율 등을 바탕으로 Rigid Tank의 3차원 슬로싱 해석을 수행함으로써, 화물창 내부에서 발생하는 슬로싱 현상을 시뮬레이션 한다.

3.5. Extreme 슬로싱 충격압 장기 예측

본 단계에서는 3차원 단기 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 특정한 확률 분포와 확률 레벨을 기준으로 장기 예측을 수행하여, 선박 일생 동안 최대 슬로싱 압력이 나타날 수 있는 조건들을 얻어낸다.

3.6. 2차원 Sliced Zooming 모델 도출

먼저, 장기 예측된 결과에서 최대 슬로싱 압력이 나타나는 약 600초 동안의 상황을 고려하여, 다음 그림 9와 같은 최대 슬로싱 압력의 순간을 포착한다.

슬로싱 최대 압력이 발생하는 부위를 중심으로 2차원 Zooming 모델(그림 9의 Detail A)을 도출하는데, 3차원 슬로싱 충격 거동을 가장 잘 표현한 적

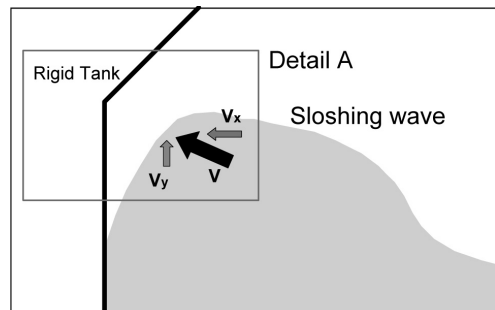


그림 9. 최대 슬로싱 압력이 작용하는 순간

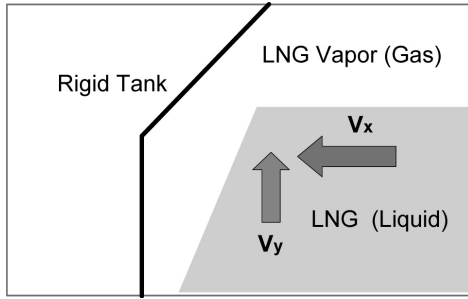


그림 10. 최대 슬로싱 충격압이 작용하는 순간의 2차원 Sliced Zooming 모델

절한 절단면을 선택하여 2차원 Sliced 모델을 만든다. 이와 같이 만들어진 Sliced Zooming 모델 내부의 슬로싱 현상은 액체/기체의 속도장으로 표현한다. 즉, 선박 일생 동안 최대 충격압이 나타나는 순간을 다음의 그림 10과 같이 2차원 모델의 유체 속도장으로 표현한다.

2차원 Sliced Zooming 모델을 도출하는 것은 3차원 공간을 2차원으로 이상화하는 절단면 선택 과정이 적절하게 이루어져야 하는데, 2차원/3차원 모델 사이의 상관 관계도 면밀히 검토되어야 한다.

3.7. LNG CCS의 2차원 유탄성 동적 거동 해석

전 단계에서 얻어진 최대 슬로싱 유체 속도장을 초기 조건으로 하여 LNG CCS 유탄성 동적 구조 해석을 수행한다. 본 단계에서는 이전 단계들에서 고려하지 않았던 LNG CCS 구조를 그 디테일까지

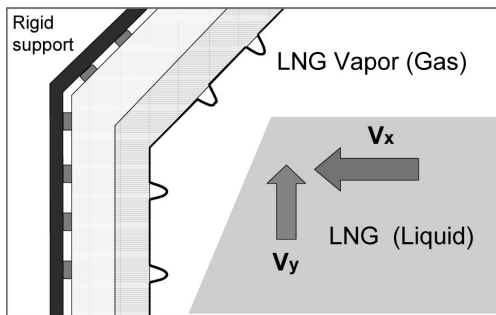


그림 11. LNG CCS 유탄성 동적 구조 해석

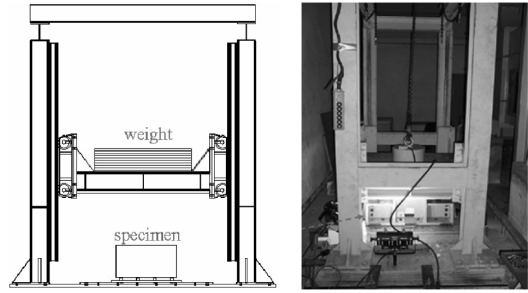


그림 12. LNG CCS 낙하 충격 실험

고려할 뿐만 아니라, 구조(CCS)와 유체(LNG)가 서로 영향을 주는 유체-구조 연성 메커니즘도 고려한다. 전 단계에서 얻어진 유체 속도장을 LNG CCS에 부과하는 것이 가장 핵심적인 과정인데, 다음의 그림 11과 같다.

본 해석을 통하여 LNG선 일생 동안 최대 슬로싱 압력이 작용하는 순간의 LNG CCS 구조 응답을 얻어낼 수 있다.

3.8. 낙하 충격 실험을 통한 구조 강도 평가

유탄성 해석을 통해 얻어진 구조 응답을 바탕으로 LNG CCS의 안전성을 평가하기 위해서는 실제 실험을 수행하여 LNG CCS의 동적 구조 강도와 비교해야 한다. 따라서, 다음 그림 12와 같은 낙하 실험을 수행함으로써 LNG CCS의 동적 구조 강도를 알아낸다.

낙하물 중량과 높이, 시험편 구조 등 여러 가지 조건에 대한 실험을 수행하면서, 실험이 끝난 후 시험편의 파괴 유무를 면밀히 확인하여 실험 조건과 구조 응답 결과 및 파괴에 대한 데이터를 확보한다. 이전 단계에서 얻은 LNG CCS 유탄성 해석에서 얻은 구조 응답과 동일한 구조 응답 결과가 나온 실험에 대한 분석으로 안전성 평가를 수행할 수 있다. 안전성 평가 기준으로 사용하는 구조 응답은 LNG CCS의 변형으로, 다음 그림 13과 같이 해석과 실험을 통하여 얻어진 변형을 비교하는 방법으로 안전성을 평가한다.

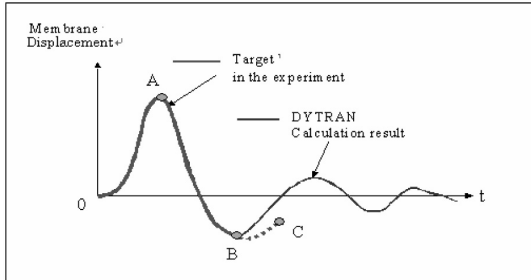


그림 13. 유탄성 동적 해석과 낙하 충격 실험에서 얻은 LNG CCS 변형의 비교

즉, 시험편이 유탄성 동적 구조 해석에서 얻은 최대 변형만큼의 낙하 하중을 받았는데도, 아무런 문제가 발견되지 않고 파괴가 전혀 일어나지 않았다면, LNG CCS는 슬로싱 충격압에 대하여 안전하다고 평가할 수 있다.

4. 결론

지금까지 LNG 화물창내의 슬로싱 현상에 대한 해석법과 슬로싱 충격압에 대한 LNG CCS 구조평가 기법을 살펴보았다. 당사에서는 슬로싱-운동 연성 해석 기법을 개발하여 해석과 실험을 병행하는 방법으로 LNG선 개발의 초기 단계에서 LNG 화물창의 슬로싱 현상을 평가하고 있다. 또한, 슬로싱

충격압에 의한 LNG CCS의 동적 구조 응답을 파악하기 위해 유체-구조 연성 거동의 관점에서 자체 평가 프로시저를 개발하여 적용하고 있고, 낙하 충격 실험을 통하여 LNG CCS의 동적 강도를 확인함으로써 구조 안전성을 평가하고 있다. 향후, LNG CCS의 정도 높은 구조 응답 평가를 위해 유탄성 동적 구조 해석의 3차원 확장 등을 고려하고 있다.

참고 문헌

- [1] Ito, H., Suh, Y.S., Chun, S.E., Satish, Y.V., Han, M.K. and Park, J.J., Yu, H.C. and Wang, B., 2008, "A Direct Assessment Approach for Structural Strength Evaluation of Cargo Containment System Under Sloshing Inside LNGC Tanks Based on Fluid Structural Interaction." Proceeding of OMAE 2008, Estoril, Portugal.
- [2] 박종진, 김문성, 김영복, 하문근, 2005, "실해역 상태를 고려한 LNG 선박의 Sloshing 해석", 2005년 대한조선학회 특별논문집.
- [3] Park, J.J., Kim, M.S., Kim, Y.B. and Ha, M.K., 2006, "Practical Application of Numerical Sloshing Analysis for development of Large LNG Carriers," Proceeding of ISOPE 2006, San Francisco, USA.
- [4] Park, J.J., Kawabe, H., Kim, M.S., Kim, B.W. and Ha, M.K., 2009, "Sloshing Assessment of LNG-FPSOs for Partial Filling Operations," Proceeding of ISOPE 2009, Osaka, Japan. h

박종진 | 삼성중공업 조선해양연구소 책임



- 1969년 8월생
- 2002년 영국 뉴캐슬대학 선박해양공학 (공학박사)
- 관심 분야 : CFD, LNG&FLNG 슬로싱 평가
- 연락처 : 055-630-6188
- E-mail : jjuk.park@samsung.com

한상민 | 삼성중공업 조선해양연구소 책임



- 1970년 2월생
- 2002년 서울대학교 조선해양학과 (공학박사)
- 관심 분야 : LNG CCS 구조 평가
- 연락처 : 055-630-4748
- E-mail : sm5.han@samsung.com