

멤브레인형 LNG 저장탱크 단열구조의 슬로싱 충격강도 평가과정 소개

신형철 (현대중공업(주) 선박해양연구소)

본 기술해설에서는 멤브레인형 LNG 운반선의 단열 구조에 대해 슬로싱 충격 하중에 의한 구조 강도를 평가하는 과정을 소개한다. 슬로싱 하중을 생성하고 이를 이용하여 시간 및 공간 영역에서 상세 해석을 수행함으로써 단열 구조의 충격 강도를 평가한다. 선박의 파랑 중 선박 운동 해석, 슬로싱 모형 실험 또는 수치 해석을 통한 유체 충격 하중의 생성, 구조-유체 연성 모델의 구성 및 수치 해석, 선각 및 단열 구조의 안전성 검토 방법에 대해 기술한다. 또한, 이방성 및 저온 재료의 특성에 관한 연구, 수치 해석 기법의 검증 및 기타 관련 연구도 소개한다. 슬로싱 충격 하중에 의한 단열 구조의 안전성을 평가하기 위해서는 유체역학적으로 산정된 하중과 구조 응답을 연결하여 고려하는 연구 방향이 타당하다고 판단된다.

1. 서언

근래 대형 LNG 운반선의 수요 증가로 다수의 선박이 건조되었고 향후에도 해양 가스전에 설치될 LNG FPSO/FSRU 등의 건조가 계획 중이다. 또한, 최근에 기존 선박에서 저장 탱크 단열 구조의 손상 사례가 보고되고 있다. 그러므로, 부분 적재가 요구되는 LNG FPSO 등에는 슬로싱 현상과 그로 인한 구조 안전성 문제를 심도 있게 고려하여야 한다.

Mark-III 및 NO96형식의 단열 구조 개발사인GTT, SPB 단열 구조의 기술 보유사인 IHI, KC-1 단열 구

조 개발사인 KOGAS 및 선급, 연구소를 비롯한 관련 주체들은 슬로싱 충격에 강한 새로운 방식의 LNG 저장 탱크를 개발 중이다. 현재까지 진행된 단열 구조의 슬로싱 강도 평가방법은 정적 또는 동적 실험을 통한 재료의 압괴 강도를 제시하거나, 슬로싱 모형 실험을 수행하여 압력을 계측하고 이를 실선으로 확장하여 단열 구조의 충격 해석을 수행하는 방법이 제시되었다. 각 선급은 이런 연구 결과로부터 슬로싱 강도 평가 과정을 제시하고 있다(ABS 2006,

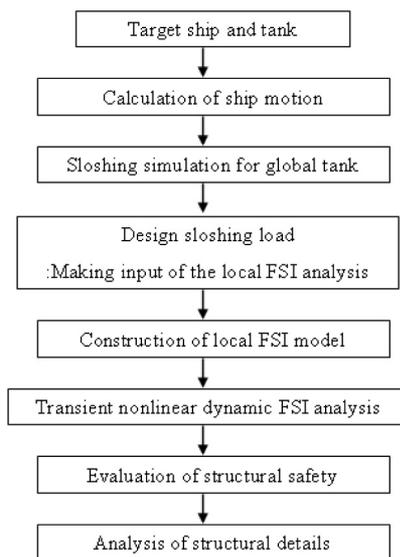


Fig. 1 Proposal procedure for sloshing strength assessment (신형철 등 2009)

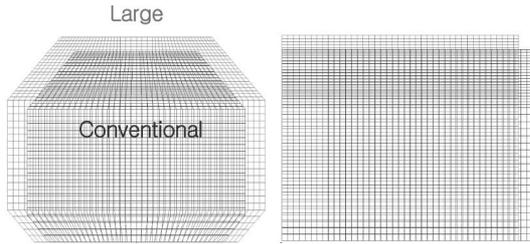


Fig. 2 Comparison of Cargo Tank Sizes between Conventional and Large LNG Carriers (Young-woo Lee et al. 2006, 박태현 등2007)

BV 2009, DNV 2006, LR 2009).

본 기술해설에서는 LNG 운반선 화물탱크 단열 구조의 슬로싱 강도 평가에 대해 필자가 직간접적으로 참여하거나 진행 상황에 대해 파악하고 있는 프로젝트를 중심으로 연구 동향을 소개한다.

2. 슬로싱 강도 평가 과정 소개

슬로싱 충격 하중에 의한 멤브레인 형 LNG 운반선 단열 구조의 강도 평가는 Fig. 1과 같은 과정으로 제안할 수 있다. 화물탱크 전체에 대해 슬로

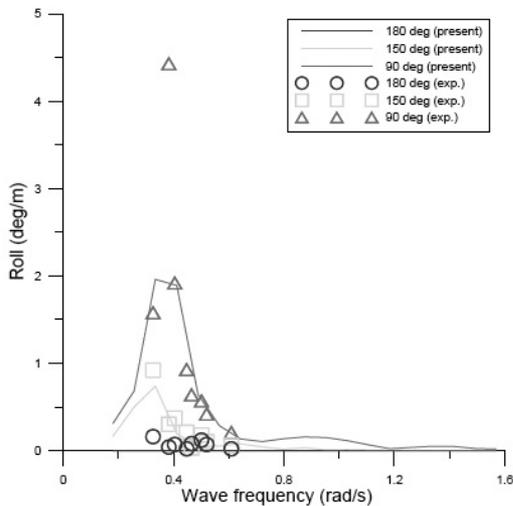


Fig. 3 Roll RAOs at 16 knots for draft A (양진호 등 2007)

싱 유동 해석을 수행하고, 예상되는 최대 충격 하중이 일어나는 순간에 대해 공간적인 상세 해석을 수행하여 구조 응답을 구할 수 있다. 과정 단계별로 기술하면 아래와 같다.

과정 1. 대상 선박과 화물 탱크를 선정한다. 2000년 이전까지는 화물용적 145,000 m³ 내외의 LNG 운반선이 주로 건조 운영되었지만, 최근에는 177,000 m³에서 216,000 m³, 최대 265,000 m³ 크기의 선박이 설계 건조되었다. Fig. 2는 기존 선박과 대형 선박의 탱크 크기를 비교한 자료이다.

과정 2. 대상 선박에 대해 파랑 중 선박 운동 해석을 수행한다.

Fig. 3은 대형 LNG 운반선에 대해 파 조우 각도에 따른 횡 동요 응답 결과이다. 이 응답 결과를 이용하여 선박 운동을 Fig. 4와 같이 시간 영역에서 정의하고, 모형 탱크에 대한 슬로싱 실험 또는 실선 탱크에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있다.

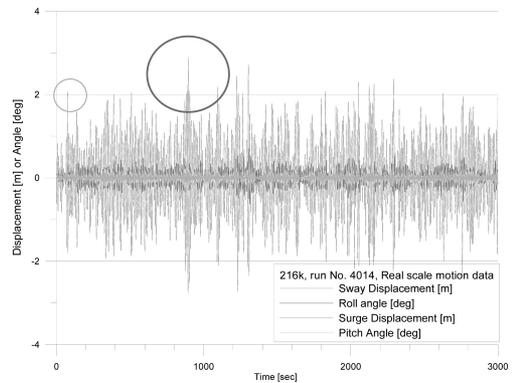


Fig. 4 Real scale tank motion data (신형철 등 2009)

과정 3. 선박 운동 해석 결과를 강체 탱크에 적용하여 슬로싱 모형 실험 또는 해석을 수행한다.

대형 LNG 운반선에 대한 운동 및 파랑하중을 산정하고, 모형 탱크 슬로싱 실험 또는 실선 슬로싱 시뮬레이션 기법으로부터 화물 탱크의 슬로싱 하중을 산정하는 방법에 대해서는 양진호 등(2007), 박

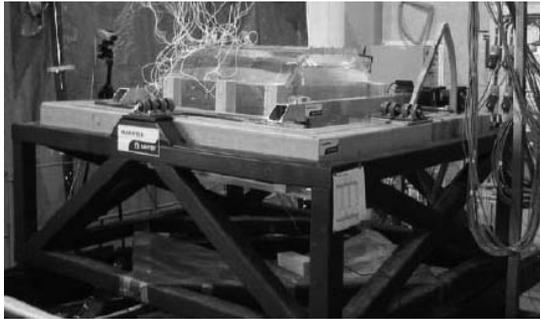


Fig. 5 Equipment for the Sloshing Tests (Young-woo Lee et al. 2006)

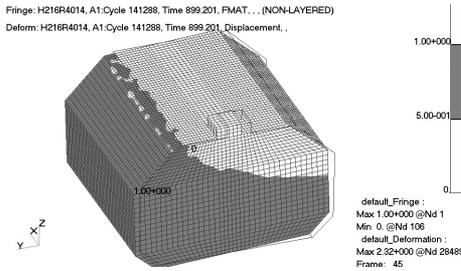


Fig. 6 Numerical Sloshing simulation for rigid tank model (신형철 등 2009)

종진 등(2005), Young-woo Lee et al. (2006), 남보우 등(2006)의 연구를 예로 들 수 있다. 수치 유체 역학 해석으로 슬로싱 시뮬레이션 기법을 개발하는 연구로는 박태현 등(2007)의 발표 자료를 참조할 수 있다.

과정 4. 모형 실험 또는 유동 해석 결과로부터 단열 구조의 강도 평가에 적용할 설계 슬로싱 하중을 생성한다.

최대 슬로싱 충격력이 발생하는 조건은 액체 화물의 적재 높이, 해상 조건과 파 조우 각도의 선택에 따라 달라진다. 또한 실선에 작용하는 압력의 크기는 모델 실험의 통계적 처리와 상사 법칙의 적용 방법에 대해 각 연구자 별로 차이가 존재한다(박종진 등 2005, 남보우 등2006, Young-woo Lee et al 2006, ABS 2006, BV 2009, DNV 2006, LR 2009).

신형철 등(2009)의 연구에서는 내부 유체의 운동

에너지가 최대인 시각에서 가장 큰 압력이 발생하는 위치를 선정하였다. 선정된 시각 및 위치에서 실제 슬로싱 충격 현상이 발생하는지 가시적으로 확인하고, 구조-유체 연성 해석을 위한 초기 하중 조건으로 변환하였다. 유동의 운동에너지가 큰 경우에 단열구조에 큰 충격력을 유발한다는 가정에서 유동의 가시화를 통한 질량과 운동량의 분포를 파악하는 것이 중요하다.

과정 5. 선정된 위치에서 구조-유체 연성 해석 모델을 구성한다.

대상 선박에 대해 단열 구조 및 주변 선각의 유한 요소 모델을 구성한다. 화물 탱크 전체에 대한 강제 슬로싱 해석 결과를 탱크 일부분으로 옮겨오며, 단열 구조와 주변 선체 구조는 변형체로 모델링 한다. 유체의 전체 영역에 대응하는 일부 영역의 유동에 대한 압력, 속도, 질량 분포 등의 결과가 상세 슬로싱 해석의 초기 조건으로 적용된다. 이 과정은 제정신(2003), S.K. Nam et al(2005), Sung Kil Nam et al(2006)의 연구에 소개되어 있다.

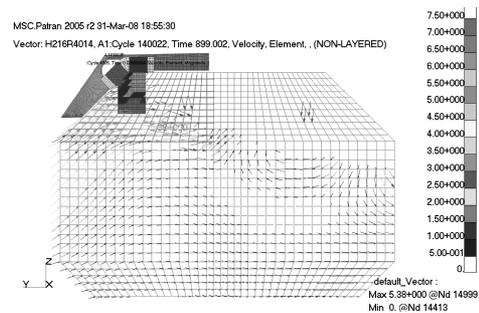


Fig. 7 Import flow field from rigid tank model to local FSI model (신형철 등 2009)

과정 6. 강제 슬로싱 해석 결과로부터 준비된 유체 유동을 구조-유체 연성 해석 모델에 적용하여 해석을 수행한다.

구조-유체 연성 해석 기법은 유체 충격력에 의한 구조 안전성의 평가를 위해 최근에 널리 사용되며,

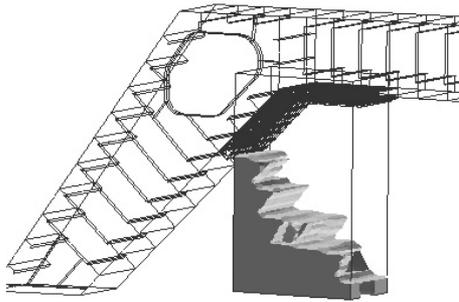


Fig. 8 슬로싱 충격의 구조-유체 연성 해석

다양한 상용 프로그램 및 자체 개발 프로그램이 이용되고 있다(제정신 2003, 신형철 등 2007, 2009).

과정 7. 구조의 동적 응답을 검토하여 선각 및 단열 구조의 안전성을 검토한다.

해석 결과로서는 유체 운동 정보 및 구조 변형 및 응력 등을 얻을 수 있다. 유체와 구조의 계면(interface surface)에 작용하는 충격 압력은 접촉 탐색 기법을 통해 얻어진다.

단열 구조와 선각의 안정성을 평가하는 방법은 재료의 파괴 조건과의 비교가 기본이다. 멤브레인 또는 선각 구조를 구성하는 금속 재료의 경우에는 좌굴 또는 소성 변형, 비금속 재료인 폴리우레탄 발포체(RPUF), 합판, 트리플렉스, 마스틱 등의 경우에는 압괴, 취성파괴, 박리, 접착부 파손 등을 고려할 수 있다.

과정 8. 상세 구조 모델에 대한 소성 변형, 좌굴, 피로 강도 등을 평가한다.

멤브레인의 주름 교차 부위, 폴리우레탄 발포체의 슬릿(slit) 부분이나 마스틱과 합판 또는 선각의 연결 부위에 대해서는 변형 결과를 상세 모델로 옮기는 방법을 적용하여 피로 강도나 응력 집중 효과를 평가할 수 있다.

3. 관련 연구 동향 소개



Fig. 9 Equivalent stress distribution at membrane, R-PUF and hull structure

3.1 재료 관련 연구

단열 구조는 금속 재료인 멤브레인, 비금속 재료인 폴리우레탄 발포체(RPUF), 합판, 트리플렉스, 마스틱 등으로 이루어진 복합 구조이다. 이런 재료 중에는 이방성 또는 점탄성 특성을 보이는 것이 있으며, 상온 및 저온에서의 특성 또한 상당히 다르다. 합리적인 단열 구조의 강도 평가를 위해서 이런 재료의 물성치를 결정하고, 동적 파단 특성 및 충격에 대한 피로 특성에 관한 연구가 진행되어 왔다.

LNG 운반선 방열시스템의 동적 강도와 피로 강도 특성을 조사하고 데이터베이스를 구축하는 연구로는 윤종원 등(2005), 손영주 등(2005), 이제명 등(2005), 이상민 등(2007), 이준환 등(2007)의 논문을 예로 들 수 있다. 저온 재료의 물성치를 확보하기 위한 연구는 김형식(2001), 홍진한 등(2008)의 논문이 있다.

3.2 수치 시뮬레이션 관련 연구

현재까지 실선, 즉 저온의 액화천연가스가 실려 있는 화물 탱크에 대한 구체적인 계측 자료가 없기

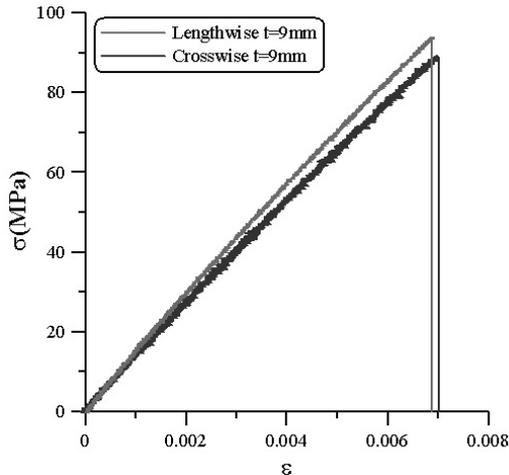


Fig. 10 Sample of uni-axial stress versus strain curves of plywood (이준환 등 2007)

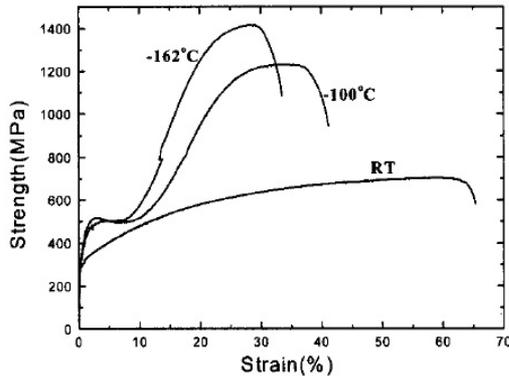


Fig. 11 Variations of stress-strain curve according to temperature (김형식, 2001)

때문에, 정확한 유체력을 평가하는데 한계가 존재하며, 모델 시험에 의한 결과를 실선으로 확장하는 방법에도 이견이 많은 상황이다. 또한, 실제 액화천연가스의 슬로싱 시험은 비용 및 위험성 때문에 가까운 장래에 구현되기 어렵다고 예상된다. 그러므로, 이 현상은 수치 해석으로 구현하는 것이 현실적인 방법이다.

수치 해석 기법에 관해서는 2차원 및 3차원 모델

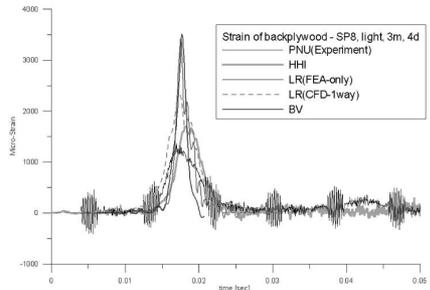


Fig.12 수면낙하 시험과 수치 해석의 비교(W S Kim et al 2008)

에 대한 파라미터 연구(Sung Kil Nam et al 2006), 3차원 모델에 대한 구조-유체 연성 슬로싱 해석 기법(S.K. Nam et al 2005), 낙하 시험 시물레이션을 통한 정량적 검증, 기존 및 대형 선박의 단열 구조에 대한 슬로싱 강도 상대 비교 등의 연구가 진행되어 왔다.

이런 연구를 통하여 슬로싱 하중에 대한 구조 응답은 유체 압력뿐 아니라 가스 효과, 유체 입사 형태, 재료 감쇠 등에 민감하게 변화한다고 판단할 수 있으며, 단열 구조의 강도를 평가하기 위해서는 여러 인자들을 고려할 수 있는 기법이 사용되어야 한다.

슬로싱 압력 및 구조 응답을 정량적으로 평가하기 위해서는 단열 구조를 수면에 낙하시키는 시험(유체 압력 및 구조 응답 측정) 및 수치 시물레이션으로써 수치 해석 기법의 검증이 가능하다고 판단된다(W S Kim et al 2008, 이상갑 등 2008).

3.3 기타 관련 연구

LNG 운반선의 구조 강도 평가에 관련된 다른 연

구로는, 멤브레인의 열 응력 해석 및 화물창의 온도 분포 해석에 관해서 한용연 등(2006)의 논문이 있다. 또한, 슬로싱 하중을 고려한 LNG선 펌프 타워의 구조설계에 관해서는 이광민 등(2007), 박태현 등(2008)의 논문, 펌프 타워 진동 문제에 대해서는 이종문 등(2005)의 연구가 있다. 선박이 빙 충격 하중을 받을 때에 멤브레인형 단열 구조의 충격 강도를 평가한 연구로는 오훈규 등(2008)의 논문을 소개할 수 있겠다.

최근에 실선에 시공되는 크기의 단열 구조에 대한 슬로싱 시험이 시도되고 있다(Sime Malenica et al 2009). 이런 연구를 통해 지금까지 개발된 수치 해석 기법을 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 글에서는 슬로싱 충격 하중에 의한 구조 강도를 평가하는 방법으로서, 슬로싱 하중의 생성과 이를 이용하여 시간 및 공간 영역에서의 상세 해석을 수행하여 단열 구조의 충격 강도를 평가하는 과정을 소개하였다. 즉, 단열 구조의 안전성은 유체역학적으로 산정된 하중과 변형을 등과 같은 구조 응답을 연결하여 평가하는 것이 타당하다.

향후에는 슬로싱 강도 평가법의 표준에 대한 공감대가 형성될 수 있을 것으로 예상된다. 실선의 손상 사례에 대한 해석 결과의 비교 검증을 통해 보강 설계 안을 도출하거나, 안전 한계 조건을 제시(Ito et al 2008)할 수 있을 것이다. 본 글에서 소개한 방법은 멤브레인 형, 구(spherical) 형, SPB형 등 다양한 방식의 액화 가스 저장 탱크의 설계와 안전성 확보에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김형식, 2001. "LNG 저장탱크의 멤브레인용 국산 304 스테인리스강의 기계적성질 및 피로수명 평가," 대한기계학회 논문집 A권, 제25권 제10호, pp. 1644-1650.
2. 남보우, 유동렬, 김용환, 김대웅, 김용수, 2006. 11., "LNG-FPSO의 파랑중 운동과 슬로싱의 연성 효과에 관한 연구,"

- 2006년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 666-672.
3. 박종진, 김영복, 하문근, 2005.6., "실해역 상태를 고려한 LNG 선박의 SLOSHING 해석, 대한조선학회 특별논문집, pp. 38-43
4. 박태현, 양진호, 이영우, 이현호, 2007.11., "유한요소법과 level set 방법을 이용한 2차원 슬로싱 해석," 2007년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 334-339.
5. 박태현, 양진호, 이영우, 김대수, 최형권, 2008.5., "멤브레인 액화천연가스 운반선의 펌프 타워에 작용하는 슬로싱 하중 해석," 2008년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1107-1113
6. 손영주, 김명현, 강성원, 노병재, 김화수, 최익홍, 2005.11., "LNG 단열재의 충격 손상 감지 시스템 개발," 2005년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 221-226.
7. 신형철, 최익홍, 2007.5., "유체 충격력에 대한 구조응답의 수치해석 연구," 2007년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1181-1187.
8. 신형철, 김화수, 노병재, 2009.5., "상세 해석 기법을 이용한 슬로싱 강도 평가," 2009년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 938-943.
9. 양진호, 최주혁, 이영우, 이현호, 2007.11., "대형 LNG 운반선에 대한 운동 및 파랑하중 해석," 2007년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 1365-1371.
10. 오훈규, 김화수, 이제명, 2008.11., "빙산 충돌에 따른 액화천연가스 운반선의 멤브레인 보냉구조의 안전성 검토," 대한조선학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp.253-260
11. 윤종원, 이제명, 백점기, 문정도, 김명현, 최익홍, 노병재, 김화수, 2005.11., "Mark III형 LNG 운반선 방열시스템 균열 문제에 관한 해석적 연구," 2005년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 202-209.
12. 이광민, 박재형, 한성곤, 허주호, 2007.9. "천연액화가스 운반선의 펌프타워 해석 시스템 개발," 대한조선학회 특별논문집, pp. 7-13
13. 이상갑, 황정오, 김화수, 2008.12. "멤브레인형 LNG선 화물창 단열시스템의 수면낙하 내충격 응답해석 I, II," 대한조선학회 논문집 제45권 제 6호, pp. 726-749.
14. 이상민, 김명현, 강성원, 강현돈, 노병재, 김화수, 2007.11., "MARK-III type LNGC 단열시스템의 피로강도 평가에 관한 연구(I)," 2007년도 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 1017-1022
15. 이제명, 백점기, 김명현, 박진석, 윤종원, 채용희, 정장영, 최익홍, 노병재, 김화수, 2005.5., "LNG 운반선 방열시스템의 동적강도특성에 관한 연구," 2005년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 872-879
16. 이종문, 박진화, 배종국, 라기웅, "LNG 운반선 펌프타워의 진동특성에 관한 연구, 2005.5., "2005년도 한국해양과학기술



- 협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1038-1043
17. 이준환, 이제명, 박인성, 노병재, 김희수, 2007.5., “멤브레인형 LNG선 방열시스템 동적특성에 관한 연구,” 2007년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 1167-1173
 18. 제정신, 2003.4. “상용프로그램의 구조-유체 연성해석 프록세스” 대한조선학회 2003년도 춘계학술대회 논문집, pp. 593-604.
 19. 한용연, 김희수, 김무승, 최익홍, 2006.5., “GAS 운반선의 3차원 온도 분포 해석 시스템 개발,” 2006년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 769-779
 20. 홍진한, 금동민, 한대석, 박인범, 전민성, 고경완, 이제명, 2008.10. “극저온용 스테인레스 강의 저온거동 특성,” 대한조선학회 논문집 제45권 제5호, pp. 530-537.
 21. ABS(American Bureau of Shipping), 2006.4. Guidance Notes on Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems under Sloshing Loads
 22. BV(Bureau Veritas), 2009.1. Preliminary Guide-lines Note - Structural Strength Assessment under Sloshing Loads, Membrane Type LNG Carriers & Offshore Floating Units
 23. DNV(Det Norske Veritas), 2006.6. Sloshing Analysis of LNG Membrane Tanks, Classification Notes No. 30.9
 24. LR(Lloyd's Register), 2009.5. Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations
 25. H. Ito, Y.S. Suh, S.E. Chun, Y.V. Satish Kumar, M.K. Ha, J.J. Park, H.C. Yu, and B. Wang, 2008.6. “A Direct Assessment Approach for Structural Strength Evaluation of Cargo Containment System under Sloshing Inside LNGC Tanks Based on Fluid Structure Interaction, Proc. of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008), pp. 1-11
 26. Šime Malenica, Zoran Mravak, Pierre Besse, Miroslaw Lech Kaminski and Hannes Bogaer, 2009.3. “Full Scale Experiments and New Methodology to Assess the Structural Behaviour of A Membrane LNGC Containment System under Breaking Waves - Project “Sloshel”,” GASTECH 2009
 27. S.K. Nam, W.S. Kim, B.J. Noh, H.C. Shin, I.H. Choe, K.H. Park, D.E. Kim and Sherif Rashed, 2005.12. “Structural Response of Membrane Tanks to Sloshing Load in a Mark III Type LNG Carrier,” TEAM Conference 2005.
 28. Sung Kil Nam, Wha Soo Kim, Byeong Jae Noh, Hyung Cheol Shin and Ick Hung Choe, 2006.9. “The Parametric Study on the Response of Membrane Tanks in a Mark III Type LNG Carrier using Coupled Hydro-Elastic Model,” RINA-ICSOT2006 (International Conference on Ship & Offshore Technology).
 29. Young-woo Lee, Tae-hyun Park, Jin-ho Yang, Hyun-ho Lee1, Hyun-soo Shin and Byeong-jae Noh, 2006.5., “Sloshing Assessment of Cargo Tank Design for Large LNG Carrier,” Proceedings of the Ninth International Marine Design Conference(IMDC), pp. 249-257
 30. W S Kim, B J Noh, H Lee, Z Mravak, J de Lauzon, J R Maguire, D Radosavljevic, S H Kwon, J Y Chung, 2008.6. “Fluid-structure interaction modeling, relating to membrane LNG ship cargo containment system,” Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE), pp. 75-84

신 형 철 | 현대중공업(주) 선박해양연구소



- 1968년생
 - 1999년 서울대 조선해양공학과 박사
 - 현 재: 현대중공업(주) 구조연구실
 - 관심분야: 비선형 구조동역학
 - 연락처: 052-202-5310
 - E-mail: hcshin@hhi.co.kr
-