

1-way FSI 기법에 의한 LNG 운반선 화물창의 강도평가에 관한 연구

The Study of 1-Way FSI for Strength Assessment of LNG Cargo Containment System

이 성 제* · 양 용 식** · 김 성 찬*** · 이 장 현****

Lee, Sung-Je · Yang, Yong-Sik · Kim, Sung-Chan · Lee, Jang-Hyun

1)

요 약

전 세계적인 LNG 수요 증가에 따라 LNG 운반선의 대형화 및 극한 환경의 항로 선택이 불가피해지고 있다. 이러한 상황에서 LNG의 슬로싱 현상에 따른 화물창의 구조적 안정성 여부가 큰 이슈거리로 떠오르고 있다. 슬로싱 현상에 의한 구조 안전성을 평가하는 가장 이상적인 방법은 유체 영역과 탱크의 복합적인 상호 작용을 완벽하게 구현하는 것이다. 하지만 과도한 계산 시간과 결과의 정확성이 확보되지 못한 상황에서 LNG 운반선 화물창의 안전성 평가에 적용하기에는 문제가 있다. 많은 연구 단체에서는 불규칙적인 슬로싱 압력 신호를 삼각파 등의 형태로 이상화하여 구조해석에 적용하고 있지만 이 또한 유체의 압축성 및 비선형성을 고려하는데 한계를 드러내고 있다. 본 연구에서는 슬로싱 하중을 받는 구조의 안전성을 평가함에 있어 쌍방향(2-way) FSI(Fluid-Structure Interaction)의 과도한 해석 시간 및 수렴의 어려움을 보완하고 유체의 비선형성을 고려할 수 있는 단 방향(1-way) FSI 기법을 이용하는 절차를 제안하고자 한다.

keywords : LNG 운반선 화물창, 슬로싱, 1-way FSI

1. 서론

현재 전 세계적으로 LNG의 수요량이 증가하면서 LNG 운반선의 대형화 및 선체 운동을 크게 유발시킬 수 있는 극지방의 운항이 필수화 되고 있다. 이러한 환경에서 슬로싱 현상에 의한 LNG 운반선 탱크 내부의 구조적 안정성 판단 기법에 대한 필요가 늘어나고 있다. 최근 많은 연구 단체에서 LNG CCS (Cargo Containment System)의 구조적 안정성을 판단하기 위하여 여러 수치적 해석 기법을 제시하고 있다. 대표적인 방법으로는 슬로싱 현상에 의한 압력 신호를 삼각파 등의 형태로 이상화하여 구조 해석에 적용하고 있지만 슬로싱 압력의 공간적 분포 반영 및 유체의 비선형성을 고려하는데 한계를 드러내고 있다(유미지 등, 2010). 유체의 거동과 구조의 변형이 복합적으로 발생하는 슬로싱의 특성을 현실성 있게 구현할 수 있는 기법은 2-Way FSI(Fluid Structural Analysis)이다. 그러나 과도한 해석 시간 및 해석 기법의 한계를 극복하는데 어려움이 있어 LNG CCS의 구조 안전성 평가에 이용하기에는 현실적인 어려움이 있다.

본 연구에서는 기존의 안전성 평가기법의 단점을 보완할 수 있는 단 방향(1-Way) 유체-구조 연성해석 기

* 학생회원 · 인하대학교 조선해양공학과 석사과정 sungje0510@gmail.com

** 인하대학교 조선해양공학과 석사과정 quontom@gmail.com

*** 정회원 · 인하공업전문대학 선박해양시스템과 교수 schankim@inhac.ac.kr

**** 정회원 · 인하대학교 조선해양공학과 부교수 jh_lee@inha.ac.kr

법을 이용하는 절차를 제안하고자 한다.

2. Model test

슬로싱 압력을 추정하기 위하여 기존의 연구단체에서 수행되고 있는 방법 중 하나는 모형실험을 통한 압력 측정법이다. 실선 계측을 통한 압력 측정은 실험 자체가 어려울 뿐 아니라 많은 비용이 들어 이를 일반화하여 안정성 평가에 적용하기에는 아직 많은 문제점이 남아있다. 모형실험의 경우에도 축척 효과 적용 및 많은 ship motion scenario에 대하여 실험을 수행할 수 없는 현실적인 문제가 남아있다(노인식 등, 2010). 본 연구에서는 2005년 DSME에서 수행하였던 모형실험 결과와 ANSYS.CFX를 이용하여 해석한 결과를 비교하였으며 실험과 해석 결과의 비교를 통해 CFD 해석 결과를 신뢰할 수 있다고 임의로 가정하였다. 압력의 비교 위치는 최대 압력이 발생하는 C4이며 비교 결과는 그림 2에 나타내었다. 정확도가 확보된 CFD 해석을 통해서 구조해석에 적용 가능한 압력 및 유체의 속도를 측정할 수 있으며, 다양한 motion scenario에서의 해석 결과도 이용가능하다.

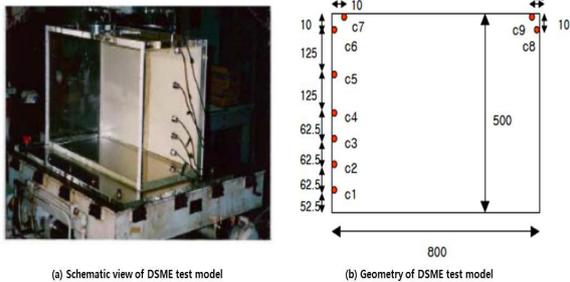


그림 1 DSME 모형실험 장비 및 압력 측정 위치

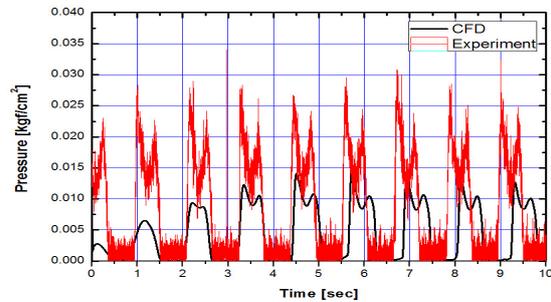


그림 2 모형실험과 CFD 해석의 결과 비교 (C4)

3. 단방향(1-Way) FSI 해석

CFD 해석에는 상용코드인 ANSYS CFX를 이용하였다. 해석을 통해 계산된 유체의 최대 속도를 이용하여 1-Way FSI를 수행하였으며 그 절차는 그림 3과 같다.

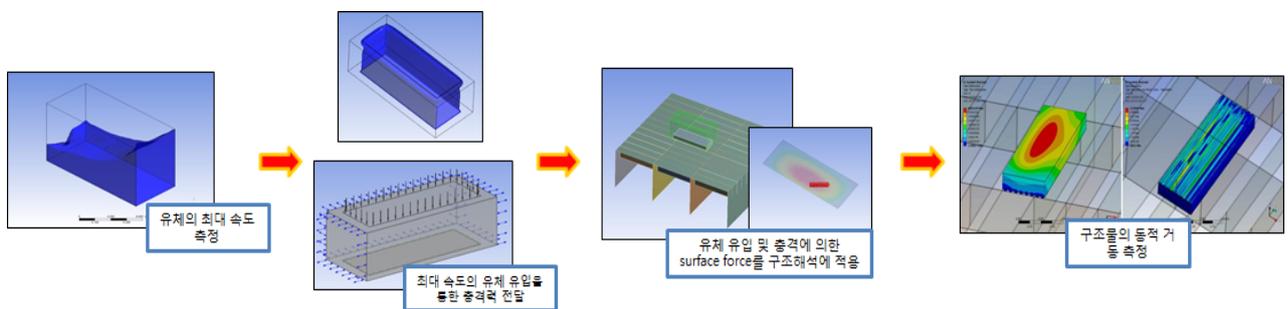


그림 3 1-Way FSI 적용 절차

3.1 유체 충격에 의한 Surface force 생성

본 단계에서는 유체의 충격의 압력 신호를 surface 단위로 생성하고 이를 구조 해석의 작용 하중으로 이용하는 것이 주 목적이다. Surface force를 생성하기 위하여 CFD 해석을 수행하며 그 절차는 그림 4에 제시하였다. 모형 실험에 대한 CFD 결과로 측정된 최대 속도를 이용하여 유체를 유입시킨 후 구조물에 충돌시킨다. 이때 속도는 Froude의 비교법칙을 통해 $\sqrt{\lambda}$ scale을 이용하여 실선 크기로 확장하였으며, 이를 통해 실선에서와 최대한 유사한 결과를 얻고자 하였다. 유체 충격 해석 결과를 통해 충돌 시 생성한 압력의 분포를 surface 단위로 추출하여 구조 모델에 적용하였다.

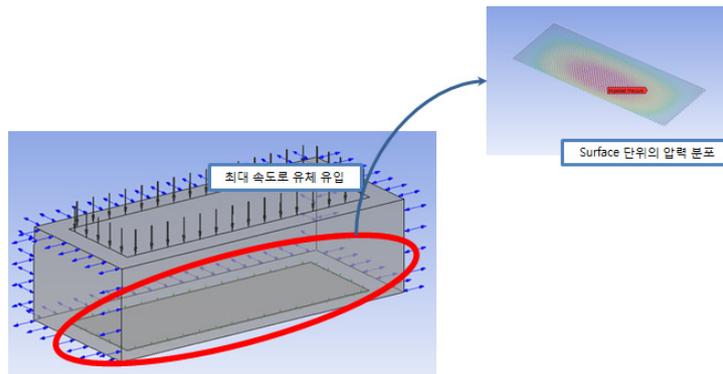


그림 4 Surface force를 생성하기 위한 모델 구성

3.2 Surface force를 이용한 구조해석

CFD 해석을 통해 획득한 Surface force를 CCS 구조 및 선각 구조를 포함한 모델의 적용 하중으로 이용하여 그 과정을 그림 5에 나타내었다.

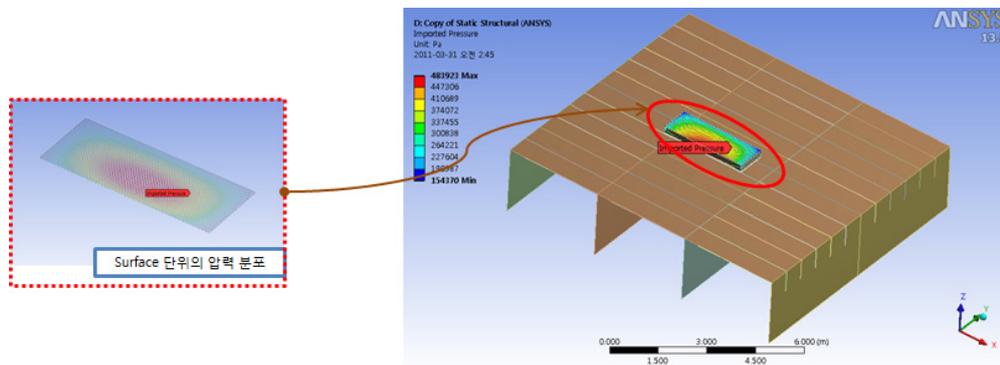


그림 5 구조 해석 모델

3.3 해석 결과

앞서 언급한 데로, CFD 해석에 의한 정확도는 신뢰할 수 있다고 가정한 만큼 본 절차를 통한 결과는 개선의 여지가 많다. 방열재의 파단 기준 및 제반 사항에 대한 Acceptance criteria 또한 아직 마련되지 않았기 때문에 본 연구에서 제시하는 결과는 그 경향을 파악하는 데 중점을 두었다. 앞서 제시한 1-way FSI 방법 이외에도 똑같은 방열재와 선각 구조를 이용한 해석모델에 정적하중과 동적하중을 적용하여 구조 해석을 수행하였으며, 그 결과의 비교 내용은 다음과 같다.

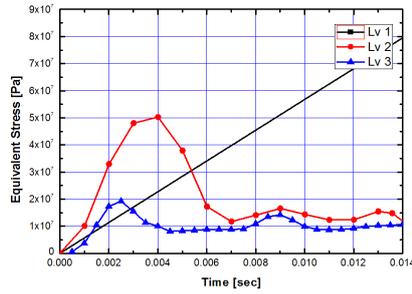


그림 6 Stress 비교

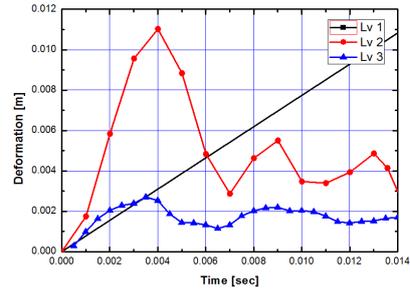


그림 7 Deformation 비교

4. 결론

본 연구는 CFD 및 FE analysis의 정확한 결과 예측이나 구조물의 거동에 대한 고찰에 대한 내용은 중점적으로 다루고 있지 않다. 기존의 연구들에서 제시되고 있는 슬로싱 강도 평가기법의 단점들을 보완할 수 있는 1-way FSI의 수행 절차에 대하여 연구하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 절차를 통하여 유체의 충격 압력에 대한 공간적/시간적인 분포를 반영할 수 있으며, 기존의 2-way FSI에 비하여 계산 시간 절약 및 수렴성 증가를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발 사업인 “LNG 관련 선박 또는 해양구조물의 탱크 설계를 위한 슬로싱 해석 기술 개발 및 관련 인프라 구축(100333791)”의 지원을 받아 수행된 결과입니다.

참고 문헌

- 노인식, 이재만, 엄철웅 (2010) 유체 충격압력 시계열의 모델링에 관한 기초연구, 대한조선학회 논문집, 제 47권 2호, pp.244~249
- 유미지, 김성찬, 이장현, 이성제, 양용식, 노인식 (2010) Sloshing 하중을 받는 MARKIII 형 LNG 방열시스템의 강도 평가를 위한 기초연구, 대한조선학회 학술대회 논문집, pp.435~443
- ABS (2006) Guidance Note on Assessment of Membrane-type LNG Containment System under Sloshing Loads
- Ito, H, Suh.YS, Chun.SE, Satish Kumar.Y.V, Ha.MK, Park.JJ, Yu.HC, Wang.B (2008). Direct Assessment Approach for Structural Strength Evaluation of Cargo Containment System under Sloshing Inside LNGC Tans based on Fluid Structure Interaction, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pp.835~845