



2015

슬로싱 하중 평가 지침
화물격납설비 강도 평가 지침

차 례

I. 총칙	1
1. 적용	1
2. 용어 정의	1
3. 지침 개요	2
4. 동등 효력	5
5. 제출 자료	5
II. 설계 슬로싱 하중 평가	9
1. 선체 운동 해석	9
2. 모형 실험	15
3. 슬로싱 시뮬레이션	18
III. 화물격납설비 구조 안정성 평가	20
1. 화물격납설비 종류	20
2. 비교평가법	22
3. 절대평가법	24
4. 허용기준	31
5. 재료물성치	34

I. 총칙

1. 적용

- (1) 이 지침은 액화 천연가스 운반선의 화물 탱크 내 액체와 선박의 운동에 의해 발생하는 슬로싱 하중 및 그 하중을 받는 멤브레인 액화천연가스 운반선의 화물격납설비의 평가 절차 및 기준에 적용한다.
- (2) 추가하여 이 지침은 **선급 및 강선 규칙**(이하 **강선 규칙**이라 한다) **13편 1부 4장 6절 [6]**의 적용 범위를 벗어나는 탱크를 갖는 선박의 슬로싱 하중의 계산 절차에 적용한다.
- (3) 이 지침은 멤브레인 기술을 활용한 해양 액화천연가스 저장·재기화구조물의 슬로싱 하중 및 화물격납설비 구조 평가 절차에 적용한다.
- (4) 이 지침의 요건은 **강선 규칙**의 다른 요건에 추가하여 적용한다.

2. 용어 정의

용어의 정의는 별도로 정하는 경우를 제외하고는 **강선 규칙**에 따른다.

- (1) “슬로싱”이란 액화천연가스 화물탱크 내부에서 발생하는 자유 유체 표면의 운동을 의미한다.
- (2) “포텐셜 유동”이란 점성 효과가 없는 이상화된 유체의 유동을 의미한다.
- (3) “임계 파랑 영역”이란 일생 최대 슬로싱 하중을 발생시키는 파랑 범위를 의미한다.
- (4) “패널 압력”이란 압력센서 묶음의 측정된 개별 압력 신호를 패널 면적에 대해 평균화 시킨 압력을 의미한다.
- (5) “임계 해상 상태(Critical sea condition)”란 일생 최대 슬로싱 하중을 발생시키는 해상 상태를 의미한다.
- (6) “파랑 스펙트럼”이란 파랑의 진동수에 대한 파랑 에너지 분포를 보여주는 그래프를 의미한다.
- (7) “회절방사법(Diffraction-Radiation Method)”이란 유체 유동현상을 회절 및 방사 이론을 이용하여 해석하는 방법을 의미한다.
- (8) “횡동요 감쇠 모델”이란 선체 점성 횡동요 감쇠를 포함한 모델을 의미한다.
- (9) “삼각 충격파”란 슬로싱 하중을 이상화하여 시간에 따른 압력 형상이 삼각형 형태를 갖도록 만든 슬로싱 하중을 의미한다.
- (10) “오름 시간”이란 삼각 충격파의 압력이 최저값에서 최고값에 도달하는 시간을 의미한다.
- (11) “내림 시간”이란 삼각 충격파의 압력이 최고값에서 최저값에 도달하는 시간을 의미한다.
- (12) “비대칭도(Skewness)”이란 삼각 충격파의 내림 시간을 오름 시간으로 나눈 비율을 의미한다.
- (13) “전산유체역학”이란 유체 운동을 컴퓨터를 활용한 수치해석을 의미한다.
- (14) “모형 실험”이란 슬로싱 충격 압력을 도출하기 위하여, 화물격납설비를 소형으로 제작하여, 선체 운동을 모사하면서 슬로싱 충격 하중을 도출하는 실험을 의미한다.
- (15) “압력 센서”란 실험 모형에 부착되어 슬로싱 압력을 측정하기 위해 사용되는 센서를 의미한다.
- (16) “설계 슬로싱 하중”이란 모형 실험으로부터 얻어진 압력으로 화물격납설비 설계 구조해석에 사용되는 설계 압력을 의미한다.
- (17) “비교평가법”이란 화물격납설비 구조 강도 평가하는 방법 중의 하나로서, 검증된 운항 기록을 가진 액화천연가스 멤브레인 선박을 기준 선박으로 선정하여, 이와 유사한 액화천연가스 화물격납설비 설계를 평가하는 방법을 말한다.
- (18) “강화비교평가법”이란 비교평가법의 하나로서, 화물격납설비 강도를 고려하여 평가하는 방법을 말한다.
- (19) “절대평가법”이란 액화천연가스 화물격납설비 구조 강도 평가하는 방법 중의 하나로서, 설계 슬로싱 하중을 도출하고, 직접구조해석을 수행하여 강도평가를 수행하는 방법을 말한다.
- (20) “멤브레인”이란 액화천연가스 화물격납설비에 사용되는 막 형태 물질을 의미한다.
- (21) “화물격납설비”란 화물을 격납하기 위한설비를 말하며, 1차방벽 및 2차방벽, 부수되는 방열재와 이들 사이에 공간(방열구역 및 방벽간 구역 포함)이 설치된 경우에는 이를 포함한 모든 것을 말하며, 또한 이들의 구성요소를 지지하는데 필요한 인접의 선체구조 역시 포함된다.
- (22) “1차 방벽”이란 화물격납설비가 2개의 주위벽으로 구성되는 경우에는 화물에 직접 접촉하여 격납할 수 있도록 설계된 화물격납설비의 내측 구성요소(액밀용기)를 말한다.
- (23) “2차 방벽”이란 1차 방벽으로부터 액체화물이 누설된다고 가상할 경우 그 누설액을 일시적으로 격납할 수 성능을 가지고 있고, 선체 구조의 온도가 초저온의 화물에 의하여 과냉각 되는 등의 위험한 상태까지 떨어지는 것을 방지하도록 설계된 화물격납설비의 외측구성요소(액밀의 성능을 가진 것)를 말한다.

- (24) “Mark III”란 GTT사에서 개발한 멤브레인 화물격납설비로서 1차 방벽으로 STS 304L을 사용한 적층 품 형태 화물격납설비를 말한다.
- (25) “CS 1”이란 GTT사에서 개발한 멤브레인 화물격납설비로서 1차 방벽으로 인바(Invar)를 사용한 적층 품 형태 화물격납설비를 말한다.
- (26) “폴리우레탄폼”이란 적층품 형태 화물격납설비(Mark III)의 방열재에 사용되는 충전 물질로서 단일 목적으로 사용한다
- (27) “마스틱”이란 화물격납설비에 위치하여 선체구조와 직접 접촉하는 물질을 의미한다.
- (28) “상부합판”이란 적층품 형태 화물격납설비(Mark III) 1차 방벽 아래에 위치하여 폴리우레탄폼과 접촉하는 합판을 의미한다.
- (29) “하부합판”이란 적층품 형태 화물격납설비(Mark III) 방열재 폴리우레탄폼과 마스틱 사이에 존재하는 합판을 의미한다.
- (30) “NO 96”이란 GTT사에서 개발한 멤브레인 화물격납설비로서 상자 형태 멤브레인 화물격납설비를 의미한다.
- (31) “1차 방열 상자”란 상자 형태 화물격납설비(NO 96)에서 1차 방벽과 2차 방벽 사이의 상자를 의미한다.
- (32) “2차 방열 상자”란 상자 형태 화물격납설비(NO 96)에서 선체와 마스틱을 통해서 접촉하는 상자를 의미한다.
- (33) “허용 기준”이란 화물격납설비 각 요소가 문제없이 견딜 수 있는 최대 응력, 변형률, 좌굴 및 사용 온도 등의 값을 의미한다.
- (34) “화물격납설비 강도”란 슬로싱 하중에 대해서 화물격납설비가 문제없이 견딜 수 있는 최대 강도를 의미한다.

3. 지침 개요

선체 운동이 화물탱크 운동을 발생시키고 슬로싱 현상을 일으킨다. 슬로싱은 화물탱크 내 자유 표면을 가진 유체의 상대적인 운동을 의미하며, 화물탱크 운동 주기 및 진폭, 기하학적 형상, 화물 유체의 밀도 혹은 점성 및 적하율 등에 의해서 영향을 받는다. 실물 탱크의 슬로싱은 쇄파(wave breaking), 탱크 내의 액체 및 기체 사이의 상변태, 1차 방벽과 가스로 인한 완충 효과(cushioning effect)같은 복잡한 물리 현상과 관련 있다. 슬로싱은 화물창 내부 구조 및 지지부에 높은 충격하중을 발생시킨다. 특별히 평면 및 모서리 영역을 가지는 멤브레인 형태 탱크는 슬로싱 충격에 의해 높은 최고치 압력을 발생시킨다. 슬로싱 압력으로 인한 액화천연가스 화물격납설비의 구조 안전성 요소는 중요한 설계 요소가 되었다. 이러한 문제를 발생시키는 슬로싱을 해결하기 위해 슬로싱 압력을 예측하기 위한 다양한 접근이 이루어지고 있다.

슬로싱 하중은 일반적으로 모형 실험을 사용하여 예측하거나, 전산유체역학 소프트웨어를 사용한 슬로싱 시뮬레이션을 통해 예측한다. 모형 실험은 부분적으로 물로 채워진 화물창 축소 모형 탱크에 선정된 해상 상태 및 탱크 운동 진폭응답함수로 얻어진 불규칙 운동으로 가진시키며, 이 때 탱크 벽에 발생하는 압력을 측정한다. 측정 데이터는 설계 슬로싱 하중을 결정하기 위해 사용한다. 측정된 슬로싱 하중은 유한 요소 해석을 위한 설계 슬로싱 하중을 정하는 과정을 거치게 된다. 설계 슬로싱 하중이 결정되면, 필요에 따라 구조 해석을 실시하여 구조 평가를 수행하게 된다.

모형 실험 데이터가 존재하는 기준 선박과 비교하여, 선박 및 탱크 형상의 중요한 설계 변화가 없는 경우에는 슬로싱 시뮬레이션을 수행한다. 기준 설계 및 신 설계에 대한 슬로싱 시뮬레이션을 수행하여 슬로싱 하중의 상대적인 증가 혹은 감소를 찾아낸다. 일생 최대 슬로싱 하중을 발생시킬 수 있는 임계 슬로싱 파랑 상태는 탱크 운동 크기 및 운동 주기에 기초하여 선정한다. 임계 슬로싱 파랑 상태가 선정된 후, 슬로싱 해석은 검증된 전산유체역학 소프트웨어로 수행한다.

설계 슬로싱 압력을 결정하면 2단계로 구조 해석을 수행한다. 단계 1 평가는 정적 구조해석으로 설계 슬로싱 하중 최대값을 정적하중으로 적용하여 화물창 시스템 안정성 평가를 진행하는 것이다. 단계 1 평가 결과가 허용 기준을 만족시키지 못하면 단계 2 평가를 실시하게 된다. 단계 2 평가는 동적 구조해석으로 설계 슬로싱 하중을 삼각파 형태로 적용한 상태로 해석을 진행하여 허용 기준을 만족하는지 여부를 판단하는 것이다. 이를 만족하면 설계를 인증할 수 있게 되지만, 그렇지 않은 경우에는 설계를 처음부터 새롭게 진행해야 한다.

앞에서 언급한 설계 슬로싱 압력 선정 과정과 이를 이용한 구조해석 과정을 그림 1에 표시하였다. 화물격납설비 구조 강도 평가는 강화비교평가법, 비교평가법 및 절대평가법을 통해서 진행된다. 비교평가법은 짧

은 점선으로 표시된 부분을, 강화비교평가법을 긴 점선으로 표시된 부분을 절대평가법은 실선으로 표시된 부분을 따라가면서 수행된다.

(1) 비교평가법

비교평가법은 좋은 운항 기록을 가진 액화천연가스 멤브레인 선박을 기준 선박으로 선정하여, 기준 선박과 유사한 액화천연가스의 화물격납설비 설계를 평가하는 방법이다.

기준 선박에 대한 설계 슬로싱 하중이 도출되고 목표 선박 또는 신 선박 설계에 대한 설계 슬로싱 하중이 동일한 방법으로 구해진다. 목표 선박의 설계 슬로싱 하중이 기준 선박의 설계 슬로싱 하중 값보다 작다면, 그 설계는 적합하다고 인증된다. 이 조건을 만족하지 못하면 절대평가법을 사용해야 한다.

목표 선박의 액화천연가스 화물격납설비의 주요 설계 인자-크기, 배치 및 비율-가 기준 선박의 액화천연가스 화물격납설비 설계 범위와 크게 변화하였다면 비교평가법을 적용할 수 없다. 이러한 경우에는 절대평가법을 적용해야 한다.

(2) 강화비교평가법

강화비교평가법은 비교평가법의 하나로서 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도가 기준 선박 대비 증가한 경우에 적용한다. 상자 형태 화물격납설비(No 96)의 표준 상자를 강화 또는 슈퍼 강화 상자로 개선한 경우에 이 절차가 적용될 수 있다.

기준 선박 및 목표 선박에 대한 설계 슬로싱 하중 및 화물격납설비 강도를 구하여야 한다. 목표 선박의 화물격납설비 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율이 기준 선박의 화물격납설비 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율보다 작으면 목표 선박 화물격납설비의 설계 인증을 받게 된다. 이 조건을 만족하지 못하면 절대평가법을 사용해야 한다.

목표 선박의 액화천연가스 화물격납설비의 주요 설계 인자(크기, 배치 및 비율)가 기준 선박의 액화천연가스 화물격납설비 설계 범위와 크게 변화하였다면 강화비교평가법을 적용할 수 없다. 이러한 경우에는 절대평가법을 적용해야 한다.

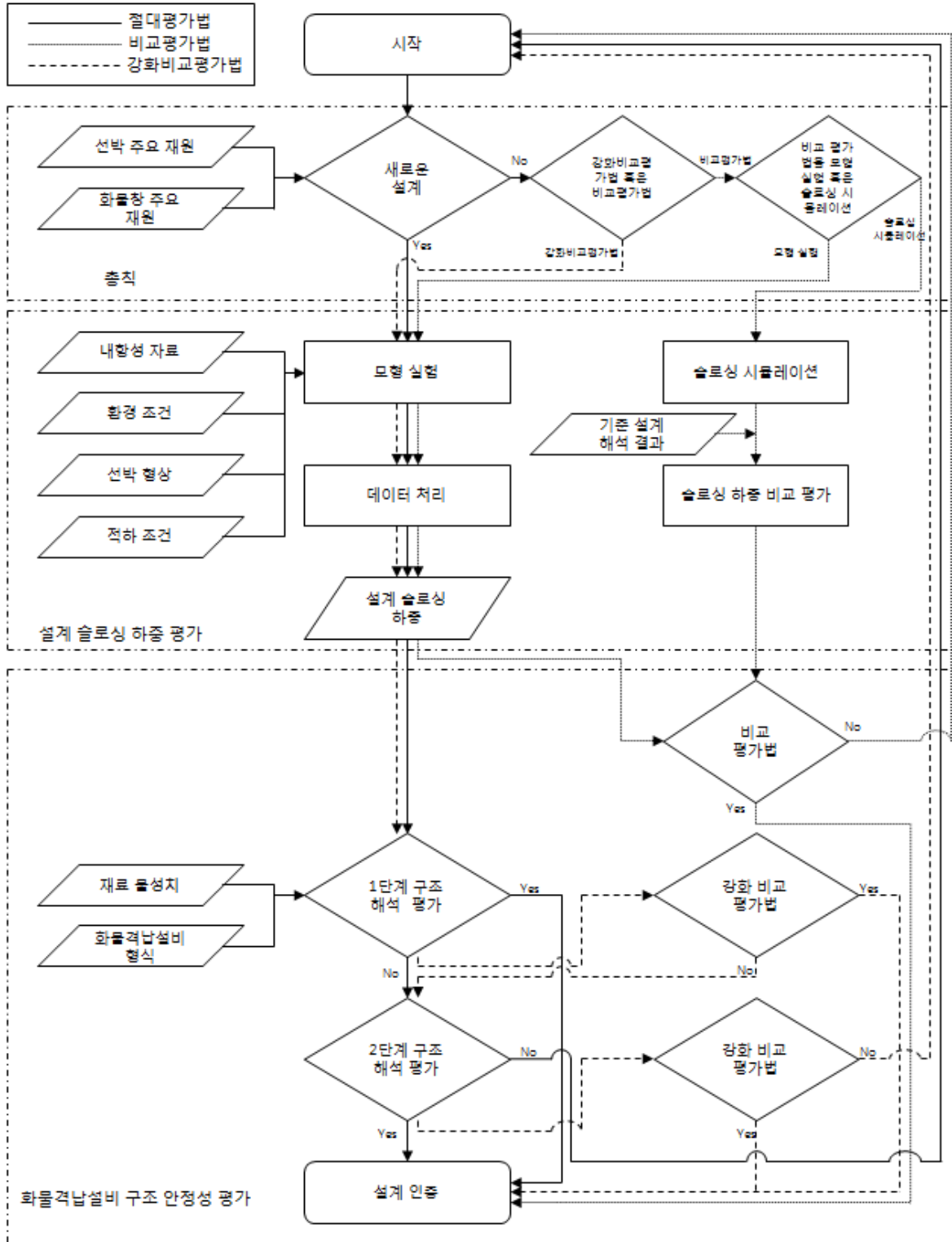


그림 1 슬로싱 하중 평가 및 화물격납설비 강도 평가 절차 개념도

(3) 절대평가법

절대평가법은 **그림 2**와 같이 두 단계를 거쳐서 진행된다. 제 1단계에서는 설계 슬로싱 하중 최대값을 정적 하중으로 적용하여 안전성 평가를 진행한다. 제 1단계에서 허용 기준을 만족시키면 설계를 인증할 수 있다. 제 1단계에서 허용 기준을 만족시키지 못하면 제 2단계 해석을 실시하게 된다. 삼각과 형태의 설계 슬로싱 하중을 적용하여 동적 비선형 해석을 진행하고 허용 기준을 만족하는지 여부를 판단하게 된다. 허용기준을 만족하게 되면 설계를 인증할 수 있게 되지만, 그렇지 않을 경우에는 설계를 처음부터 새롭게 시작해야 한다.

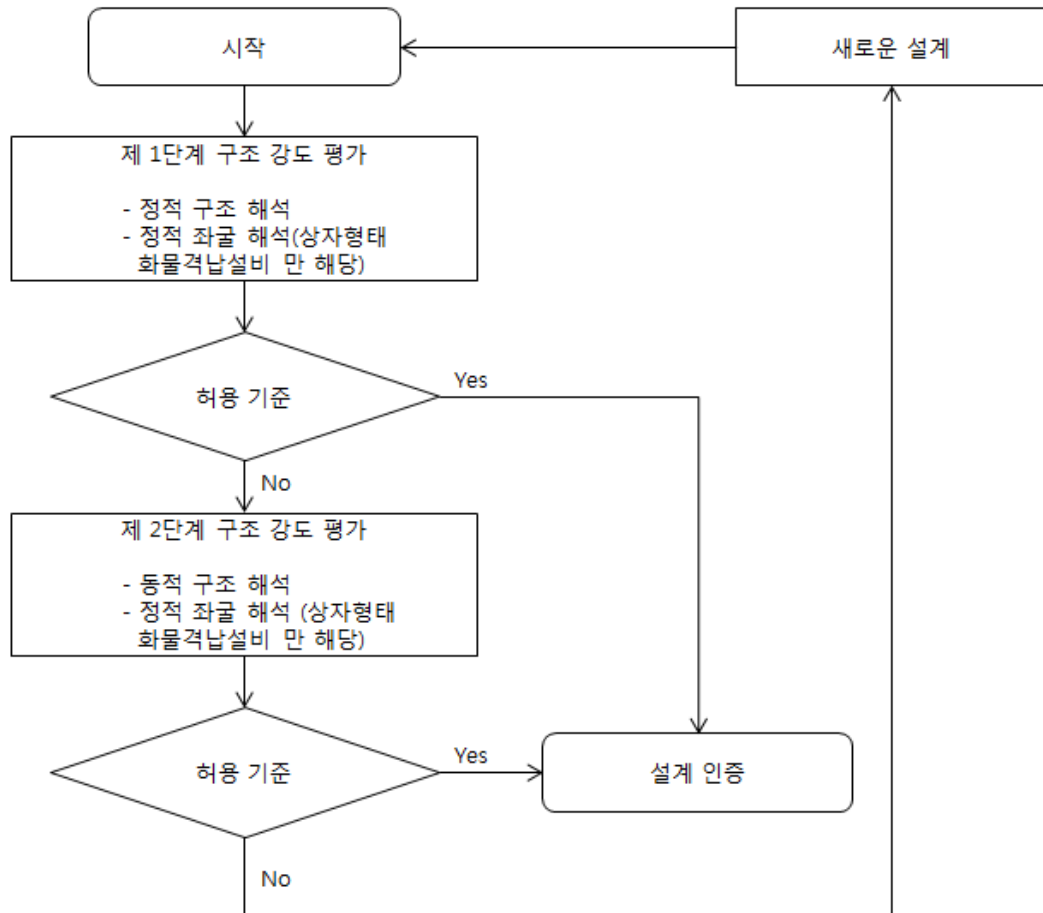


그림 2 2단계 절대평가법 개념도

4. 동등 효력

이 지침의 규정을 적용하는 것이 적합하지 아니하거나 이 지침에 규정되어 있지 아니한 특수한 방법, 절차가 이 지침의 규정에 적합한 것과 동등이상의 효력이 있다고 우리 선급이 인정하는 경우에는 이 지침의 규정에 적합한 것으로 본다.

다른 슬로싱 하중 평가법이 본 지침과 동등하다면, 이 지침에 대한 대안책으로 우리 선급은 인정할 수 있다. 이 경우에 슬로싱 하중 평가가 본 지침의 기준과 최소 동등하다는 것을 검증하기 위해 관련 정보를 우리 선급에 제출하고 평가방법에 대하여 선급과 협의하여 진행해야 한다. 초기 설계 단계에서 다른 방법을 쓰는 의도가 충분히 협의되어야 한다.

5. 제출 자료

(1) 승인용 자료

화물격납설비 구조 강도 평가법에 따라 다음 자료를 제출하여 우리 선급의 승인을 받아야 한다. 또한, 우리 선급이 필요하다고 인정하는 경우에는 아래에 규정된 것 이외의 자료의 제출을 요구할 수 있다.

(가) 모형 실험으로 진행되는 경우의 비교평가법 승인용 자료

- (a) 기준 선박 화물격납설비 인증 자료
 - (i) 일자, 적하높이, 해상상태, 선박속도 및 파입사각 등을 포함한 항해 정보
 - (ii) 항해 슬로싱 하중과 설계 슬로싱 하중 비교 분석 자료
 - (iii) 기준 선박 설계 슬로싱 하중
- (b) 목표 선박의 운동 해석 자료
 - (i) 운동 해석 입력(적하상태, 흘수, 메타센터 높이 및 선박 무게 중심 등) 자료
 - (ii) 운동 해석 모델 자료
 - (iii) 운동 해석 상세 해석 결과
 - (iv) 모형 실험을 위한 임계 해상 상태 및 파랑 상태 분석 자료
- (c) 목표 선박의 모형 실험 자료
 - (i) 모형 탱크 및 센서의 사양
 - (ii) 운동발생기 및 데이터 측정 시스템의 사양
 - (iii) 운동발생기 모니터링 자료
 - (iv) 측정 데이터 자료
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (vi) 모형 실험 데이터 후처리 방법
- (d) 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도 자료
 - (i) 재료 물성치 데이터 및 근거
 - (ii) 허용 기준 데이터 및 근거
 - (iii) 구조 해석 결과
 - (iv) 기준 선박 화물격납설비와 목표 선박 화물격납설비 비교 평가 자료
- (e) 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료
 - (i) 화물격납설비 종류 관련 자료
 - (ii) 대표 기본 모델 상세 도면
- (나) 슬로싱 시뮬레이션으로 진행되는 경우의 비교평가법 승인용 자료
 - (a) 기준 선박의 운동 해석 자료
 - (i) 운동 해석 입력(적하상태, 흘수, 메타센터 높이 및 선박 무게 중심 등) 자료
 - (ii) 운동 해석 모델 자료
 - (iii) 운동 해석 상세 해석 결과
 - (iv) 모형 실험을 위한 임계 해상 상태 및 파랑 상태 분석 자료
 - (b) 기준 선박의 모형 실험 자료
 - (i) 모형 탱크 및 센서의 사양
 - (ii) 운동발생기 및 데이터 측정 시스템의 사양
 - (iii) 운동발생기 모니터링 자료
 - (iv) 측정 데이터 자료
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (vi) 모형 실험 데이터 후처리 방법
 - (c) 기준 선박 전산유체역학자료
 - (i) 전산유체역학 소프트웨어 검증 자료
 - (ii) 임계 슬로싱 파랑 상태 자료
 - (iii) 전산유체역학 해석 모델
 - (iv) 전산유체역학 해석 결과
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (d) 목표 선박의 전산유체역학 자료
 - (i) 전산유체역학 소프트웨어 검증 자료
 - (ii) 임계 슬로싱 파랑 상태 자료
 - (iii) 전산유체역학 해석 모델
 - (iv) 전산유체역학 해석 결과
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (vi) 기준 선박 설계 슬로싱 하중과 목표 선박 설계 슬로싱 하중 비교 분석

- (e) 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료
 - (i) 화물격납설비 종류 관련 자료
 - (ii) 대표 기본 모델 상세 도면
- (다) 강화비교평가법 승인용 자료
 - (a) 기준 선박 화물격납설비 인증 자료
 - (i) 일자, 적하높이, 해상상태, 선박속도 및 파입사각 등을 포함한 항해 정보
 - (ii) 항해 슬로싱 하중과 설계 슬로싱 하중 비교 분석 자료
 - (iii) 기준 선박 설계 슬로싱 하중
 - (b) 목표 선박의 운동 해석 자료
 - (i) 운동 해석 입력(적하상태, 홀수, 메타센터 높이 및 선박 무게 중심 등) 자료
 - (ii) 운동 해석 모델 자료
 - (iii) 운동 해석 상세 해석 결과
 - (iv) 모형 실험을 위한 임계 해상 상태 및 파랑 상태 분석 자료
 - (c) 목표 선박의 모형 실험 자료
 - (i) 모형 탱크 및 센서의 사양
 - (ii) 운동발생기 및 데이터 측정 시스템의 사양
 - (iii) 운동발생기 모니터링 자료
 - (iv) 측정 데이터 자료
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (vi) 모형 실험 데이터 후처리 방법
 - (d) 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도 평가 자료
 - (i) 재료 물성치 데이터 및 근거
 - (ii) 허용 기준 데이터 및 근거
 - (iii) 구조 해석 결과
 - (iv) 기준 선박 화물격납설비와 목표 선박 화물격납설비 비교 평가 자료
 - (e) 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료
 - (i) 화물격납설비 종류 관련 자료
 - (ii) 대표 기본 모델 상세 도면
- (라) 절대평가법 승인용 자료
 - (a) 목표 선박의 운동 해석 자료
 - (i) 운동 해석 입력(적하상태, 홀수, 메타센터 높이 및 선박 무게 중심 등) 자료
 - (ii) 운동 해석 모델 자료
 - (iii) 운동 해석 상세 해석 결과
 - (iv) 모형 실험을 위한 임계 해상 상태 및 파랑 상태 분석 자료
 - (b) 목표 선박의 모형 실험 자료
 - (i) 모형 탱크 및 센서의 사양
 - (ii) 운동발생기 및 데이터 측정 시스템의 사양
 - (iii) 운동발생기 모니터링 자료
 - (iv) 측정 데이터 자료
 - (v) 설계 슬로싱 하중 분석 자료
 - (vi) 모형 실험 데이터 후처리 방법
 - (c) 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도 평가 자료
 - (i) 재료 물성치 데이터 및 근거
 - (ii) 허용 기준 데이터 및 근거
 - (iii) 구조 해석 결과
 - (iv) 기준 선박 화물격납설비와 목표 선박 화물격납설비 비교 평가 자료
 - (d) 화물격납설비 도면 및 관련 지지부 자료
 - (i) 화물격납설비 종류 관련 자료
 - (ii) 대표 기본 모델 상세 도면

(2) 참고용 자료

(가) 선박의 주요 재원

(나) 냉각속도(Cooling down speed), 화물의 적재 제한 높이 등의 화물 운용상의 제한 조건

(다) 각 화물창에서 화물격납설비 배치도

(라) 화물격납설비가 설치된 상태의 선박 일반 배치도

(마) 화물격납설비의 설계 제한 조건

II. 설계 슬로싱 하중 평가

1. 선체 운동 해석

(1) 일반사항

- (가) 선박 및 탱크 운동에 대한 장기 해석은 파도 및 선박 운동의 선형 중첩 원리에 기초하는 스펙트럼 기반 통계 분석을 통해 계산해야 한다.
- (나) 해상 조건을 해상 상태 회기주기, 슬로싱 공진 주기와 근접하는 파랑주기 및 주요 운동 인자에 기초하여 선정해야 한다.

(2) 환경조건

(가) 기본 고려사항

액화천연가스 운반선은 북대서양에서 제약없이 운행한다고 가정하며, 설계를 북대서양 해상 상태를 기준으로 진행해야 한다. 북대서양의 파랑 자료는 「IACS Recommendation No.34(Nov. 2001)」의 파랑 분산표를 사용하며 표 1에 표시하였다. 파랑 분산표는 파랑 주기 당 10^{-8} 확률에 해당하는 설계수명 회귀주기를 갖는 극한 해상 하중을 계산하기 위해 사용한다.

표 1 IACS 북대서양 파랑분산표

H_s/T_z^*	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	SUM
0.5	0.0	0.0	1.3	133.7	865.6	1186.0	634.2	186.3	36.9	5.6	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3050
1.5	0.0	0.0	0.0	29.3	986.0	4976.0	7738.0	5569.7	2375.7	703.5	160.7	30.5	5.1	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	22575
2.5	0.0	0.0	0.0	2.2	197.5	2158.8	6230.0	7449.5	4860.4	2066.0	644.5	160.2	33.7	6.3	1.1	0.2	0.0	0.0	23810
3.5	0.0	0.0	0.0	0.2	34.9	695.5	3226.5	5675.0	5099.1	2838.0	1114.1	337.7	84.3	18.2	3.5	0.6	0.1	0.0	19128
4.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	196.1	1354.3	3288.5	3857.5	2685.5	1275.2	455.1	130.9	31.9	6.9	1.3	0.2	0.0	13289
5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	51.0	498.4	1602.9	2372.7	2008.3	1126.0	463.6	150.9	41.0	9.7	2.1	0.4	0.1	8328
6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	12.6	167.0	690.3	1257.9	1268.6	825.9	386.8	140.8	42.2	10.9	2.5	0.5	0.1	4806
7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	52.1	270.1	594.4	703.2	524.9	276.7	111.7	36.7	10.2	2.5	0.6	0.1	2586
8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	15.4	97.9	255.9	350.6	296.9	174.6	77.6	27.7	8.4	2.2	0.5	0.1	1309
9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	4.3	33.2	101.9	159.9	152.2	99.2	48.3	18.7	6.1	1.7	0.4	0.1	626
10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	10.7	37.9	67.5	71.7	51.5	27.3	11.4	4.0	1.2	0.3	0.1	285
11.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.3	13.3	26.6	31.4	24.7	14.2	6.4	2.4	0.7	0.2	0.1	124
12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	4.4	9.9	12.8	11.0	6.8	3.3	1.3	0.4	0.1	0.0	51
13.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	5.0	4.6	3.1	1.6	0.7	0.2	0.1	0.0	21
14.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	1.2	1.8	1.8	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	8
15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	3
16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1
SUM	0	0	1	165	2091	9280	19922	24879	20870	12898	6245	2479	837	247	66	16	3	1	10000

(나) 파랑 스펙트럼

파랑 스펙트럼은 다음 식으로 표현되는 브렛치나이더 혹은 피어슨-모스코위츠 스펙트럼 (Bretschneider or 2 Parameter Pierson-Moskowitz Spectrum)을 사용하며, 아래와 같이 표시된다.

$$S(w) = \frac{H_s^2}{4\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 w^{-5} \exp\left[-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z}\right)^4 w^{-4}\right]$$

S : 파랑 에너지 밀도(m2sec)

H_s : 유의 파고(m)

w : 각주파수(rad/sec)

T_z : 평균 제로 업 크로싱(zero up crossing) 파랑 주기(sec)

$$T_z = 2\pi \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

주어진 입사각에 대한 응답의 n차 스펙트럼 모멘트는 다음에 따른다.

$$m_n = \int_{\theta_0 - 90^\circ}^{\theta_0 + 90^\circ} \sum_{\omega} f_s(\theta) \omega^n S(\omega | H_s, T_z, \theta)$$

보통 $f_s(\theta) = k \cos^2(\theta)$ 로 정의되는 확산 함수(spreading function)를 사용하며 다음을 만족해야 한다.

$$\sum_{\theta_0 - 90^\circ}^{\theta_0 + 90^\circ} f_s(\theta) = 1$$

θ_0 : 주요 파랑 입사각(deg)

θ : 주요 파랑 입사각 주위의 상대적 확산(relative spreading)(deg)

(3) 적하 상태

(가) 해석 대상 화물창

일반적으로 No. 2 화물창은 선체 운동 중심으로부터 거리가 멀고 및 탱크 크기가 크기 때문에, 가장 가혹한 슬로싱 현상이 발생하는 것으로 고려된다. 본 지침에서는 No. 2 화물창을 기본으로 평가를 진행한다. **그림 3**은 전형적인 멤브레인 형식 액화천연가스 화물창 및 No. 2 화물창을 표시하고 있다.

(나) 화물 적재높이

슬로싱 해석을 위한 화물 적재높이는 설계자가 제시하는 적하지침서에 기초하여 선정해야 한다. 그렇지 않은 경우, 표준 적재높이에 추가하여 부분 적재높이에 대하여 분석해야 한다. 화물 적재높이는 탱크 높이(H)에 대한 화물의 적재 높이 비율로 표시해야 한다.

(a) 표준 적재높이는 70%H보다 높고 10%H 보다 낮은 적재높이를 의미하며, 10%H, 70%H, 80%H, 90%H 및 95%H 적재 높이에서 해석을 수행해야 한다.

(b) 화물 적재높이에 제한이 없을 때, 25%H, 30%H, 40%H, 50%H 및 60%H 적재 높이를 표준 적재 높이에 추가하여 슬로싱 해석에 고려해야 한다.

(다) 운동 해석을 위한 하중 조건

운동 해석의 주요한 인자인 흘수, 메타센터 높이 및 선박 무게 중심은 각 화물 적재높이에 따라 달라진다. 일반적으로 각 화물 적재높이에 대한 운동 분석은 적하지침서에 주어진 하중 조건으로 수행하는 것을 원칙으로 한다. 표준 적재 높이에 대해, 70%H 이상의 적재 높이 하중 조건에 대해 도착 시 만재적하상태를, 10%H 이하의 적재 높이 하중 조건에 대해 도착 시 밸러스트 상태를 사용할 수 있다. 적재 높이에 제한이 없는 경우, 화물창의 슬로싱 유동과 선체 운동을 연성하여 해석할 수 있다.

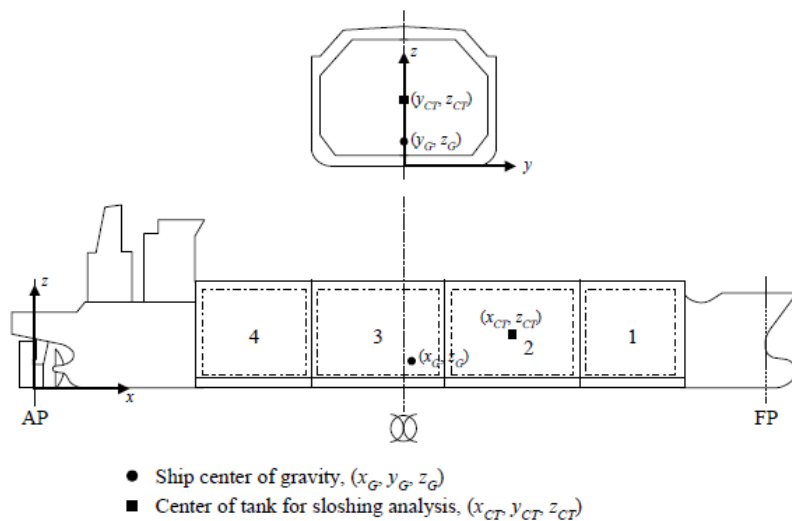


그림 3 액화천연가스 화물창 및 No. 2 화물창 위치

(4) 선체 운동 및 극한값 분석

(가) 개요

- (a) 이 계산은 진폭응답함수(Response Amplitude Operator)에 기초한 스펙트럼기반 접근법에 의해 실행한다. 파랑 진동수 및 파랑 방향범위에서 단위 규칙파를 적용하였을 때, 진폭응답함수를 계산해야 한다. 탱크 운동 진폭응답함수는 모형 실험의 불규칙 운동을 발생시키는데 사용해야 한다.
- (b) 우리 선급이 인정한 프로그램을 사용하여 선체 운동 및 파랑하중 해석을 수행하고 6자유도 운동(2D strip의 경우 종운동 제외), 각 단면에 작용하는 전단력 및 모멘트, 특정 위치에서의 가속도 및 압력(2D strip일 경우 x방향 압력 제외)에 대한 전달함수를 계산한다.

(나) 회절방사법(Diffraction-Radiation Method)

- (a) 파랑 유도 운동 계산은 포텐셜 유도 기반 회절방사법을 이용하는 운동 해석 코드를 적용하여 수행해야 한다.
- (b) 선급에서 제시한 것과 다른 운동 코드를 사용한다면 선급에서 제시한 기준 액화천연가스 운반선에 대한 운동 해석 결과를 제시해야 한다. 이 지침의 규정을 적용하는 것이 적합하지 아니하거나 이 지침에 규정되어 있지 아니한 특수한 방법, 절차가 이 지침의 규정에 적합한 것과 동등이상의 효력이 있다고 우리 선급이 인정하는 경우에는 이 지침의 규정에 적합한 것으로 본다.

(다) 유체 모델링 고려사항

- (a) 액화천연가스 운반선 선체 형상은 설계자가 제공하는 자료를 사용하여 정확하게 모델링해야 한다. 각 하중 조건 및 화물 적재높이에 대한 무게 중심 위치, 질량 및 관성 반경은 설계자가 제공한 적하지침서를 참조해야 한다.
- (b) 선체 운동 해석 모델은 선박의 접수면에 대한 기하학적 형상 및 유체동역학적 특성을 잘 반영할 수 있어야 한다. 패널을 충분히 세분화하여 입력파 및 회절파를 분석할 수 있어야 한다.
- (c) 2D 스트립 모델
선박 길이 방향으로 최소 25~30개의 스트립을 사용하며 각 스트립을 한쪽 현을 최소 10개 이상의 좌표점으로 정의해야 한다. 형상이 복잡한 부위(선수미부 및 빌지부)는 좌표점을 증가시켜 기하학적 형상을 잘 표현하고 형상이 변하지 않는 부위(중앙 횡단면)도 유체 동하중의 구배를 충분히 반영할 수 있도록 적절히 분할해야 한다.
- (d) 3D 패널 모델
수치해석상의 오차를 줄이기 위하여 충분히 작은 크기의 패널로 모델링해야 한다. 선박 길이 방향으로 최소 30~40개의 단면을 사용하고 각 단면의 한쪽 현을 15~20개의 패널로 정의해야 한다. 따라서 전체 선박 형상을 정의하기 위하여 500~800개의 패널을 사용한다. 형상이 복잡한 부위(선수미부 및 빌지부)는 패널수를 증가시켜 기하학적 형상을 잘 표현하고 형상이 변하지 않는 부위(중앙 횡단면)도 유체 동하중의 구배를 충분히 반영할 수 있도록 적절히 분할해야 한다.
- (e) 액화천연가스 운반선 관성 반경이 선박 설계 초기 단계에서 제공되지 않을 때, 다음 값을 사용할 수 있다.

$$r_{xx} = 0.35B : \text{만재적하 상태}$$

$$0.45B : \text{밸러스트 조건}$$

$$r_{yy} = r_{zz} = 0.25L_{pp}$$

r_{xx} : 횡동요 회전 관성 반경(m)
 r_{yy} : 종동요 회전 관성 반경(m)
 r_{zz} : 선수동요 회전 관성 반경(m)
 B : 선박폭(m)
 L_{pp} : 수선간 길이(m)

(라) 선체 운동 및 탱크 가속도 진폭응답함수

전체 6자유도 선체 운동 및 탱크 중심 가속도에 대한 진폭응답함수를 구해야 한다. 탱크 중심의 횡방향 및 종방향 가속도는 탱크에 고정된 동좌표계로 정의되며, 경사 및 중력 효과를 포함해야 한다.

(a) 탱크 중심에서 종방향 가속도

$$A_x = \ddot{X}_1 + (z_{CT} - z_G)\ddot{X}_5 - (y_{CT} - y_G)\ddot{X}_6 + gX_5$$

(b) 탱크 중심에서 횡방향 가속도

$$A_y = \ddot{X}_2 - (z_{CT} - z_G) \ddot{X}_4 + (x_{CT} - x_G) \ddot{X}_6 - gX_4$$

(c) 탱크 중심에서 수직 가속도

$$A_z = \ddot{X}_3 + (y_{CT} - y_G) \ddot{X}_4 - (x_{CT} - x_G) \ddot{X}_5$$

x_G, y_G, z_G : 고려하는 선박의 무게 중심(m)

x_{CT}, y_{CT}, z_{CT} : 고려하는 화물탱크의 중심(m)

g : 중력가속도(9.8065m/s²)

X_1, \ddot{X}_1 : 선박 무게 중심의 전후동요 및 종방향 가속도(m, m/s²)

X_2, \ddot{X}_2 : 선박 무게 중심의 좌우동요 및 횡방향 가속도(m, m/s²)

X_3, \ddot{X}_3 : 선박 무게 중심의 상하동요 및 수직 가속도(m, m/s²)

X_4, \ddot{X}_4 : 횡동요 및 횡동요 가속도(rad, rad/s²)

X_5, \ddot{X}_5 : 종동요 및 종동요 가속도(rad, rad/s²)

X_6, \ddot{X}_6 : 선수동요 및 선수동요 가속도(rad, rad/s²)

(d) 유체 동역학 해석 시 0°~360° 걸쳐 전 방향을 고려해야 하며 최대 30° 간격으로 입사각을 적용해야 한다.

(e) 충분히 넓은 범위의 파랑 진동수를 고려해야 한다. 권고하는 파랑 진동수 범위는 0.2rad/sec에서 1.2rad/sec까지이며, 0.05rad/sec로 값을 증가시키며 적용해야 한다.

(마) 선박 속도

선체 운동 및 슬로싱 해석의 장기 통계를 위해 사용되는 진폭응답함수의 계산을 위해, 설계 속도의 75%를 선박 속도로 고려해야 한다. 모형 실험의 탱크 운동에 사용되는 진폭응답함수 계산을 위해서, 다양한 선박 속도를 다양한 해상 상태에 사용할 수 있다. 가혹한 해상 상태의 선박 속도 감소는 예인 수조 실험이나 유사한 구조의 액화천연가스 운반선 운항 경험으로부터 예측할 수 있다.

(바) 횡동요 감쇠모델

선수 사파의 선박 횡동요 운동은 특히 횡동요 공진 시에, 선체 점성 횡동요 감쇠에 의해 특히 영향을 많이 받는다. 포텐셜 유동 이론에 기초한 운동 해석에서는, 적절한 점성 횡동요 감쇠 모델을 패널 방법에 도입해야 한다. 횡동요 감쇠 모델에 대한 실험 데이터 혹은 실험 방법을 선급과 협의 하에 선체 점성 횡동요 감쇠를 결정할 때 사용할 수 있다. 러더 및 빌지킬에 의한 횡동요 감쇠 효과를 운동 해석에서 고려해야 한다.

(사) 선체 운동의 극한값 도출

각각의 선체 운동 및 가속도의 일생 최대값을 결정하기 위하여 극한값 분석을 수행해야 한다. 슬로싱 시뮬레이션을 위한 파랑 상태 및 탱크 운동의 선정은 일생 최대값을 사용된다.

(5) 모형 실험을 위한 임계 조건 선정

(가) 해상 상태 선정

(a) 모형 실험은 운동 해석을 바탕으로 선박의 일생 동안 최대 슬로싱 운동 발생 가능성이 큰 해상 상태를 선정하여 수행해야 한다. 해상 상태 발생 가능성, 탱크 운동 응답, 탱크 공진 주기와 조우 파랑주기의 근접성에 기초하여 해상 상태의 가혹함을 판단해야 한다.

(b) 설계 슬로싱 하중은 장기 확률이 10⁻⁸ 초과확률 일 때를 기초하여 정의해야 한다. 선체 운동과 다르게, 스펙트럼 기반 장기 통계 분석은 높은 비선형성으로 인해 슬로싱 하중 선정에 사용할 수 없다. 그 대안으로 등가단기접근법을 장기 극한값을 예측하는데 사용할 수 있다. 그 절차는 다음과 같다.

(i) 선박 설계 수명동안 만날 수 있는 가장 가혹한 폭풍을 표시하는 설계 해상 상태를 정의한다. 가혹한 파랑상태의 선박 운행을 고려하여, 다양한 해상 상태의 선수파 및 횡파 상태를 사용한다. 표 2는 40년 및 1년 해상 상태에 대한 해상 상태를 표시한다. 이것들은 표 1에 표시된 파랑분산 표에 의한 발생 확률 수준에 기초하여 선정한 것이다. 40년 해상 상태는 선수파(150°~180°)에 사

II. 설계 슬로싱 하중 평가

용되고, 1년 해상 상태는 횡파($90^\circ \sim 120^\circ$)에 사용하며, 선미사파에 대해서는 내삽된 파고를 사용한다.

- (ii) 탱크 운동 반응, 슬로싱 공진 주기 및 슬로싱 시뮬레이션 결과에 기초하여, 40년 및 1년 해상 상태 중에 모형 실험을 위한 해상 상태를 선정한다.
 - (iii) 장과정 가정 하에 선정된 해상 상태에 대해 모형 실험을 진행한다.
 - (iv) 각 해상 상태에 대한 슬로싱 하중 단기 극한값을 평가한다. 각 해상 상태에 대한 지속시간은 3시간으로 가정한다.
 - (v) 최대 슬로싱 하중을 발생시키는 해상 상태를 찾는다.
 - (vi) 필요하다면 부가적 해상 상태 및 입사각(heading)의 슬로싱 하중에 대한 모형 실험 및 통계 분석을 실시해야 한다.
- (나) 정규파 상태 선정
- 원칙적으로, 임의의 해상 상태에 대한 슬로싱 시뮬레이션은 모형 실험과 동일한 절차를 따라 수행할 수 있다. 그러나, 현재의 전산유체역학 소프트웨어의 개발 수준으로는 슬로싱 시뮬레이션을 수행하는데 모형 실험보다 상당히 긴 시간이 소요된다. 2차원 해석일지라도 적절한 통계처리된 슬로싱 하중을 얻기 위해서는 많은 시간이 소요된다.
- 대안으로, 설계 환경 상태에서 슬로싱 하중을 최대로 만드는 정규파 접근법을 사용한다. 각 파랑주기 및 입사각에 대해서, 파랑진폭을 최대로 만드는 정규파를 도출한다. 이 때 선체 운동 및 가속도 응답이 환경 상태 및 설계 운항 수명의 일생 최대 응답 값을 넘지 않아야 한다는 제약 조건이 존재한다. 파랑주기 및 입사각을 탱크 중심 가속도 및 슬로싱 공진 주기에 대한 조우주기 유사성에 기초하여 선정해야 한다. 선정된 파랑 상태를 임계 슬로싱 파랑 상태로 지칭하며, 선정 절차는 다음과 같다.
- (a) 10^{-8} 확률 수준의 선체 운동 및 가속도 장기 극한 값을 계산한다.
 - (b) 임계 슬로싱 파랑 영역을 정의한다.
 - (i) 조우주기가 슬로싱 공진 주파수의 30% 범위 이내이어야 한다.
 - (ii) 탱크 중심의 가속도가 가속도 일생 최대 응답 값의 최소 30%이상 이어야 한다.
 - (c) 임계 슬로싱 파랑 영역의 정규파 상태를 결정한다.
 - (i) 파랑 방향 및 파랑주기가 임계 슬로싱 영역 안에 있어야 한다.
 - (ii) 선체 운동 및 탱크 가속도가 일생 최대값을 넘지 않으면서 쇄파한도 이내이어야 한다는 조건을 만족하면서 파랑진폭을 최대로 해야 한다.
 - (d) 횡파 및 횡파 부근에서 파랑진폭을 회전 운동을 고려한 계산 값의 72%가 되도록 감소시킨다.

표 2 슬로싱 모형 실험 조건에 대한 40년파랑 및 1년파랑

T_z (sec)	H_s (m)	
	40년파랑	1년파랑
4.5	2.9	2.0
5.5	5.7	4.5
6.5	8.6	7.0
7.5	11.0	9.3
8.5	12.8	10.9
9.5	14.0	12.1
10.5	14.9	12.8
11.5	15.3	13.1
12.5	15.4	13.1
13.5	15.1	12.6
14.5	14.6	11.7
15.5	13.6	10.0
16.5	12.2	6.9

2. 모형 실험

(1) 일반사항

- (가) 모형 실험은 슬로싱 시뮬레이션을 통한 비교평가법을 실시하는 경우를 제외한 모든 경우에 수행해야 한다.
- (나) 1항의 선체 운동 해석을 통하여 선정된 해상 상태 및 파랑 상태에서 모형 실험을 수행해야 한다.

(2) 실험 장비

(가) 탱크 모형

- (a) 축소 탱크 모형은 화물창의 탱크 내부 형상을 정확하게 모사해야 한다. 화물창 표면이 Mark III와 같이 파형을 가졌을 경우, 파형으로 인한 유동 흐름 간섭은 무시할 수 있다. **그림 4**는 모형 탱크, 압력 센서 및 측정 와이어가 설치된 탱크 모형 예제를 표시하였다.
- (b) 탱크 모형 및 지지부는 모형 실험 중의 슬로싱 압력으로 발생하는 진동 및 운동을 최소화하도록 충분한 강도를 갖도록 설계해야 한다. 충격에 취약한 영역은 추가적인 보강재를 설치해야 한다.
- (c) 탱크 벽의 국부 진동 공진 주기를 측정하여 슬로싱 충격 지속 시간과 비교해야 한다. 진동 실험은 압력홀 및 압력변환기를 설치하여 진행해야 한다. 진동 실험 중에, 탱크에 유체를 충분한 높이로 적재해야 한다.

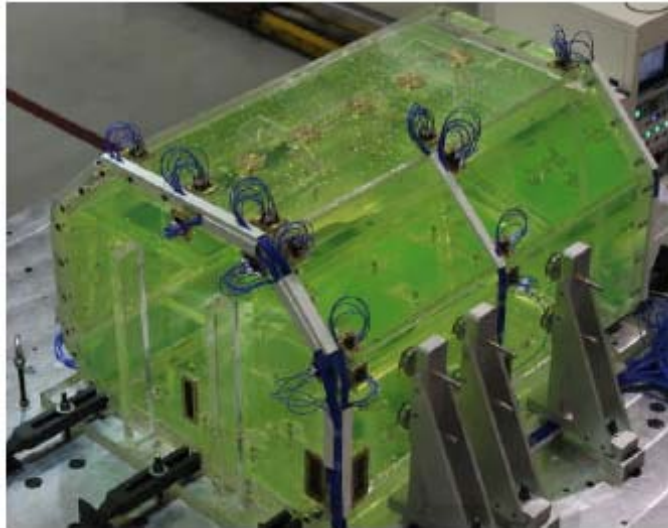


그림 4 모형 실험 및 센서 설치

(나) 얼리지(ullage) 및 밀도 효과

(a) 얼리지 및 밀도 효과 측정 법칙

원칙적으로 얼리지 압력 및 밀도 비율의 상사성이 만족되어야 한다. 이것이 불가능하다면, 실제 압력을 모형 압력 값으로부터 계산할 때, 스케일 법칙에 적절한 교정을 해야 한다.

(b) 모형 탱크 요구사항

대기 압력과 다른 얼리지 압력이 모형 실험 중에 요구될 때, 진공 실험을 탱크 모형에 대해 수행해야 한다. 압력 센서를 진공 실험 중에 실제 모형 실험과 동일한 조건으로 설치해야 한다.

(다) 압력 센서

(a) 유효 측정 면적, 압력 크기 범위, 응답 시간 및 다른 특징들을 포함한 압력 센서 사양을 모형 실험 제공자 및 선급은 검토해야 한다.

(b) 압력 센서는 적절한 충격 실험을 통해 교정해야 한다. 모형 실험 충격과 유사한 크기 및 지속 시간을 가진 충격 압력을 사용하여 교정해야 하며, 5° 기울기보다 큰 입사각을 가진 웨지 낙하 실험을 추천한다.

(c) 압력 센서를 축소 모형의 중요 충격 영역에 설치해야 한다. 일반적으로 높은 화물 적재높이의 충격 영역은 탱크 상부 코너 및 에지 부위이다. 낮은 화물 적재높이에서는 적재 높이 부근 옆벽 및 약간 높은 영역(화물 적재높이의 100%~133%)이 취약한 영역에 해당한다.

(3) 탱크 운동

(가) 불규칙 탱크 운동 생성

선체 운동의 진폭응답함수를 파랑스펙트럼과 결합하여 탱크 운동 응답스펙트럼을 생성해야 한다. 불규칙 운동 신호를 발생시키는데 사용하는 정규 파랑 개수는 운동 순서를 반복하지 않도록 선정해야 한다. 파랑 요소는 5시간 시뮬레이션 진행에 충분해야 하며 해수면 장파정과 가정을 만족해야 한다.

(나) 모형 실험 지속 시간

모형 실험 지속 시간은 통계분석 처리를 위한 충분한 개수의 데이터가 발생하도록 길어야 한다. 각 탱크 운동의 지속시간은 최소 5시간 이상이어야 한다. 최종 선정된 조건에 대해, 최소한 5번의 추가 실험을 진행하여 충분한 수의 충격 하중을 발생시켜 안정적인 통계 해석 결과를 얻도록 해야 한다. 모형 실험 시작 단계에서 램프 시작으로 초기의 과도한 가속도 및 과도 상태를 피해야 한다. 램프 지속 시간을 10 Tz으로 하는 것을 권장한다.

(다) 운동발생기 용량

운동발생기는 6자유도 운동을 발생시킬 수 있어야 한다. 그렇지 않은 경우, 수치적 혹은 실험적으로 운동 요소 누락이 슬로싱 충격 압력에 중요한 영향을 미치지 않는다는 것을 검증해야 한다. 운동발생기(힘 및 토크) 용량을 적절한 수치해석을 수행하여 결정해야 한다.

(4) 탱크 운동 검증

(가) 전 운동 검증

모형 실험 중에, 모형 탱크의 운동 및 운동발생기의 힘 및 토크를 지속적으로 모니터링 해야 한다. 탱크 운동이 정해진 운동을 1%이상 벗어나거나 혹은 운동발생기의 힘 및 토크가 최대 허용 용량을 벗어난다면, 측정 데이터를 폐기해야 한다.

(나) 충격 운동 검증

지지부 중량이 충분치 않은 경우, 탱크 충격 운동이 슬로싱 충격력에 의해 유도 될 수 있고 충격 압력 크기 및 지속 시간이 영향을 받을 수 있다. 탱크 운동 가속도를 모니터링하여 입력 값과 비교해야 한다. 슬로싱 충격 시 모형 탱크 가속도가 상당한 편차를 보이면 결과를 보고 해야 한다.

(5) 운동 데이터 측정

(가) 데이터 측정 시스템 사양

운동 측정 주파수, 채널 개수, 필터링 주파수 및 필터 형태를 보고해야 한다. 데이터 채널 개수는 슬로싱 충격 압력 및 탱크 운동을 동시에 모니터링할 수 있을 정도로 충분해야 한다.

(나) 데이터 필터링

데이터 필터 주파수를 슬로싱 충격 지속 시간 및 구조 고유 주파수보다 높게 설정해야 한다.

(다) 제출 데이터 형태

측정된 데이터 형태를 확실히 표시해야 한다. 데이터 추천 분해능은 10KHz 이상이어야 한다.

(6) 임계 해상상태 선정

(가) 입사각 선정

파랑 진행 방향은 각 화물 적재높이에 대한 탱크 형상, 탱크 운동 응답 및 조우 주파수 범위에 기초하여 선정해야 한다. 높은 적재높이(70%H 이상)에 대해 105°, 120°, 150° 및 180° 입사각을 일반적으로 사용한다. 낮은 적재높이(10%H 이하)에 대해 90°, 105° 및 120° 입사각을 사용한다. 각 입사각에 대해, 대응하는 확률 수준 평가를 위하여, 두개에서 세개의 해상 상태를 탱크 운동 응답 및 탱크 공진 주기의 조우주기 유사성에 기초하여 선정해야 한다. 검증된 전산유체역학 소프트웨어로 슬로싱 시뮬레이션을 수행하여 실험할 해상 상태를 결정할 수도 있다.

(나) 화물 적재높이 선정

선정한 해상 상태의 모형 실험을 실행한 후에, 최대 슬로싱 하중을 압력 크기에 기초하여 선정해야 한다. 각 화물 적재높이에 대하여 임계 슬로싱 하중을 발생시키는 하나의 입사각을 선정해야 한다. 각 화물 적재높이에 대하여 하나의 추가적인 해상 상태를 실험하여 슬로싱 하중이 최대화가 되었는지 평가해야 한다. 추가적인 모형 실험에 기초하여, 가장 중요한 화물 적재높이를 선정해야 한다.

(다) 임계 상태의 반복 실험

임계 슬로싱 하중에 대한 화물 적재높이, 파랑 방향 및 해상 상태에 대해, 두 번의 추가적인 모형 실험을 실행하여 안정적인 통계 결과를 제공하도록 해야 한다.

(7) 공간 평균 패널 압력

- (가) 일정한 면적 이상의 평균 압력을 통계 분석 처리하여 설계 슬로싱 하중으로 사용해야 한다.
- (나) 슬로싱 압력의 공간 평균 계산은 배열 집단 센서를 구성하여 패널 압력을 계산하는 방식이다. 개별 압력 센서의 신호를 결합하여 패널 압력을 계산할 수 있다. 3×3 이상의 배열 집단 센서를 사용하여 평균 압력 추정을 권장한다.
- (다) 충격 하중 이상화

화물격납설비 구조 강도 평가를 위해 슬로싱 하중의 시간 선도를 삼각파로 이상화 한다. 삼각파는 그림 5와 같이 3개의 인자, 최고 압력, 내림 시간 및 오름 시간으로 특징지어지며, 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$P_{rigid}(t) = P_{max}t / T_{rise} \quad t < T_{rise}$$

$$P_{max}(T_{rise} + T_{drop} - t) / T_{drop} \quad T_{rise} \leq t < T_{rise} + T_{drop}$$

비대칭도 인자 S는 삼각파 형태를 정의하기 위해 다음과 같이 정의 된다.

$$S = \frac{T_{drop}}{T_{rise}}$$

- S : 비대칭도
- T_{rise} : 오름 시간(msec)
- T_{drop} : 내림 시간(msec)
- P_{max} : 최고 압력(MPa)

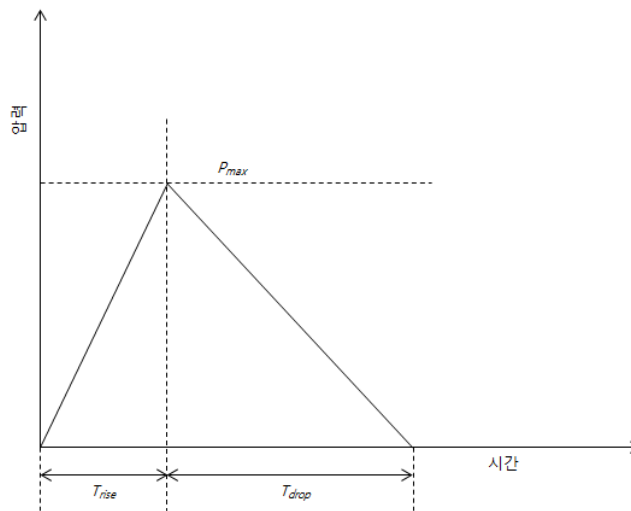


그림 5 삼각파 정의

일반적인 충격신호에 대해, 오름 시간 및 내림 시간은 적절한 알고리즘을 사용하여 계산하여야 한다. 비대칭도 인자는 충격파 형태에 따라서 다양한 값으로 변화한다. 비대칭도 인자가 1보다 크면, 이는 매우 짧은 오름 시간을 가진 충격파를 표시하며 일반적으로 비압축성 유체의 압력 형태로 발생한다. 비대칭도 인자가 1 부근인 형태는 대칭 충격파로서 충돌 시 가스가 유체와 탱크 벽 사이에 갇힌 경우에 종종 관찰된다. 비대칭도 인자가 1보다 작은 압력파는 더 긴 오름 시간을 갖고 있다.

3. 슬로싱 시뮬레이션

(1) 일반사항

- (가) 모형 실험 데이터가 존재하는 기준 선박과 비교하여, 설계하는 액화천연가스 운반선 및 탱크 형상의 중요한 변화가 없는 경우에는 슬로싱 시뮬레이션을 실시할 수도 있다. 슬로싱 시뮬레이션을 수행하지 않으면, 모형 실험을 수행해야 한다.
- (나) 기준 설계 및 새로운 설계에 대한 슬로싱 시뮬레이션을 수행하여 슬로싱 하중의 상대적인 증가 혹은 감소를 분석하여 비교평가법을 실시해야 한다.

(2) 전산유체역학 소프트웨어 요구 사항

- (가) 슬로싱 시뮬레이션에 사용되는 전산유체역학 소프트웨어는 검증된 것이어야 하고, 다음 기준을 만족해야 한다.
 - (a) 유체운동장 수식이 실제 유체영역에서 만족해야 하며, 유체 영역 선형화는 없어야 한다.
 - (b) 3차원 모델의 6자유도 탱크 운동을 고려해야 한다.
 - (c) 2차원 모델의 3자유도 탱크 운동을 고려해야 한다.
 - (d) 탱크 내부 모든 지점의 압력, 속도 및 가속도 값을 제시할 수 있어야 한다.

(나) 전산유체역학 소프트웨어 검증

전산유체역학 소프트웨어는 해석 결과를 기 존재하는 실험 혹은 해석 결과와 비교하여 검증해야 한다.

(3) 모델링

(가) 탱크 모델링

액화천연가스 탱크는 정확하게 모델링 되어야 한다. 2차원 시뮬레이션을 수행하는 경우, 횡방향 및 종방향 단면을 정확하게 모델링해야 한다.

(나) 요소분할

- (a) 요소분할 크기는 충격 압력 공간 분포를 정확히 묘사할 수 있어야 한다. 20cm보다 작은 요소분할이 최대 압력이 발생하는 영역에 사용하도록 권장한다.
 - (b) 국부 충격 압력의 위치, 요소분할 크기 및 시간 증분에 대한 민감성으로 인해, 정해진 면적에 대한 패널 평균 압력을 계산해야 한다. 패널은 슬로싱 하중이 클 것으로 예상되는 탱크 표면 영역을 모두 포함해야 한다.
 - (c) 2차원 해석을 실시하는 경우, 격벽판 및 내저판을 따라 2m 크기의 패널로 분할해야 한다.
- (다) 해석 시간 간격 및 지속 시간
- (a) 시간 증분을 충분히 조밀하게 하여 해석 결과의 안정성 및 정확성을 유지해야 한다.
 - (b) 슬로싱 시뮬레이션 지속 시간을 충분히 하여 슬로싱 운동이 정상상태가 되도록 해야 한다. 정상상태 응답 지속시간은 종방향 및 횡방향에 대해 최소 5에서 10주기 이상이 되도록 해야 한다.

(4) 경계 및 하중 조건

다음 조건을 만족할 수 있는 경계 조건 및 하중 조건을 사용하여 전산유체역학 해석을 수행해야 한다.

(가) 임계 파랑 영역

(a) 횡방향 운동

- (i) 입사각은 90° 이상 120° 이하이어야 한다.
- (ii) 조우주파수는 슬로싱 공진 주파수의 30% 범위 이내이어야 한다.
- (iii) 횡가속도가 횡 가속도 일생 최대값의 30% 이상이어야 한다.

$$\left| T_y - \frac{2\pi}{\omega_c} \right| < 0.3 T_y$$

$$a_w(\omega, \theta) RAO_1(\omega, \theta) > 0.3 A_1, 90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$$

T_y : 횡방향 슬로싱 공진 주기(sec)

ω_c : 조우주파수(rad/sec)

a_w : 파랑 진폭(m)

$RAO_1(\omega, \theta)$: 횡방향 진폭응답함수

A_1 : 횡방향 최대 가속도(m/sec²)

(b) 종방향 운동

- (i) 입사각이 150° 이상 180° 이하이어야 한다.
- (ii) 조우주기는 슬로싱 공진 주파수의 30% 범위 이내이어야 한다.
- (iii) 증가속도가 일생 최대 종방향 가속도의 30%이상이어야 한다.

$$\left| T_x - \frac{2\pi}{\omega_c} \right| < 0.3T_x$$

$$a_w(\omega, \theta) RAO_2(\omega, \theta) > 0.3A_2, 150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$$

- T_x : 종방향 슬로싱 공진 주기(sec)
- $RAO_2(\omega, \theta)$: 종방향 진폭응답함수
- A_2 : 종방향 최대 가속도(m/sec²)

(나) 임계 파랑 상태

- (a) 종방향 사인파 파랑진폭은 다음과 같으며, 파랑진폭은 임계파랑영역에 속하며 쇄파 한도를 넘지 않아야 한다.

$$a_w(\omega, \theta) = \min \frac{A_j}{RAO_j(\omega, \theta)}$$

$$a_w(\omega, \theta) \leq \frac{\pi}{7} \frac{g}{\omega^2}$$

- A_j : 10-8확률의 j번째 운동 인자의 일생 최대 응답(m/sec²)
- $RAO_j(\omega, \theta)$: ω , 주파수 및 θ , 입사각의 j번째 운동 인자의 응답진폭함수
- g : 중력가속도(9.8065m/s²)

- (b) 횡방향 운동에 대해, 파랑진폭은 72%로 감소시켜 횡파 상태의 액화천연가스 운반선의 회전 운동을 고려하도록 한다. 파랑진폭은 임계파랑영역에 속하며 쇄파 한계의 72%를 넘지 않아야 한다.

$$a_w(\omega, \theta) = 0.72 \min \frac{A_j}{RAO_j(\omega, \theta)}$$

$$a_w(\omega, \theta) \leq \frac{0.72\pi}{7} \frac{g}{\omega^2}$$

(5) 수치 해석 결과

- (가) 다음 수치 해석 결과를 전산유체해석으로부터 얻을 수 있어야 한다.

- (a) 충격 압력의 시간 선도 및 최대값
- (b) 격벽판 및 내저판을 따라 2m 패널에 대해 평균화된 충격 압력 값(2차원 해석)
- (c) 격벽판 및 내저판을 따라 1m² 패널에 대해 평균화된 충격 압력 값(3차원 해석)

(나) 각 하중 조건에 대한 평균 패널압력의 시간선도 및 최대값을 선급에 제시해야 한다.

- (다) 새로운 설계 및 기존 설계의 최대 슬로싱 하중을 비교하여 슬로싱 하중의 상대적인 증가/감소를 분석해야 한다.

III. 화물격납설비구조 안정성 평가

1. 화물격납설비 종류

(1) 적층판 형태 화물격납설비

(가) 적층판 형태 화물격납설비는 1970년도에 처음으로 도입되었으며, Gaztransport & Technigaz(GTT)사의 Mark III 및 CS 1 등이 존재한다.

(나) Mark III 멤브레인 탱크 형식

(a) 멤브레인 탱크는 탱크 벽이 얇은 멤브레인으로 구성되어 있어 액밀성 기능만을 가지고 있으며, 독립형 탱크와 달리 화물의 하중 등을 탱크 자체가 감당하지 않는 대신 탱크 외측의 방열재를 통하여 인접한 내부선체가 하중을 지지하고 있는 형식이다.

(b) 1차 방벽 재질은 열에 의한 변형 및 선체 변형을 자체적으로 흡수하도록 팽창 및 수축이 가능한 오스테나이트 스테인리스강 304L로 구성된다.

(c) 2차 방벽(Secondary barrier) 및 2차 방열(Secondary insulation)은 수밀을 위한 알루미늄 호일에 이것을 보강하고 접착성을 좋게 하기 위한 유리섬유가 안팎으로 부착된 트리플렉스(Triplex)라고 불리는 멤브레인으로 되어 있고, 2차 방열은 1차 방열과 마찬가지로 강화된 폴리우레탄폼(polyurethane foam) 및 합판으로 구성된다. **그림 6**은 전형적인 Mark III 화물격납설비를 나타내고 있다.

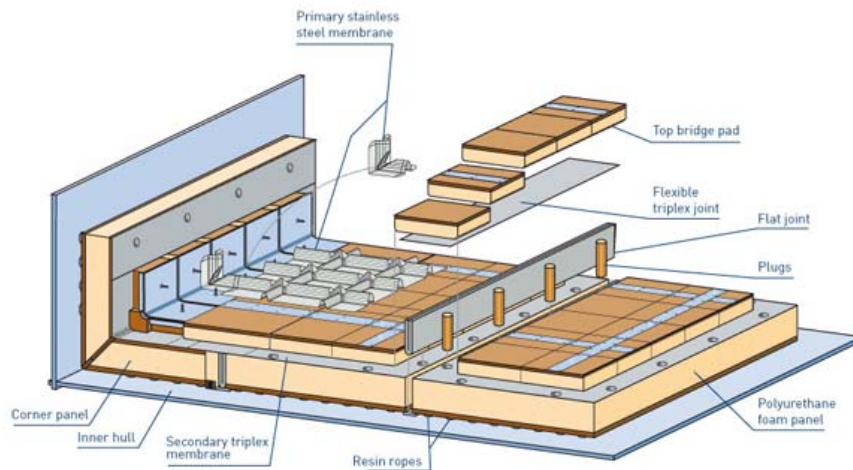


그림 6 Mark III 화물격납설비

(다) CS 1 멤브레인 탱크 형식

(a) 1차 방벽은 인바를 사용한다.

(b) 2차 방벽으로 트리플렉스를 사용한다.

(c) 화물격납설비는 하중을 지지하는 선조립된 패널로 이루어져 있다. 패널은 폴리우레탄폼 및 1차 및 2차 적층 및 2차 방벽으로 구성되어 있다. 패널 두께는 250mm에서 350mm까지도 변화할 수 있으며 BOR 요구 사항을 만족하도록 되어있다. 패널은 마스틱에 의해 선체와 접촉하게 된다. **그림 7**은 일반적인 CS 1 화물격납설비를 표시하고 있다.

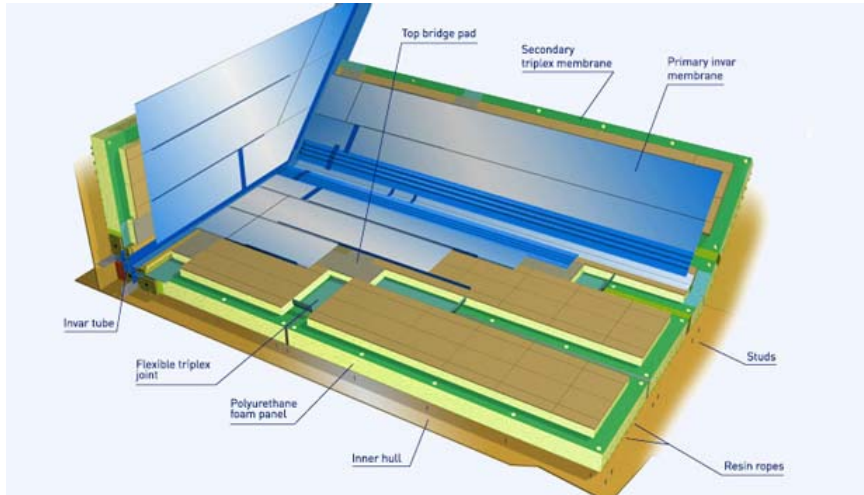


그림 7 CS I 화물격납설비

(2) 상자 형태 화물격납설비

(가) 상자 형태 화물격납설비는 1960년도에 도입되었으며, 대표적인 제품은 Gaztransport & Technigas (GTT)의 NO 96이 존재한다.

(나) NO 96 멤브레인 탱크 형식

- (a) 멤브레인 탱크는 탱크벽이 얇은 막(멤브레인)으로 구성되어 있어 액밀성 기능만을 가지고 있으며, 독립형 탱크와 달리 화물의 하중 등을 탱크 자체가 감당하지 않는 대신 탱크 외측의 방열재를 통하여 인접의 내부선각에 하중을 지지하고 있는 형식이다.
- (b) 멤브레인의 재질은 인바(Invar)이며, 열팽창계수가 극히 적어 열신축에 의한 응력이 발생하지 않는다.
- (c) 멤브레인에는 응력이 거의 발생하지 않으며, 인접의 선체구조에 응력을 발생시키는 외력의 영향도 전혀 받지 않는다. 그림 8은 일반적인 NO 96 화물격납설비를 표시하고 있다.

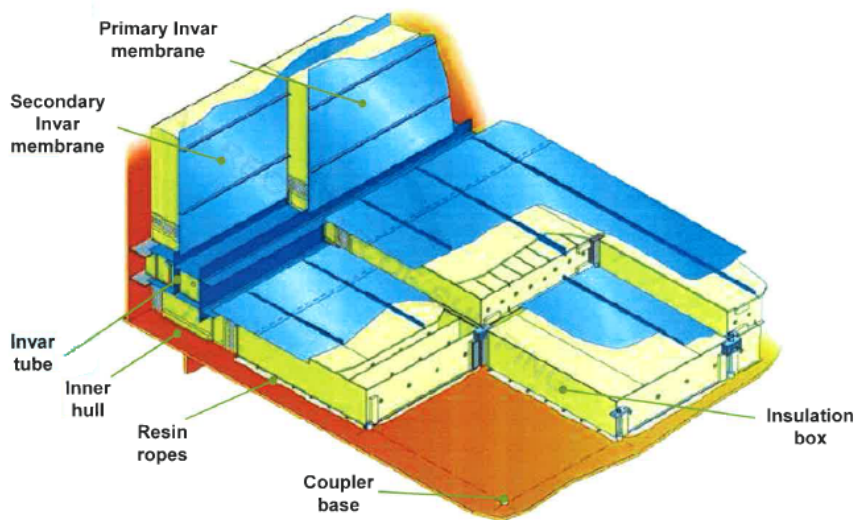


그림 8 NO 96 화물격납설비

(3) 다른 형태 화물격납설비

화물격납설비 설계는 국제 가스 코드(IGC)에 적합해야 하며 우리 선급의 승인을 받아야 한다.

2. 비교평가법

(1) 일반사항

- (가) 비교평가법은 액화천연가스 멤브레인 선박 중 검증된 운항 기록을 가진 선박을 선정하여 기준 선박으로 정하고 목표 선박을 비교 평가하는 법을 지칭한다.
- (나) 비교평가법은 기준 선박과 목표 선박의 화물격납설비 강도가 동일한 경우에 적용한다.
- (다) 강화비교평가법은 비교평가법의 하나로서 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도가 기준 선박 대비 증가한 경우에 적용한다.

(2) 적용 조건

- (가) 비교평가법 및 강화비교평가법을 적용하기 위해서는 다음 사항이 입증되어야 한다.
 - (a) 기준 선박 및 목표 선박에 대한 화물격납설비가 실질적으로 동일해야 한다.
 - (b) 화물격납설비를 지지하는 선체 구조가 상당히 유사해야 한다.
 - (c) 기준 선박 또는 유사한 선박에 대한 화물격납설비의 검증된 운항 기록이 존재해야 한다.
- (나) 위 조건을 만족시키지 못한 경우 신 설계 화물격납설비로 판단하면 된다.

(3) 기준 선박 선정

- (가) 기준 선박이 다음 조건을 만족할 때 검증된 운항기록을 갖는다고 인정한다.
 - (a) 화물격납설비에 중요하거나 또는 반복적인 손상 사건이 발생하지 않아야 한다. 이 선박은 각 적하높이에서 모든 예측되는 환경 조건을 고려하는 것이다.
 - (b) 검증된 운항기록은 각 적하높이에 대해 승인할 수 있다. 예를 들면 고 적하높이에 대해 좋은 성능은 저 적하높이에 대한 좋은 성능과 독립적으로 인정할 수 있다.
- (나) 신 화물격납설비 설계에 대한 검증된 성능 기록을 확립하기 위해서는, 모든 항해로부터의 정보를 기록해야 한다. 최소 요구 정보는 일자, 적하높이, 해상상태, 선박속도 및 파입사각을 포함해야 한다. 이 정보는 운항 중의 예상 슬로싱 하중 평가하는데 사용되며 이 값은 설계 슬로싱 하중과 비교된다. 항해 중 슬로싱 하중이 설계 슬로싱 하중 대비 비슷하고 화물격납설비가 예측한대로 동작한다면, 우리 선박은 화물격납설비 설계가 검증된 운항 기록을 보여준다고 승인할 수 있다.

(4) 비교평가법

- (가) 비교평가법을 진행하기 위해서는, 기준 선박 및 목표 선박에 대한 설계 슬로싱 하중만이 필요하다. 설계 슬로싱 하중은 모형 실험을 통해서 구하거나, 전산유체역학 해석을 통해서 구할 수 있다.
- (나) 기준 선박의 설계 슬로싱 하중 및 목표 선박의 설계 슬로싱 하중은 동일한 방식으로 구해져야 한다. 동일한 모형 실험 장비로 동일한 절차를 따라서 모형 실험을 진행하거나, 전산유체역학 해석을 실시해야 한다.
- (다) **그림 9**에 표시된 것처럼 목표 선박의 설계 슬로싱 하중이 기준 선박 설계 슬로싱 하중보다 작으면, 그 설계는 인증할 수 있다.

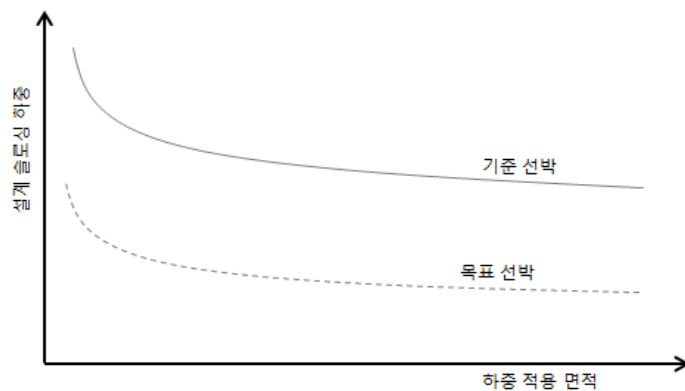


그림 9 비교평가법 개념도

(5) 강화비교평가법

- (가) 강화비교평가법은 화물격납설비의 강도를 평가절차에 포함한다. 이는 목표 선박의 화물격납설비 구조 강도가 기준 선박 대비 증가한 경우에 적합하다. 상자 형태 화물격납설비(NO 96)의 표준 상자를 강화 또는 슈퍼 강화 상자로 개선한 경우에 이 절차가 적용될 수 있다.
- (나) 강화비교평가법을 위해서 기준 선박 및 목표 선박에 대한 설계 슬로싱 하중 및 화물격납설비 강도를 얻어야 한다. 보통 설계 슬로싱 하중은 축소 모델 실험을 통해서 구해진다. 목표 선박 및 기준 선박에 대해서 동일한 실험 장비로 동일한 실험 절차를 따라야 한다.
- (다) 화물격납설비의 강도 변화는 일반적으로 유한요소해석 또는 실험 또는 두 방법을 동시에 사용하여 구한다. 기준 화물격납설비 및 목표 화물격납설비의 임계 파손 모드를 평가되고 문서화해야 한다. 목표 화물격납설비의 구조 변경이 임계 파손 모드를 변화시킬지라도, 그 성능이 추가적인 강도 증가로 인해 악화되지 않았다는 것이 입증되어야 한다.
- (라) 다음과 같이 목표 선박의 화물격납설비 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율이 기준 선박 화물격납설비 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율보다 작으면 목표 선박 화물격납설비는 설계 인증을 받게 된다. **그림 10**은 이를 개념적으로 표시하고 있다.

$$\frac{\text{설계 슬로싱 하중}_{\text{목표선박}}}{\text{화물격납설비 강도}_{\text{목표선박}}} < \frac{\text{설계 슬로싱 하중}_{\text{기준선박}}}{\text{화물격납설비 강도}_{\text{기준선박}}}$$

- (마) 목표 선박 화물격납설비의 주요 설계 인자-크기, 배치 및 비율-가 기준 선박 화물격납설비 설계 범위와 비교하여 크게 변화하였다면 강화비교평가법을 적용할 수 없다. 이 설계는 신설계로 판단하여 절대평가법을 적용해야 한다.
- (바) 기준 선박에 대한 인증된 설계가 존재하지 않으면, 절대평가법을 적용한다.

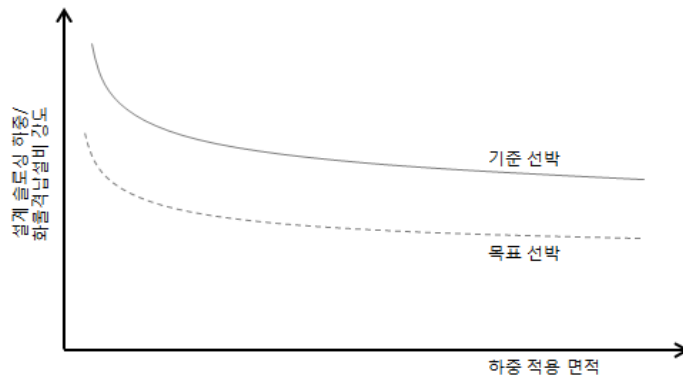


그림 10 강화비교평가법 개념도

3. 절대평가법

(1) 유한요소해석 1단계

(가) 일반사항

- (a) 슬로싱 모형 실험을 통해 얻어진 최대 하중을 준정적 하중으로 적용하여 정적 해석을 실시한다.
- (b) 해석 대상은 일반적으로 제조공정단계에서의 선행조립(pre-fabrication) 단위를 해석 대상으로 한다.
- (c) 필요한 경우 해석 대상에 선체를 포함할 수 있으며, 화물격납설비 온도 및 화물창 운동을 고려할 수 있다.

(나) 요소 형상 및 물성치

- (a) 유한요소해석 1단계 모델링 시 액화천연가스는 포함하지 않는다.
- (b) 적층품 형태 화물격납설비는 폴리우레탄폼(PUF), 합판 및 마스틱으로 구성된 적층 구조이다. 모델 관련 단면을 그림 11에 표시하였다.
- (c) 마스틱은 등방성으로 거동하고, 합판은 직교이방성으로 거동한다고 가정한다. 폴리우레탄폼은 필요에 따라 등방성 혹은 직교이방성을 선정할 수 있다.
- (d) 적층품 형태 화물격납설비(Mark III)의 1차 방벽(STS 304L) 및 2차 방벽(트리플렉스)은 유한요소 모델에 포함하지 않는다. 이들 두 방벽들은 슬로싱으로 인한 구조 응력 지지에 기여하는 정도가 미미하기 때문에 해석에 포함시키지 않는다.

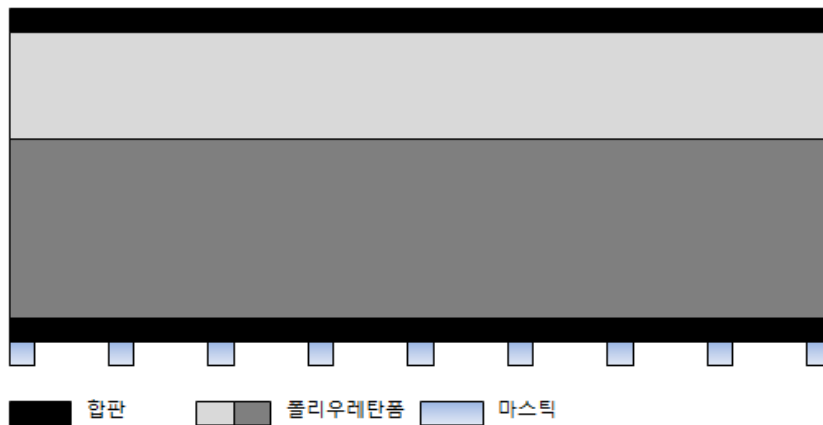


그림 11 적층품 형태 화물격납설비(Mark III) 구성

- (e) 상자 형태 화물격납설비는 3가지 주요 요소, 1차 방열 상자, 2차 방열 상자 및 마스틱으로 이루어져 있다. 모델 형상은 그림 12에 표시하였다.
- (f) 마스틱은 등방성 거동을 하고, 방열 상자를 구성하는 합판은 직교이방성 거동을 한다고 가정한다.
- (g) 상자 형태 화물격납설비의 1차 방벽 및 2차 방벽을 이루는 인바(Invar)는 유한요소모델에 포함하지 않는다. 1차 방벽 및 2차 방벽은 슬로싱으로 인한 구조 응력 지지에 기여하는 정도가 미미하기 때문에 해석에 포함시키지 않는다.
- (h) 유한요소해석 1단계 해석에서 필요한 마스틱, 합판 및 폴리우레탄폼 등의 물성치는 제조자가 제시하는 것을 원칙으로 한다.(4항 참조)

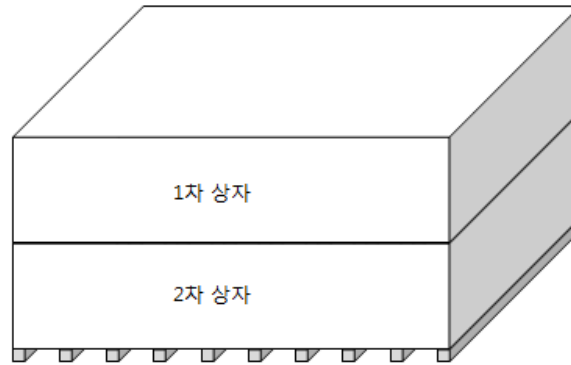


그림 12 상자 형태 화물격납설비(NO 96) 구성

(다) 유한 요소 격자

- (a) 적층품 형태 화물격납설비의 3차원 유한요소 모델은 헥사 고체 요소(Hexa Solid element)의 사용을 기본으로 한다. 유한 요소 격자는 충분히 조밀하여 적층품 형태 및 상자 형태 화물격납설비에 대해 수렴하는 결과를 얻을 수 있어야 한다.
- (b) 마스틱은 두께 방향 및 폭 방향으로 2개 이상의 요소로 분할해야 한다. 상부 합판은 두께 방향으로 최소 1개 이상의 요소로 분할해야 한다. 하부 합판은 두께 방향으로 최소 3개 이상의 요소로 분할해야 한다. 2개의 마스틱 사이에는 최소 7개 이상의 요소로 분할해야 한다. 폴리우레탄폼은 두께 방향으로 10mm 내외의 길이를 가진 요소로 분할해야 한다.
- (c) 상자 형태 화물격납설비에서 모든 합판 요소는 쉘 요소를 사용하여 모델링해야 한다. 강화 합판은 두께를 증가시킴으로써 고려한다. 상자 내의 펠라이트는 화물격납설비 강도에 영향을 미치지 않기 때문에 고려하지 않는다.
- (d) 상자 형태 화물격납설비에서는 마스틱 사이에는 최소 7개 이상의 쉘 요소로 분할해야 한다. 1차 상자 및 2차 상자는 두께 방향으로 10mm 내외의 길이를 가진 요소로 분할해야 한다.
- (e) 적층품 형태 화물격납설비 유한 요소 모델 예제를 그림 13에 표시하였다.

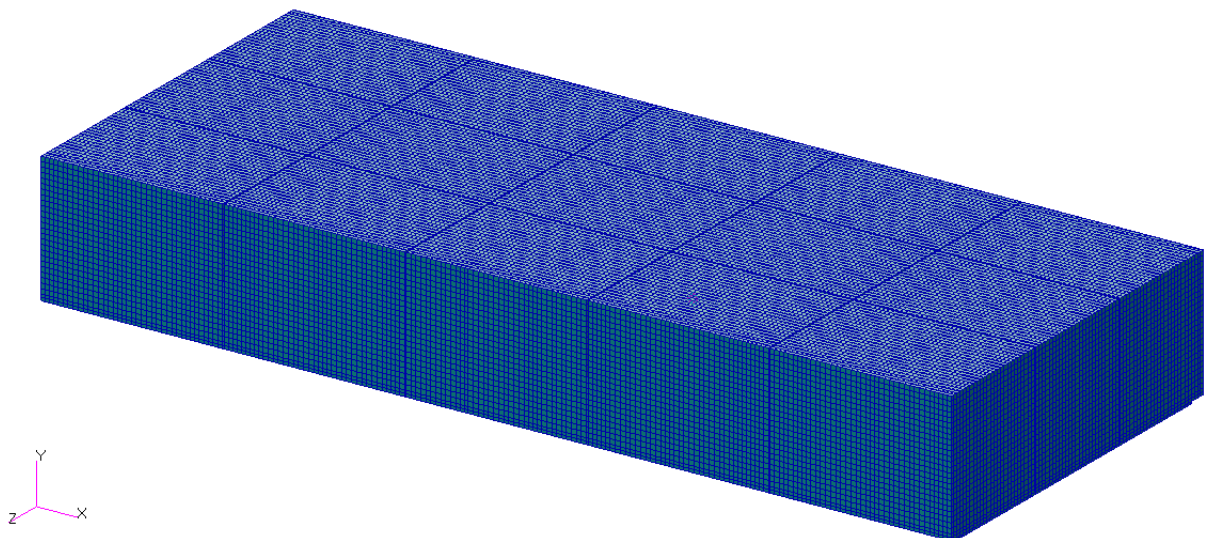


그림 13 화물격납설비 유한 요소 3차원 격자 모델

III. 화물격납설비구조 안정성 평가

(라) 하중 및 경계 조건

- (a) 선체와 접촉하는 마스틱 부분의 높이 방향을 구속한다. **그림 14**는 적층폼 형태 화물격납설비에서 마스틱 높이 방향을 구속한 예제를 표시하고 있다.
- (b) 화물격납설비 가장자리 4꼭지점에 가장 가까운 마스틱 부분은 3방향 구속하여 강체 운동이 발생하지 않도록 한다. **그림 15**는 적층폼 형태 화물격납설비에서 마스틱의 4부분의 3방향 구속한 예제를 표시하고 있다. (a) 및 (b) 경계 조건을 **표 3**에 상세하게 표시하였다.
- (c) 화물격납설비 상부 합판에 정적하중을 적용한다. **그림 16**은 적층폼 형태 화물격납설비에 정적하중을 적용한 예제를 표시하고 있다. 정적 하중은 모델 실험으로부터 얻어지며, **그림 5**에 정의된 P_{max} 을 의미한다.

표 3 경계 조건

위치	변위			회전		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
선체와 접촉하는 마스틱 노드	0	1	0	0	0	0
화물격납설비 가장자리 4꼭지점에 가장 가까운 마스틱 노드	1	1	1	0	0	0
비고 1 : 고정 0 : 자유단						

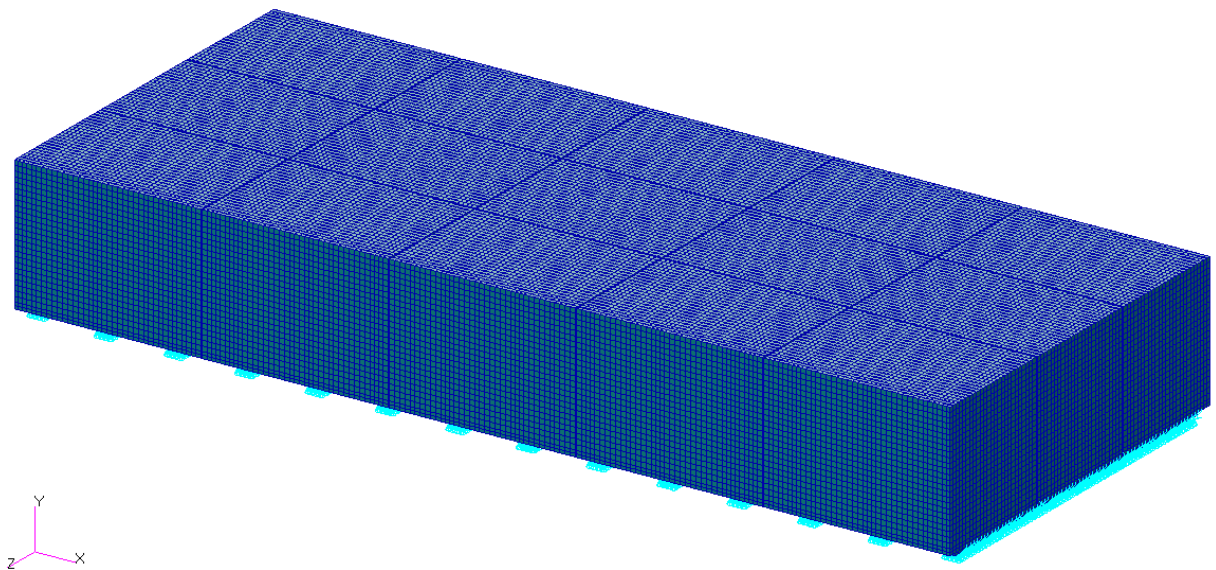


그림 14 화물격납설비 마스틱 높이 방향 구속 경계 조건

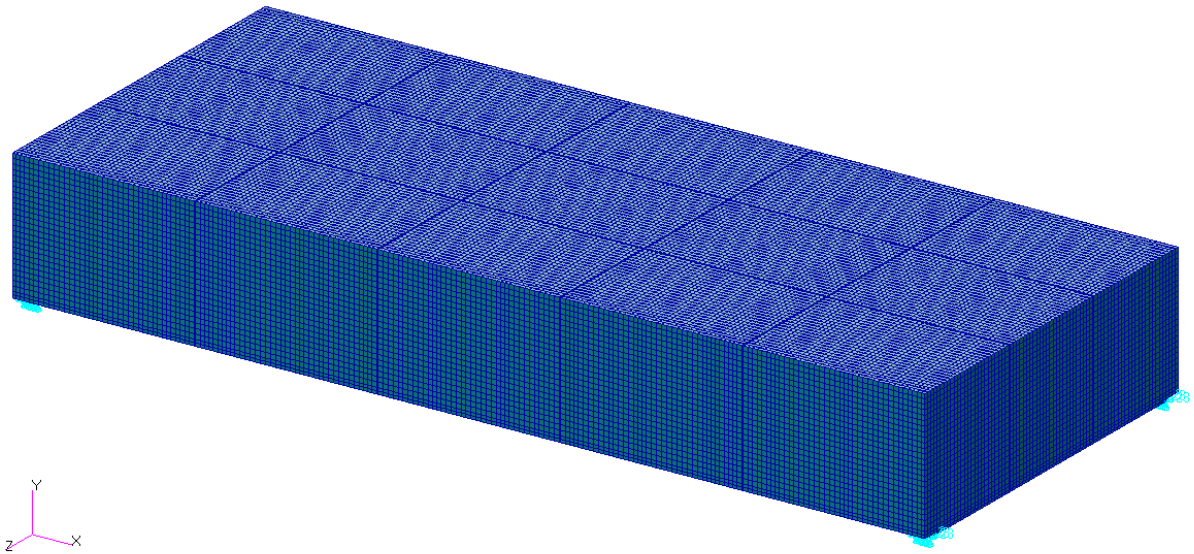


그림 15 화물격납설비 마스틱 코너 부위 구속 경계 조건

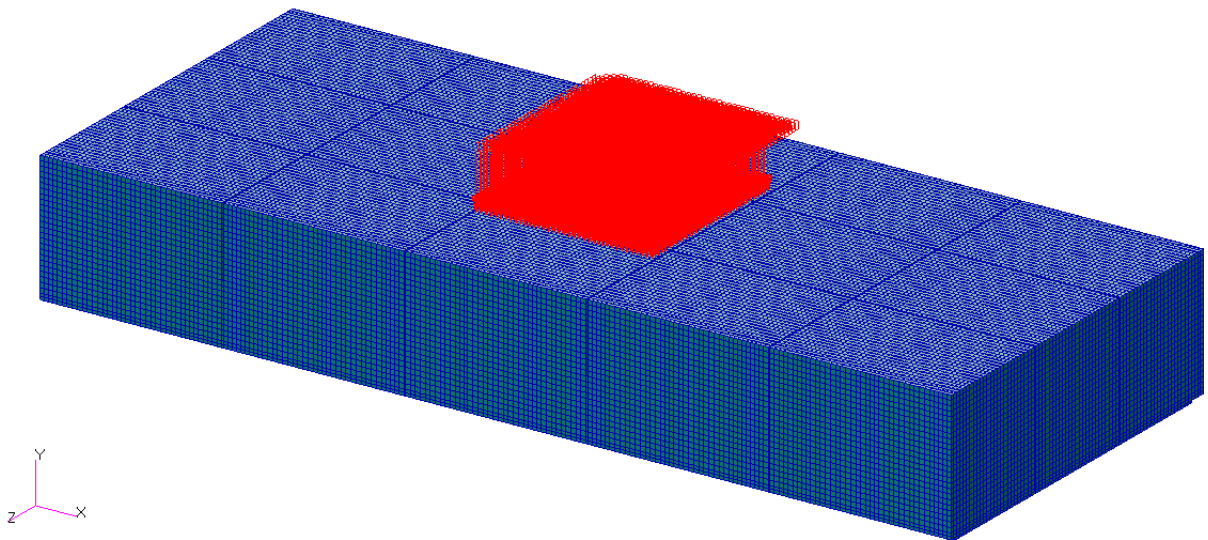


그림 16 화물격납설비 슬로싱 하중 조건

(d) 정적 하중 적용 위치는 모형 실험을 참조해서 결정되어야 한다. 모형 실험에서 일반적으로 표면적 1m^2 에 대하여 압력 센서 3×3 또는 4×4 패널로 배열된다. 이 조건에서 그림 17과 같은 압력 센서 조합이 얻어진다. 이 조합을 고려하여 정적 해석을 진행해야 한다.

- (i) 1×1 센서 배열 : 9set
- (ii) 3×1 또는 1×3 센서 배열 : 6set
- (iii) 2×2 센서 배열 : 4set
- (iv) 3×2 또는 2×3 센서 배열 : 4set
- (v) 3×3 센서 배열 : 1set

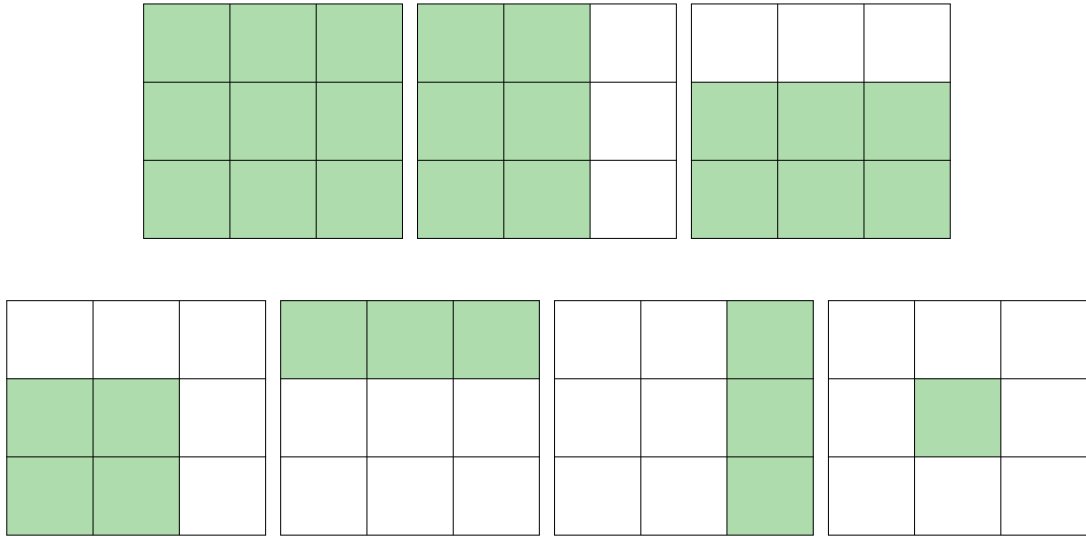


그림 17 슬로싱 하중 적용 위치 조합의 예

(마) 상자 형태 화물격납설비(NO 96)의 좌굴 강도

상자 형태 화물격납설비 특성 때문에, 좌굴이 발생하게 된다. 상자 형태 화물격납설비의 정적 강도를 평가하기 위해서 선형 좌굴 강도 해석을 유한 요소 모델로 실시하게 된다. 그림 18은 좌굴 해석 예제를 표시하고 있다.

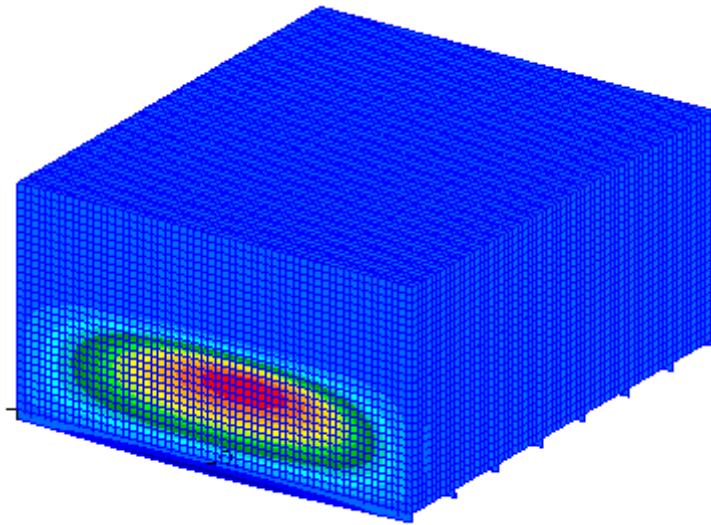


그림 18 상자 형태 화물격납설비(NO 96) 선형 정적 좌굴 해석 예제

(바) 해석 절차

유한요소해석 1단계에서는 액화천연가스 비포함 모델에 대해 우리 선급이 인정하는 프로그램을 이용한 정적 해석을 실시한다. 유한 요소해석결과로서 응력, 변형률 및 변위 등의 결과를 얻을 수 있다. 구조 해석 절차는 다음과 같다.

- (a) 적층품 형태 화물격납설비는 (나) 및 (다)에 따라 폴리우레탄폼, 합판 및 마스틱을 모델링한다. (라)에 따라 마스틱에 경계 조건을 적용하고, 상부 합판에 슬로싱 하중을 준정적 압력으로 적용한다.
- (b) 상자 형태 화물격납설비는 (나) 및 (다)에 따라 1차 방열 상자, 2차 방열 상자 및 마스틱을 모델링한다. (라)에 따라 마스틱에 경계 조건을 적용하고, 1차 방열 상자 상면에 슬로싱 하중을 준정적 압력으로 적용한다. 정적 구조 유한 요소 해석을 실시한다. 선형 좌굴 해석을 실시한다.
- (c) 해석 결과에 기초하여, 각 요소에 대한 구조 평가를 진행한다.

- (d) 해석 결과는 4항에 따른 허용 기준 이하이어야 한다.
 - (e) 결과가 허용 기준을 초과하는 경우 유한요소해석 2단계를 진행한다.
 - (2) 유한요소해석 2단계
 - (가) 일반사항
 - (a) 유한요소형상, 요소분할 및 크기, 재료 물성치 및 경계 조건은 (1)호 (가)~(라)에 따른다.
 - (b) 해석 대상은 일반적으로 제조공정단계에서의 선행조립(pre-fabrication) 단위를 해석 대상으로 한다.
 - (c) 필요한 경우 해석 대상에 선체를 포함할 수 있으며, 화물격납설비 온도 및 화물창 운동을 고려할 수 있다.
 - (d) 슬로싱 모델 실험에서 얻어진 삼각 충격 압력을 적용하여 동적 해석을 실시한다.
 - (e) 유한요소해석 2단계는 동적 해석이므로 해석 시간 증분이 충분히 작아야, 응력, 변형률 및 변위 등의 해석 결과를 적절하게 얻을 수 있다.
- 시간 증분은 사용하는 해석코드에 따라 적절하게 선정해야 한다. 임프리시트 코드(Implicit code)에서는 해석 모델 고유 주기의 1/20이하가 되도록 해야 한다. 익스프리시트 코드(Explicit code)에서는 유한 요소 격자 크기에 비례하여 정해야 한다. 예를 들면 강재 및 알루미늄에서 음파 속도는 5mm/1μs이다. 그러므로 강재 구조가 5mm 유한 요소 크기로 모델링 되면, 시간 증분이 1μs이다. 더 작은 음파 속도를 가진 재료로 구성된 요소는 더 큰 시간 증분을 가질 수 있다. 표 4는 재료에 따른 음파 속도를 나타낸다.

표 4 재료에 따른 음파 속도

매질	음파 속도(m/s)
공기	331
물	1478
강재	5240

상수 탄성계수를 가진 재료의 음파 속도는 다음과 같이 계산되므로, 이를 참조하여 각 재료에 대한 유한 요소 크기를 적절하게 모델링해야 한다.

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}$$

- E : 재료 탄성계수
- ν : 재료 포아송률
- ρ : 재료 밀도

- (f) 해석 시간은 슬로싱 하중 지속 시간의 3배 이상이 되도록 해야 한다. 원하는 해석 결과를 얻을 수 없다면 해석 지속 시간을 조정해야 한다.
- (나) 요소 형상 및 물성치
 - (1)호 (나)에 따른다.
- (다) 유한 요소 격자
 - (1)호 (다)에 따른다.
- (라) 하중 및 경계 조건
 - (a) 경계조건은 (1)호 (라) (a) 및 (b)에 따른다.
 - (b) 슬로싱 충격 압력으로 동적 삼각파를 화물격납설비 상부 함판에 적용한다. 이 압력은 모델 실험을 통해 결정된다. 슬로싱 동적 삼각파는 압력 최대값, 오름 시간, 내림 시간 및 기울기 인자로 정의되며, 그림 5는 슬로싱 동적 삼각파 예를 보여주고 있다.
 - (c) 슬로싱 충격 압력은 그림 5에 정의된 다양한 인자(최대 슬로싱 압력, 오름 시간, 내림 시간 및 기울기)가 변함에 따라 화물격납설비에 다양한 영향을 미친다. 이를 검토하기 위해 각 인자에 대한

III. 화물격납설비구조 안정성 평가

매개변수적 연구(Parametric Study)를 진행해야 한다. 각 허용기준에 대한 인자의 영향을 파악할 수 있으며, 고려해야 할 인자 범위를 선정할 수 있다.

이 호의 절차를 적용함에 있어 설계자는 각 인자의 적용 방법 등에 대하여 우리 선급과 사전에 충분히 협의하여 결정해야 한다.

- (d) 슬로싱 충격 압력 적용 면적은 모형 실험과 일관성이 있어야 한다. 모형 실험에서, 표면적 $1m^2$ 은 압력 센서 3×3 또는 4×4 패널로 보통 커버된다. 압력 센서의 다양한 조합은 (1)호 (라) (d)에 기술되어 있으며, 이 다양한 조합에 대한 동적 유한요소해석을 실시하여 화물격납설비 구조 강도평가를 진행한다.

(마) 상자 형태 화물격납설비(NO 96) 좌굴

(1)호 (마)에 따른다.

(사) 해석 절차

유한요소해석 2단계는 다음 세부 단계를 따라 실행한다.

- (a) 앞 호에서 기술한 대로, 적층폼 형태 화물격납설비(Mark III)는 폴리우레탄폼, 합판 및 마스틱, 상자형태 화물격납설비(NO 96)는 1차 방열 상자, 2차 방열 상자 및 마스틱을 포함하도록 한다. 마스틱 하부에 앞 호에서 기술한 경계 조건을 부가하고, 화물격납설비 상부 합판에 슬로싱 동적 삼각파를 하중으로 적용한다. 동적 구조 유한 요소 해석을 실시한다.
- (b) 상자 형태 화물격납설비는 선형 좌굴 해석을 실시한다.
- (c) 화물격납설비의 각 요소의 응력 및 변위 분포를 구하여 응력/변위 시간 선도를 얻는다.
- (d) 슬로싱 충격압력 인자가 응력/변위에 미치는 영향에 대한 매개변수적 연구를 진행해야 한다.
- (e) 슬로싱 충격 하중 부가 면적을 (1)호 (라) (d)의 다양한 조합에 대한 유한 요소 해석을 실시하여 화물격납설비 구조 강도 평가를 진행해야 한다.
- (f) 해석 결과는 4항에 따른 허용 기준 이하이어야 한다. **그림 19**는 화물격납설비 강도 및 화물격납설비 슬로싱 하중을 비교한 예를 개념적으로 표시하고 있다.

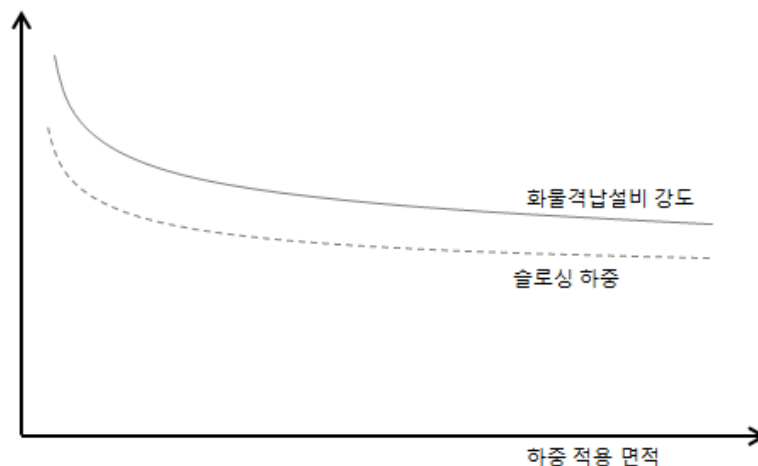


그림 19 화물격납설비 설계 강도 및 슬로싱 하중 비교

4. 허용기준

(1) 일반사항

- (가) 허용 기준을 도출하는 것은 설계자 책임이며, 본 절의 목적은 허용 기준 도출하는 것에 대한 지침을 제공하는 것이다.
- (나) 슬로싱 하중 하에서 발생하는 적층폼 형태 화물격납설비의 전형적인 파손 형태는 다음과 같다. 각 파손의 일반적인 발생 위치는 **그림 20**에 표시하였다.
 - (a) 폴리우레탄폼 파쇄
 - (b) 합판 변형
 - (c) 하면 합판 박리
 - (d) 마스틱과 하면 합판 연결부에서 합판 파단
 - (e) 마스틱과 하면 합판 연결부에서 폴리우레탄폼 파단

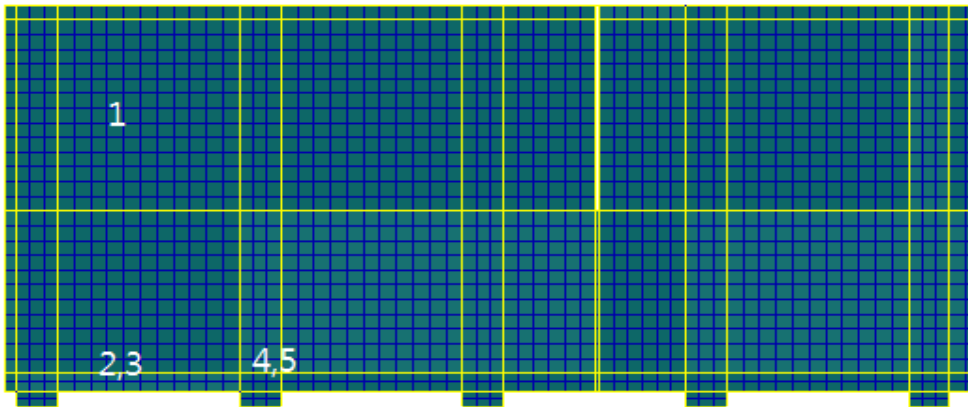


그림 20 적층폼 형태 화물격납설비의 일반적인 파손 위치

- (다) 상자 형태 화물격납설비의 전형적인 파손 형태는 다음과 같다.
 - (a) 1차 방열 상자 또는 2차 방열 상자 좌굴
 - (b) 상부합판의 굽힘/전단 파손
 - (라) 화물격납설비의 파손 형태는 항복/파단, 좌굴 및 사용한계 관점에서 평가될 수 있다. 파손 형태는 응력/변형률 관계, 항복강도 및 인장강도와 같은 재료 물성치와 관련있다.
 - (마) 항복/파단, 파손 평가 관련해서 합판에서 발생하는 최대 인장/압축 응력 및 전단 응력을, 폴리우레탄폼 및 마스틱에서 발생하는 최대 등가응력(Von-mises)을 인장 강도와 비교하여 구조 강도를 평가한다.
 - (사) 좌굴 파손 평가 관련해서 슬로싱 하중이 임계 좌굴 하중을 넘어서면, 화물격납설비는 파손된다고 간주한다.
 - (아) 사용한계 평가 관련해서 폴리우레탄폼, 합판 및 마스틱은 허용 최대 변위가 존재한다. 이 범위를 초과하게 되면 시스템이 불안정하게 되고, 최종적으로 파손이 발생하게 된다.
 - (자) 2항 평가법은 (2)호 및 (3)호 허용 기준을 따르고, 3항 평가법은 (4)호 허용 기준을 따른다.
- (2) 비교평가법
- 목표 선박의 설계 슬로싱 하중이 기준 선박의 설계 슬로싱 하중보다 작은 경우, 목표 선박의 화물격납설비 설계는 인정할 수 있다.

$$P_{target} < P_{reference}$$

P_{target} : 목표 선박에 대한 설계 슬로싱 하중

$P_{reference}$: 기준 선박에 대한 설계 슬로싱 하중

이 기준은 **그림 2.1**과 같은 면적/슬로싱 하중 선도에 대해서 만족해야 한다.

(3) 강화비교평가법

목표 선박의 화물격납설비 구조 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율이 기준 선박의 화물격납설비 구조 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율보다 작은 경우 목표 선박 화물격납설비 설계는 인정할 수 있다.

$$\frac{P_{target}}{C_{target}} < \frac{P_{reference}}{C_{reference}}$$

- P_{target} : 목표 선박에 대한 설계 슬로싱 하중
- $P_{reference}$: 기준 선박에 대한 설계 슬로싱 하중
- C_{target} : 목표 선박 화물격납설비 구조 강도
- $C_{reference}$: 기준 선박 화물격납설비 구조 강도

이 기준은 그림 2.2와 같은 면적/슬로싱 하중 선도에 대해서 만족해야 한다.

(4) 절대평가법

(가) 화물격납설비 구조 강도 대비 설계 슬로싱 하중 비율이 적절하게 선정된 운용 요인보다 작으면 화물격납설비를 인증할 수 있다.

$$\frac{P}{C} < UF$$

P : 설계 슬로싱 하중으로 하중 작용 면적, 오름 시간 및 충격 지속 시간 등의 효과를 고려해야 한다.

C : 화물격납설비의 구조 강도를 의미하며 구조 해석을 통해서 평가된다.

UF : 사용 계수로서 일반적으로 0.6보다 작은 값을 사용해야 한다. 0.6 값은 $1/(1.1 \times 1.5)$ 을 근사치를 구한 것이다. 1.5는 동적하중에 대해서 일반적으로 사용하는 유로코드 인자 값이며 1.1은 강도에 대해서 일반적으로 사용되는 유로코드 인자이다. 이 운용 인자의 적용은 화물격납설비가 검증된 설계인지 아닌지에 따라 값이 변한다. 새로운 화물격납설비에 대해서는 운용 인자는 일반적으로 0.5보다 작은 값을 사용해야 한다.

(나) 화물격납설비 구조 강도를 평가하기 위해서는 다음의 기준에 언급된 항목들을 기반으로 진행해야 한다. 기준 선정은 설계자의 책임 하에 진행되어야 한다.

(a) 최대 수직 응력 기준 : 3방향(X, Y, Z 좌표)으로 최대 수직 인장/압축 응력이 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sigma_{max} \leq \sigma_c$$

σ_c : 허용 수직 응력으로 $S_m \sigma_y$ 또는 $S_m \sigma_u$ 로 한다.

σ_y : 재료 항복 강도로 각 재료에 대하여 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

σ_u : 재료 인장 강도로 각 재료에 대해서 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

S_m : 강도 감소 인자로서 표 5에 따른다.

(b) 최대 전단 응력 기준 : 최대 전단 응력은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\tau_{max} \leq \tau_c$$

τ_c : 허용 전단 응력으로 $S_m \tau_u$ 로 한다.

τ_u : 재료 전단 강도로 각 재료에 대하여 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

S_m : 강도 감소 인자로서 표 5에 따른다.

(c) 등가응력 기준 : 최대 등가응력은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sigma_{max}^{eq} \leq \sigma_c$$

σ_c : 허용 수직 응력으로 $S_m\sigma_y$ 또는 $S_m\sigma_u$ 로 한다.

σ_y : 재료 항복 강도로 각 재료에 대하여 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

σ_u : 재료 인장 강도로 각 재료에 대하여 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

S_m : 강도 감소 인자로서 표 5에 따른다.

(d) 좌굴 기준 : 상자 형태 화물격납설비에 대한 좌굴 해석을 실시하여 허용 좌굴 압력을 구한다. 상자 상부 표면에 적용되는 최대 압력은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$P_{max} \leq P_c$$

P_c : 허용 좌굴 압력으로 S_mP_{cr} 로 한다.

P_{cr} : 임계 좌굴 압력으로 각 재료에 대하여 인정된 시험자료 또는 우리 선급이 인정하는 기준에 따른다.

S_m : 강도 감소 인자로서 표 5에 따른다.

표 5 강도 감소 인자(SRF) 적용 값

SRF	최종강도	전단강도	항복강도	좌굴 압력
Sm	0.8 ~ 1.0	0.8 ~ 1.0	0.9 ~ 1.0	0.9 ~ 1.0

(e) 사용성 한계 기준 : 화물격납설비 각 요소에 따라 설계자가 추천하는 최대 변위가 있는 경우 다음 조건을 만족해야 한다.

$$u_{max} \leq u_c$$

u_{max} : 해석 결과에 따른 최대 변위로 한다.

u_c : 허용 사용 한계 변위로서 설계자가 추천하는 값으로 한다.

5. 재료 물성치

(1) 일반사항

- (가) 구조 해석에 사용되는 재료 물성치를 얻는 것은 설계자 책임이다. 본 절의 목적은 재료 물성치 도출하는 것에 대한 지침을 제공하는 것이다.
- (나) 액화 천연가스로 인한 극저온(대략 -163°C) 환경 및 슬로싱 하중으로 인한 동적 효과를 포함한 재료 기계적 특성을 평가하는 것은 설계자의 책임이다.
- (다) 재료 물성치는 재료 공급자, 공포된 데이터 또는 재료 실험을 통해서 얻어지며, 재료에 따라 (2)호 및 (5)호에서 규정한 값을 구해야 한다.

(2) 1차 및 2차 방벽

- (가) 1차 및 2차 방벽(Mark III에서 멤브레인 및 트리플렉스, NO 96의 인바, CS 1의 인바, 트리플렉스)은 선형 등방성 탄성 재질로 모델링 되어야 하며, 다음의 물성치를 입력해야 한다.
 - (a) 밀도
 - (b) 탄성계수
 - (c) 포아송률
- (나) 필요한 경우 온도 변화에 따른 물성치 변화를 포함해야 한다.

(3) 폴리우레탄폼

- (가) 적층폼 형태 화물격납설비는 선형 등방성 탄성 재질로 모델링 되어야 하며, 다음의 물성치를 입력해야 한다. 필요한 경우 직교 이방성을 갖도록 모델링할 수 있다.
 - (a) 밀도
 - (b) 탄성계수
 - (c) 포아송률
 - (d) 전단 계수
- (나) 상온 온도와 극저온 온도에 따른 물성치 변화를 포함해야 한다.

(4) 합판

- (가) 합판은 여러 층 나무로 이루어진 합성물이다. 합판의 거동은 직교 이방성을 갖도록 모델링되어야 하며, 다음의 물성치를 입력해야 한다.
 - (a) 밀도
 - (b) 3방향 탄성 계수
 - (c) 포아송률
 - (d) 전단 계수
- (나) 상온 온도와 극저온 온도에 따른 물성치 변화를 포함해야 한다.

(5) 마스틱

- (가) 화물격납설비를 선체 구조로 연결하는 마스틱은 선형 등방성 탄성 재료를 사용하여 모델링되어야 하며, 다음의 물성치를 입력해야 한다.
 - (a) 밀도
 - (b) 탄성계수
 - (c) 포아송률
 - (d) 전단계수
- (나) 상온 온도의 인자 값이 해석에 사용된다.

인 쇄 2015년 3월 24일

발 행 2015년 4월 1일

슬로싱 하중 평가 지침 화물격납설비 강도 평가 지침

발행인 박 범 식

발행처 한 국 선 급

부산광역시 강서구 명지오션시티 9로 36

전화 : 070-8799-7114

FAX : 070-8799-8999

Website : <http://www.krs.co.kr>

신고번호 : 제 2014-000001호 (93. 12. 01)

Copyright© 2015, KR

이 지침의 일부 또는 전부를 무단전재 및 재배포시 법적
제재를 받을 수 있습니다.