

LNG운반선의 화물창 안전성 평가 기술

박영일, 박재형 (대우조선해양 미래연구소)

1. 서론

LNG를 화물로 하는 선박 및 FPSO 등은 슬로싱에 의한 안전성 문제에 노출되어 있고 이러한 선종의 설계를 위해서는 슬로싱에 의한 안전성 평가가 필수적이다. 이를 위해서는 정확한 슬로싱 하중 계산과 동적하중에 대한 구조강도 평가 기술이 확보되어야 한다.

슬로싱과 같은 동적하중에 대한 구조 강도의 평가를 위해서는 하중의 작용시간 및 모양, 구조물의 주기, 종류 등이 미리 결정되어야 하는데, 하중의 작용시간은 슬로싱의 압력을 계산하는 과정에서 산출될 수 있으며 작용하중의 모양은 여러가지로 생각할 수 있으나 실용상 단순화시켜 고려하고 있다.

각국 선급 협회에서는 LNG 운반선의 화물창 설계에 관한 각각의 설계가이드를 발간 하고 있으며,

최근 실제 프로젝트에서는 해당 지침에 따라 화물창 및 화물창 탱크의 설계에 직접 반영하는 것을 권고 하고 있다.

본 논문에서는 LNG 운반선의 화물창 안전성 평가에 대한 선급 별 제안 기술 국내 기술 개발 현황을 간단히 정리하고자 한다.

2. 각국 선급 별 제안 기술

슬로싱에 의한 구조 안전성 평가를 위한 선급 별 로 제안 기술을 간단히 살펴보고자 한다.

2.1 노르웨이 선급 (DNV) 프로시저

노르웨이 선급인 DNV의 프로시저 [1]는 슬로싱 실험에서부터 구조해석까지 거의 대부분의 분야를 망라하고 있으며, Membrane type LNG 운반선의

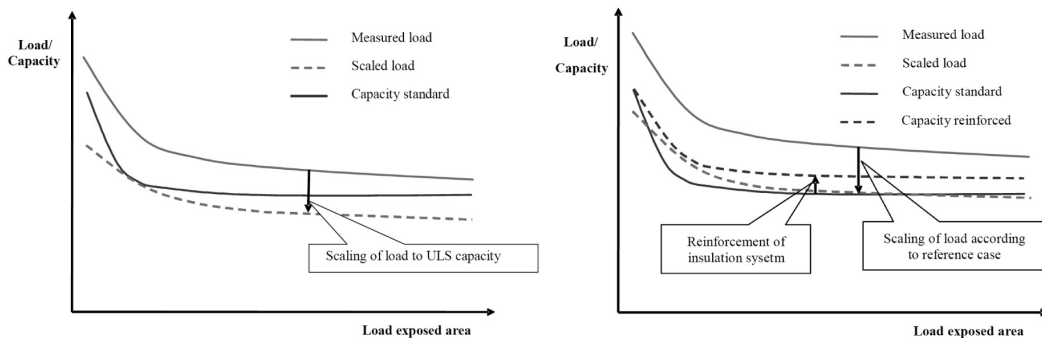


그림 1. DNV 슬로싱 해석법의 기본 개념도 좌) 138k size reference vessel, 우) Target vessel [1]

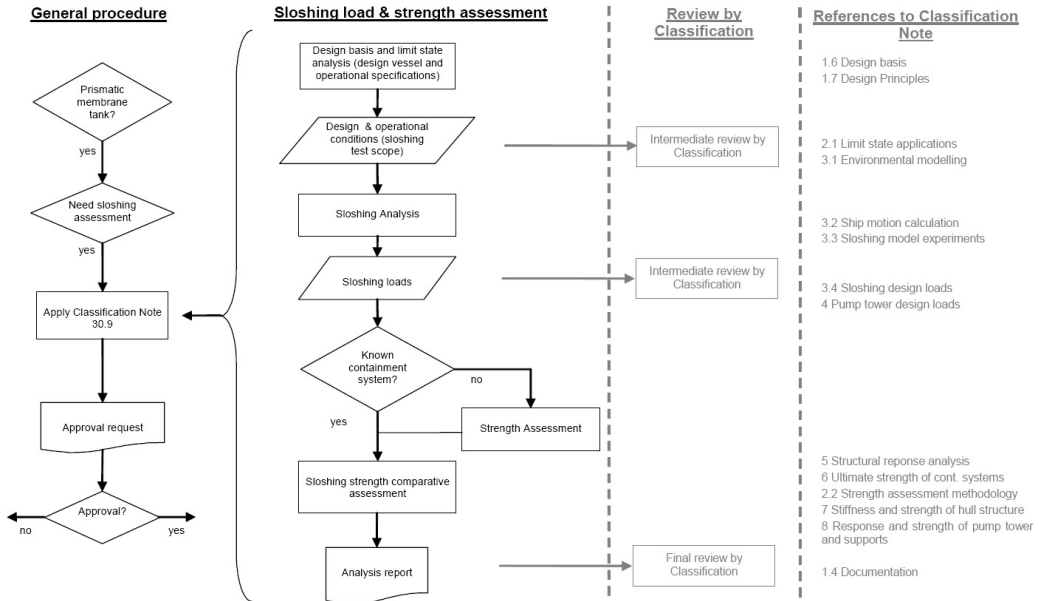


그림 2. DNV CN30.9의 슬로싱 해석법의 Flow-Chart [1]

Tank design의 가이드로 사용하기를 권고하고 있다.

기본적인 슬로싱 해석법은 비교법(Comparative Method)을 기초로 하고 있다. 이미 수년간의 운항 경험으로 검증된 선박(화물용량이 138,000 m3인 LNG Carrier)이 갖고 있는 안전율을 개발하고자 하는 대상선에 그대로 적용하는 방법이다. 138,000 m3 size LNG선의 슬로싱 하중 대비 대상선박의 하중 증가분만큼의 선체 및 Cargo Containment System의 강도를 키워줄 것을 요구하고 있으며, 기본 Procedure는 그림 1, 2와 같다.

그림 1의 좌측 그림은 Reference vessel인 138,000 m3의 LNGC의 하중 및 Cargo Containment System(이하 CCS)의 강도를 비교하고, 하중/강도 비를 구하는 개념도를 나타내고 있다. DNV procedure에 따르면, 그림 1의 우측 그림과 같이 Target vessel은 Reference vessel에서 얻어낸 하중/강도 비를 만족해야 된다.

본 해석법은 복잡한 슬로싱 해석법으로 발생 가

능한 Error 및 해석 시간을 줄이고 단순하게 실적 선 대비 상대 강도 증가량을 요구하는 것으로, 과잉 설계를 요구할 경우가 많은 것으로 예상된다. 따라서, 현재 DNV 해석법은 구조-유체 연성효과인 유탄성 효과를 직접적으로 고려하지 않고, 유탄성 효과가 기준선이나 개발선에서 어느정도 동일하다는 가정이 내재적으로 포함되어 있다고 볼 수 있다.

2.2 미국 선급 (ABS) 프로시저

미국선급협회인 ABS는 2006년 Membrane Type의 LNGC의 슬로싱 해석 가이드를 발행하였으며 [2], DNV의 해석법과는 달리 직접해석을 기초로 하고 있다. 즉, 직접 해석 대상 선박의 하중/강도 해석을 수행하는 것을 요구하고 있다. 그림 3은 ABS의 해석법에 따른 구조해석법의 Flow Chart를 나타내고 있다. 구조해석은 Level 1, 2, 3로 나누어서 해석하고 있으며, Level 1은 단순히 CCS만을 대상으로 (즉 LNG는 고려하지 않음) 정적해석을 수행한

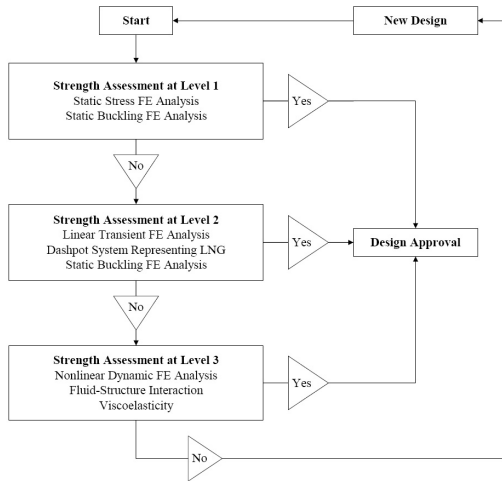


그림 3 ABS 선급의 LNGC CCS의 구조강도 평가법 [2]

다. Level 2 및 Level 3는 유체 즉, LNG 및 CCS의 상호 작용 즉 유탄성 효과를 고려한 해석을 요구 한다. Level 3는 비선형 효과 (기하학적/재료적/경계 조건의 비선형성)을 고려한다는 점에서 Level 2와 구분 할 수 있다.

그림 4는 ABS 해석법의 유탄성 효과를 고려할 수 있는 구조해석모델의 예를 나타내고 있다.

ABS 방법의 특징은 복잡한 구조-유체 연성의 문제를 단순화 시켜, 구조물표면의 변형이 유체장을 교란하게 되고 이에 따라 작용된 충격하중의 일부를 유체장이 흡수한다는 메커니즘을 도입한 것이라 할 수 있다. 하지만 여전히 이론적으로 완벽하지 않을 뿐 아니라, 진행하는 충격파의 처리에 있어 어려운 점이 여전히 남아 있다.

2.3 영국 선급 (LR) 프로시저

로이드 선급협회는 2008년 슬로싱 해석 가이드를 발행하였으며 [3], 직접계산법 (Absolute Approach) 및 비교 계산법 (Comparative Approach)를 모두 제시하고 있다. 비교 계산법 (Comparative Approach)의 경우는 DNV와 유사한 개념이며, Reference Vessel과 LNG CCS가 동일하고, 설계변

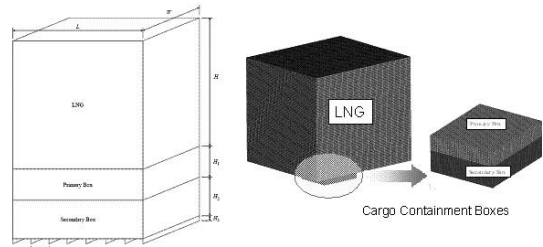


그림 4 유탄성 효과를 고려할 수 있는 구조-유체 FE modeling 기법 (ABS 선급)

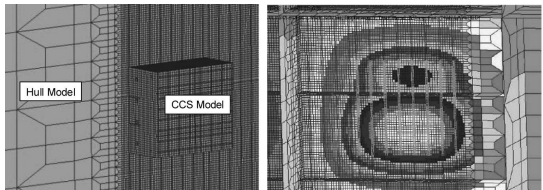


그림 5 Hull-단열시스템의 연성효과를 고려할 수 있는 FE modeling 기법 (LR 선급) [3]

경이 크게 없는 경우에 적용하고, 그 외의 경우는 직접계산법을 요구 한다.

ABS의 직접 계산법과의 차이는, CCS와 선체와의 연성문제를 직접 고려하여 구조안정성 평가를 요구하고 있다. 또한 유체-구조연성효과의 복잡한 현상 중 오직 부가질량 (Added Mass)에 의한 영향만을 간접적으로 고려하는 방법을 제안하고 있다. 그림 5는 Hull 및 단열시스템의 연성 효과를 반영하기 위한 FE Model 및 구조해석의 예제를 보여주고 있다.

2.4 프랑스 선급 (BV) 프로시저

프랑스 선급협회는 유체충격하중의 물리적 현상에 대한 체계적 이해를 근거로 구조물과의 상호 작용을 비교적 정밀하게 풀려는 노력을 수행하고 있다. 이를 위해 다양한 형태의 충격압력을 단순화해서 각각의 충격압력 발생현상을 수학적으로 표현하려는 노력을 수행하고 있다.

이렇게 수학적으로 표현된 충격압력을 구조물의



유한요소 모델에 포함시켜 유체-구조 연성문제를 해결하는 시도를 오랫동안 수행하고 있지만 비교적 엄밀한 접근 방법으로 일반 설계자가 사용하기에는 아직 시간이 더 소요될 것으로 예상된다.

3. 국내 기술 개발 현황

국내 기반 시설의 경우 일부 연구 기관 및 학교에서 제한적인 용도의 슬로싱 실험 장비와, 저온물 생성 실험이 가능한 장비를 확보하고 있고 몇몇 시설의 경우 국제적인 수준의 실험 장비를 확보하고 있으나, 현재 국내에 확보되어 있는 실험 시설이 여러 기초 현상에 대한 체계적인 검토를 하기에는 양적으로 부족하다고 할 수 있다.

과거에는 슬로싱 현상이 중요한 문제로 고려되는 선종이 그렇게 광범위 하지 못함으로 인해서, 각개 조선소에서 본 문제에 대해 전사적인 차원에서의 지원이나 일상적인 업무화가 이루어지지 못하였고, 시장 동향의 변화에 다소 늦게 대체하고 있었는데, 이러한 장애요인의 근본적인 시발점은 국내에서 액화 천연가스 운반선 건조가 활발해지기 이전에 슬로싱 관련 기술에 대한 수요나 미래 예측이 불가능하였음으로 인한 연구 자원의 사전 집중이 이루어지지 못하였기 때문으로 볼 수 있다. 아쉽게도 당장 중요한 기술로 그 수요가 증가하고 설계에 중요한 영향을 미치는 본 기술에 대한 연구 자원의 집중이 현재에도 그렇게 비중이 높아졌다고 볼 수 있지는 않으며, 체계적이고 집중적인 연구자원의 확보가 필요하다.

조선3사와 한국가스공사가 공동으로 진행하는 한국형 LNGC개발의 프로젝트에서 유탄성 효과를 검증하기 위한 연구를 수행된바 있다. 축척모형 화물창탱크의 두께를 변화시켜가면서 화물창의 변형으로 인한 충격 압력의 상관관계를 조사하였으며, 상용 프로그램인 Fluent, STAR-CD를 사용하여 다양한 슬로싱 현상을 수치해석하고 구조해석에 사용할 수 있는 유체 충격력을 계산하는 해석절차를 자체 개발하였다. 하지만 결과의 신뢰도가 아직은 낮은

편이어서 실설계에 사용되기에는 더 많은 연구가 진행되어야 하는 것으로 평가되고 있다.

구조물의 탄성과 화물창 전체를 대상으로 상세모델을 구성하여 유탄성 해석을 수행하는 것이 현실적으로 불가능 하기 때문에 Global-local analysis technique (전역-국부 해석기법)이라는 해석방법을 도입하였으며, 3차원 강체탱크 슬로싱 해석을 통하여 내부 LNG의 유동 및 압력장을 계산하고, 임계 시간 근방에서의 특징 화물창 부위의 국부 유탄성 거동은 탄성을 반영한 국부 상세 모델을 이용한 국부해석을 통한 간접적인 방법을 사용하였다.

4. 결론

이상에서와 같이 슬로싱하중을 받는 화물창 해석에 대해 선급별 기술 동향과 국내 기술 개발현황을 알아보았다.

각국 선급협회에서 제안하고 있는 LNG 화물창의 구조안정성 해석법은 크게 직접해석법과 비교해석법으로 나눌 수 있다. 또한, 슬로싱 현상을 초기 설계 단계에서 해석할 수 있는 효율적인 수치해석 프로그램이 존재하지만, 아직은 화물창의 설계와 안전성 평가를 위한 도구로써 실제 프로젝트 단계에서 활용되기에는 무리가 있으며, 엄밀한 수준의 해석을 위한 시간적 비용이 모형실험에 비해 저렴한 수준이라고 할 수 없다. 현재까지 개발된 해석법은 많은 가정을 내포하여 과잉 설계를 요구할 경우가 많은 것으로 예상되며, 여전히 이론적으로 완벽하지 않을 뿐 아니라 일반 구조설계자가 사용하기에는 아직 심도있는 연구 및 실 프로젝트 적용에 관련된 많은 경험이 필요할 것으로 파악되고 있다. 최근 LNG Offshore Unit 개발에 관한 선주들의 관심이 높아짐에 따라, 슬로싱 하중에 의한 구조안정성 평가의 중요성이 더 높아지고, 국내의 여러 연구기관에 의한 심도 있는 연구가 계속 진행되고 있어, 가까운 시기에 실용적인 설계 절차가 개발되리라 기대한다.



참고문헌

- [1] DNV Classification Notes No.30.9, "Sloshing Analysis of LNG Membrane Tanks", June 2006
- [2] ABS Guidance Notes on, "Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems Under Sloshing Loads", April, 2006
- [3] LR ShipRight, Additional Design Procedures, "Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations Version 2.0", May, 2009 [h](#)

박영일 | 대우조선해양 미래연구소



- 1973년생
- 2004년 부산대학교 박사
- 관심분야: 유탄성 해석, 구조신뢰성 평가
- E-mail: parkyi11@dsme.co.kr

박재형 | 대우조선해양 미래연구소



- 1966년생
- 2005년 동경대학교 박사
- 관심분야: 구조물의 동적 거동해석
- E-mail: jhpark@dsme.co.kr