

유한요소법에 의한 선박의 직접강도 계산방법



이 홍 구*



마 진 섭**

1. 서 언

선박을 건조하기 위한 과정에는 도면의 설계 및 심사과정이 필요하며, 설계도면의 작성은 일반적으로 배를 건조하는 조선소에서 이루어진다. 조선소는 설계도면의 작성을 위해 선박이 등록하게 되는 해당선급의 기술규칙에 따라 선체구조부재의 주요촌법을 계산하여 도면을 작성하게 되며, 작성된 도면은 심사를 위해 해당선급에 제출되고, 승인을 받은 후에 승인된 도면에 따라서 배의 건조가 이루어지게 된다. 이와 같이 선급의 기술규칙은 선박의 설계에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 선급은 기술규칙을 개발, 유지 및 활용하는데 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 최근 컴퓨터의 보급 및 사용이 증가함에 따라 컴퓨터를 이용한 선급 기술규칙의 활용에 많은 관심을 갖고 연구와 투자를 하고 있다.

먼저 국제적으로 명성이 높은 선급들의 software

개발 현황을 소개하면, 영국선급(LR)은 "Ship-Right", 노르웨이선급(DNV)은 "NATICUS", 미국선급(ABS)은 "SafeHull" 및 일본선급(NK)은 "PrimeShip" 등과 같은 통일된 concept(family name) 하에서 선체, 기관, 선박의 성능, 선박의 operation 등 각 선급이 관여하는 모든 기술분야에 관해서, 지금까지 축적된 경험과 최첨단 기술을 구사하여 선박의 설계·건조단계에 국한하지 않고, 취항후의 운용단계를 포함시킨 전체적인 선박의 안전성 향상 및 해양환경의 보전을 목적으로, 기술의 종합적인 확충을 포함하는 software를 개발하여 시행하고 있다. 각 선급의 family name을 구성하고 있는 software 가운데 선체구조 분야와 관련한 software의 내용을 살펴보면 다음과 같은 공통적인 사항들을 포함하고 있다.

- 선급규정의 제규칙에 대한 database(rulefinder)
- 급규정계산 program

* 한국선급 기술연구소, 심사원

** 한국선급 기술연구소, 규칙개발팀장

· 유한요소법을 이용한 직접강도해석 program

현재 한국선급(KR)에서도 국제적인 추세에 부응하여 많은 투자와 연구를 진행 중에 있으며, 선급규칙의 검색용 program인 KR-RULES 및 선급규정계산 program인 KR-TRAS을 개발하여 이미 사용 중에 있으며, 또한 KR-TRAS와 접목하여 사용할 수 있는 유한요소법을 이용한 직접강도 해석 program인 KR-STARs의 개발을 위한 연구를 진행하고 있다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 직접강도계산방법의 기초가 되는 직접강도계산 지침을 소개하고자 하며, 이 지침은 한국선급의 기술규칙 중 "선급 및 강선규칙 제3편 적용지침 부록 3-2 직접강도계산에 관한 지침"으로 규정하여 사용하고 있으며, 이 직접강도계산 지침에는 선박의 종류와 관계없이 공통적으로 적용하는 일반적인 직접강도계산방법과 선박의 종류에 따라 별도로 적용해야 하는 선종별 직접계산방법으로 나누어져 있으며, 구체적인 내용은 다음과 같다.

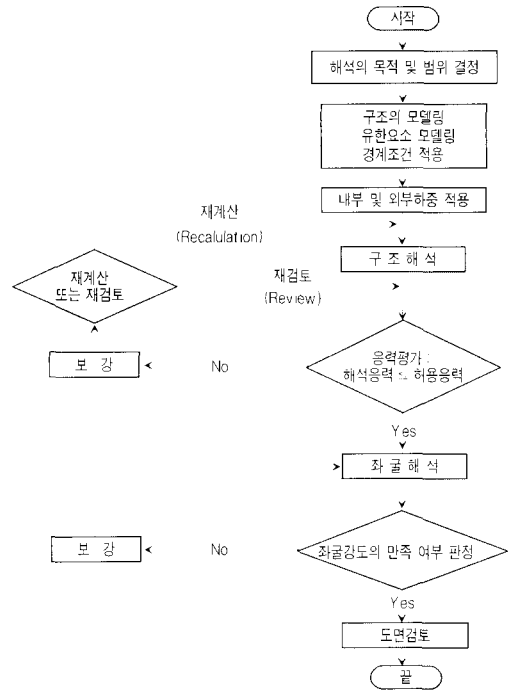


그림 1 직접계산 과정

2. 직접강도계산에 대한 지침

2.1 일반

유한요소 프로그램을 이용하여 선체구조의 각 부재치수를 정하는 경우에는 그 해석프로그램은 굽힘변형, 전단변형, 축변형 및 뒤틀림 변형의 영향을 고려할 수 있는 것이어야 하며, 평면 또는 입체구조모델의 거동을 합리적인 경계조건하에서 유효하게 표현할 수 있어야 한다. 또한, 본 계산방법을 적용할 경우 선급의 기술규칙에 규정된 종강도 규정 및 최소 판두께의 규정을 반드시 만족하여야 하며, 직접강도계산에 따른 계산과정은 그림 1과 같다.

2.2 구조모델

2.2.1 구조의 모델링

해석 대상인 구조의 모델은 직접강도계산에 의하여 치수를 정하려는 부재의 거동에 영향을 미친다고 판단되는 주위의 부재도 포함하는 것으로 한다.

구조모델은 판구조, 골조구조 또는 이들의 결합 구조 등 어느 것으로 하여도 좋으나 판요소, 막요소, 보요소 및 트러스요소 등 적절한 요소를 택하여 구조의 거동을 충실하게 표현할 수 있는 구조로 모델링을 하여야 한다. 그리고 주의할 점은 부식에 대한 예비두께를 포함한 부재치수를 사용하여 모델링하여야 한다. 각 구조부재의 모델에 대한 요소분할이 직접강도 계산에 의하여 치수를 정하기에 불충분할 때에는 그 부재에 대한 상세분할 해석을 하고 그 해석결과에 따라 검토를 하여야 한다.

2.2.2 판 및 보 구조의 모델

1) 판 요소로 모델링하는 경우

선측외판 및 중격벽판 등 큰 전단력을 받는 부재는 판 (plate) 요소로 모델링하는 것이 바람직하며, 요소분할을 할 때에는 모델내의 응력분포상태를 가상하여 적정 크기로 분할하여 과도한 중형비가 되는 분할을 피하는 등 합리적으로 하여

야 한다. 특히 거더와 같이 깊이 방향에 응력변화가 있는 것에 대하여는 이것이 판별되도록 요소 분할을 하여야 한다.

2) 보 (beam) 요소로 모델링하는 경우

골조구조로 모델링할 경우 원칙적으로 부재 양측에 각각 부재 길이의 0.1배의 폭을 포함하는 판을 모델링한다. 단, 포함되는 판은 타부재에 의해 유효하게 보강되어 있거나 충분한 판두께를 갖고 있어야 한다. 다만, 부재 길이의 0.1배의 폭은 인접한 부재까지 거리의 1/2을 넘어서는 안된다. 부재 결합부 및 모서리부에 브래킷 등 강성이 큰 구조가 있는 부분에는 강제부재 (rigid member)로 모델링 하여야 하고, 특히 중성축의 위치에 주의하여야 한다. 보요소와 판 요소의 결합 구조인 경우에는 적절한 보요소를 사용한다.

2.2.3 경계조건

실제구조와 같은 거동을 표현할 수 있는 적합한 경계조건을 구조모델에 적용하여야 한다. 예로서 화물창 해석시에 아래의 그림 2 및 표 1과 같은 경계조건을 사용할 수 있다.

- 모델의 양단면 (①) : 대칭조건
- 선체 중심선면 (②) : 대칭조건
- 상·하 방향에 대한 불평형력을 횡격벽과 선측외판의 교점에 상쇄력으로 분포시킨다(③)

2.3 하중

2.3.1 일반

구조모델의 경계부 전단 및 후단에 작용하는 선체 중급힘에 의한 하중은 원칙적으로 고려할

표 1 자유도에 대한 구속조건

좌표 위치	변위			회전변위		
	Ux	Uy	Uz	θ_x	θ_y	θ_z
① 모델의 양단면	1	0	0	0	1	1
② 선체 중심선면	0	1	0	1	0	1
③ 횡격벽과 선측외판과의 교점	0	0	1	0	0	0
비고	1 : 구속 0 : 자유					

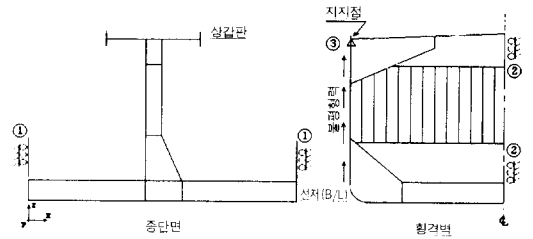


그림 2 경계조건

필요가 없다. 적재화물 및 밸러스트 등에 의한 하중, 정수압 및 파랑하중 등을 고려하고 필요한 경우에는 화물의 관성력에 의한 하중도 고려하여야 한다. 슬로싱과 같은 충격 동하중이 예상되는 화물창에 대하여는 별도로 검토하여야 한다. 이 중선체 유조선 및 산적화물선에 대한 하중에 대하여는 이 규정에 추가하여 3에 규정된 각각의 「선종별 직접강도계산」에 따른다.

2.3.2 적재하중

1) 입상화물 (광석 및 곡물 등)에 의한 하중

화물의 밀도, 적재높이 및 화물적재 형상 등에 대해서는 적하지침서를 참고하여 결정하여야 한다. 하중계산에 사용한 화물의 밀도, 적재높이 및 화물의 적각각 (repose angle)을 승인용 자료에 명시하고 필요에 따라 화물의 내부마찰각 및 화물과 벽면과의 마찰각도 명시한다.

2) 액체화물 및 밸러스트 등에 의한 하중

탱크 수두의 상단은 탱크의 정판상 넘침관의 상단까지의 거리의 1/2의 위치로 하고 큰 디프 탱크의 수두는 필요한 경우 동적 영향에 의한 적절한 부가수압을 고려하여야 한다. 항내 등 파랑의 영향이 적은 수역에서만 적재되는 액체화물 및 밸러스트에 대하여는 실제로 적재되는 수두를 사용하여도 좋으나, 연료, 청수 등 소비되는 액체에 의한 하중은 고려할 필요가 없다.

2.3.3 정수압

1) 선저 및 선측에 작용하는 정수압으로서 각 적재상태에서의 정수중 홀수 (d_s)에 대한 수두 (m)를 고려한다.

2) 수압 시험상태에서의 하중은 다음과 같다

(1) 수압시험을 하는 탱크의 수두상단은 탱크의 정판상 2.45 m의 위치로 한다.

(2) 수압 시험상태에 있어서의 선축 및 선저수압은 계획만재홀수선의 1/3에 상당하는 정수압으로 한다.

2.3.4 파랑하중

1) 파도의 파정 또는 파저에 해당하는 파랑변동 하중으로서 다음 식에 나타난 정수중 홀수에서 정수압으로부터의 변동분 H_0, H_1 및 H_2 에 상당하는 수두 (m)를 고려한다(그림 3 참조).

$$H_0 = 0.5 \times H_w \text{ (m)}$$

$$H_1 = 0.9 \times H_w \text{ (m)}$$

$$H_2 = 0.25 \times H_w \text{ (m)}$$

여기서,

$$\begin{aligned} H_w &= 0.61L^{1/2} \text{ ----- } L \leq 150\text{m} \\ &= 1.41L^{1/3} \text{ ----- } 150\text{m} < L \leq 250\text{m} \\ &= 2.23L^{1/4} \text{ ----- } 250\text{m} < L \leq 300\text{m} \\ &= 9.28 \text{ ----- } 300\text{m} < L \end{aligned}$$

2) 항내 등 파랑의 영향이 적은 수역에서 파랑변동하중은 전 1)에 규정하는 H_0, H_1 및 H_2 의 값의 1/2로 하여도 좋다.

3) 파랑변동하중은 선박의 길이 방향에 균일하게 분포하는 것으로 한다.

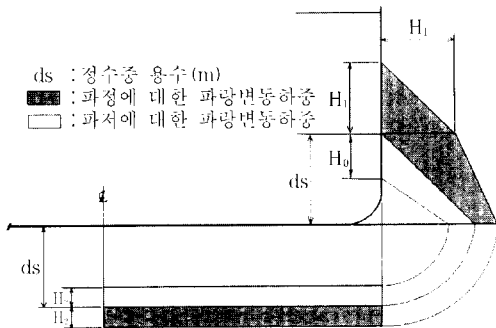


그림 3 파랑변동하중

2.4 허용응력

2.4.1 크기

전 2.2에 규정하는 구조모델에 대하여 전 2.3에서 규정된 하중이 작용한 경우 각 구조부재에 생기는 응력의 크기가 다음에 정하는 응력값 이하가 되도록 부재치수를 결정하여야 한다.

1) 연강재를 사용할 경우의 허용응력

이중선체 유조선 및 산적화물선에 대하여는 3.에 규정된 각각의 선종별 직접강도계산에 정하는 것으로 하며, 특별히 규정하지 않은 경우에는 본 선급이 적절하다고 인정하는 바에 따른다.

2) 고장력강을 사용할 경우의 허용응력

전 1)에 규정되어 있는 값을 다음표의 재료계수 K 로 나눈 것으로 한다.

재료기호	K
RA, RB, RD 및 RE	1.0
RA32, RD32 및 RE32	0.78
RA36, RD36 및 RE36	0.72

2.4.2 길이방향 응력의 허용치

선체 횡단면계수에 여유가 있을 경우 선박의 길이방향 응력의 허용치는 본 선급이 적절하다고 인정하는 바에 따른다.

2.5 좌굴강도계산

2.5.1 적용

선체구조 각부재의 좌굴강도를 검토할 경우에는 2.1 내지 2.4에 의한 직접강도계산 결과를 이용하여 좌굴강도를 검토하며, 좌굴강도를 검토할 때 패널이 부식에 대하여 충분한 고려가 되어 있는 경우에 적용한다.

2.5.2 작용응력

1) 패널의 면내 작용 응력

(1) 응력성분

좌굴강도를 검토할 패널에 대하여는 아래의 요소좌표계에 따른 면내 작용응력을 먼저 구하여야 한다(그림 4 참조).

- σ_x : x 방향의 압축응력 (N/mm²)
- σ_{xb} : x 방향의 면내굽힘응력 (N/mm²)
- σ_y : y 방향의 압축응력 (N/mm²)
- σ_{yb} : y 방향의 면내굽힘응력 (N/mm²)
- τ : 전단응력 (N/mm²)

여기서 응력 σ_x, σ_y 의 부호는 압축응력을 양 (+)으로 하고 인장응력은 0 으로 한다.

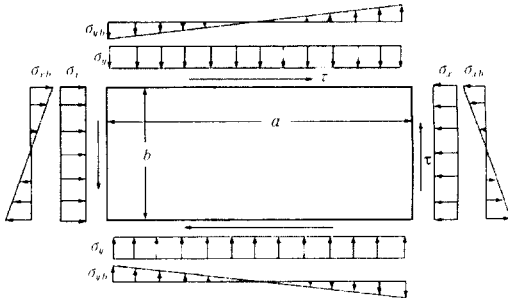


그림 4 패널에 작용하는 작용응력

(2) 선체종굽힘 응력에 대한 고려

해당패널의 단부에 작용하는 전 (1)의 응력값은 선체종굽힘 모멘트에 의한 하중을 고려하지 않은 값이므로 특별히 이중저 거더에 대해서는 부재위치의 정수중 종굽힘모멘트에 의한 응력을 더하여야 한다.

표 2 그룹분류

분류	특징	주된대상부재의 예	좌굴 판정치 λ
A	전단응력이 비교적 작고 굽힘응력이 압축응력보다 작은 경우. 2축 방향으로 작용하는 압축응력이 대등한 경우	선체종강도에 기여하는 갑판, 선저외판, 내저판 및 2축응력 상태인 종격벽판 등 2축 응력상태인 횡격벽판 및 깊이가 깊은 거더 등	1.2
B	굽힘응력성분이 작고 주로 1축 압력과 전단응력이 작용하는 경우	1축 압축과 전단응력상태인 선저외판, 선측탱크 등의 경사판, 선단력이 큰 격벽판, 1축 압력과 전단응력 상태인 거더 및 늑판 등	1.2
C	압축응력이 작고 굽힘응력이 크며 전단응력이 작용하는 경우	굽힘과 전단응력상태인 거더 및 늑판	1.2

(3) 응력분포의 특징에 의한 분류
대상부재 및 패널의 면내 작용응력의 분포 특징에 따라 표 2에 표시된 바와 같이 분류한다. 단, 분류가 곤란한 경우에는 각 분류에 대하여 각각 검토한다.

(4) 면내작용응력의 수정

전 (1)에서 얻어진 패널의 면내 작용응력을 각 분류별로 표 3에 따라 수정하여야 한다. 단, 필요대상부재 및 패널의 면내 작용응력의 분포 특징에 따라 좌굴축을 변환한다. 수정된 응력은 좌굴강도를 검토하는 경우 면내 작용응력으로 한다.

2.5.3 좌굴강도계산

1) 좌굴강도 계산의 순서(표 4 참조)

(1) 대표 등가응력

패널의 면내 작용응력으로부터 표 4에 따라 대표 등가응력 σ_e 를 구한다.

(2) 등가탄성 좌굴응력

표 4의 탄성좌굴상관식에 의하여 좌굴응력 σ_{cr} , σ_{cr} , τ_c 을 구하고 이 좌굴응력을 사용하여 등가탄성 좌굴응력 σ_e 을 구한다.

(3) 등가소성 좌굴응력

등가탄성 좌굴응력 σ_e 의 값이 항복응력 σ_y 의 1/2 보다 큰 경우에는 등가소성좌굴응력 σ_{cr}' 을 구한

표 3 분류별 면내작용응력의 수정

분류	응력상태	수정면내응력
A	$\sigma_x \geq \sigma_{xb}$ 및 $\sigma_y \geq \sigma_{yb}$ 일때 $\sigma_x = \sigma_x + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{xb}$ $\sigma_y = \sigma_y + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{yb}$ 로 한다.	
B	$\sigma_x \geq \sigma_{xb}$ 일때 $\sigma_x = \sigma_x + \frac{1}{2} \cdot \sigma_{xb}$ 로 한다.	
C	$\sigma_x < \sigma_{xb}$ 일때 $\sigma_x = \sigma_x$ $\sigma_y = \sigma_{yb}$ $\sigma_b = \sigma_x + \sigma_{xb}$ 로 한다.	가정 패널의 폭 B : $B = (1 + \frac{\sigma_x}{\sigma_b})b = \frac{\sigma_b + \sigma_x}{\sigma_b} \cdot b$

표 4 좌굴강도계산

	분 류 A	분 류 B	분 류 C
작용응력	σ'_x, σ'_y	σ'_x, τ	σ_{Bx}, τ
대표등가응력 σ_{eq}	$\sqrt{\sigma_x'^2 - \sigma'_x \sigma'_y + \sigma_y'^2}$	$\sqrt{\sigma_x'^2 + 3\tau^2}$	$\sqrt{\left(\frac{3}{4}\sigma_{Bx}\right)^2 + 3\tau^2}$
종횡비 β	a/b (≥ 1.0) 표 3참조	a/b 표 3참조	a/B 표 3참조
좌굴응력	$\sigma_{xcr} = K_x \cdot \sigma_c, \sigma_{ycr} = K_y \cdot \sigma_c$	$\sigma_{xcr} = K_x \cdot \sigma_c, \tau_{cr} = K_\tau \cdot \sigma_c$	$\sigma_{Bcr} = K_B \cdot \sigma_c, \tau_{cr} = K_\tau \cdot \sigma_c$
평판에 대한 오일러 응력 σ_c	$\frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$		$\frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{B}\right)^2$
탄성 좌굴상관식	$\frac{K_x}{K_{xo}} + \frac{K_y}{K_{yo}} = 1$	$\frac{K_x}{K_{xo}} + \left(\frac{K_\tau}{K_{\tau o}}\right)^n = 1$	$\left(\frac{K_B}{K_{Bo}}\right)^2 + \left(\frac{K_\tau}{K_{\tau o}}\right)^2 = 1$
등가탄성 좌굴응력 σ_{cr}	$\sqrt{\sigma_{xcr}^2 - \sigma_{xcr} \sigma_{ycr} + \sigma_{ycr}^2}$	$\sqrt{\sigma_{xcr}^2 + 3\tau_{cr}^2}$	$\sqrt{\left(\frac{3}{4}\sigma_{Bcr}\right)^2 + 3\tau_{cr}^2}$
등가소성 좌굴응력 σ_{cr}'	$\sigma_{cr}' > \frac{1}{2}\sigma_v$ 일때 $\sigma_{cr}' = \sigma_v \left(1 - \frac{\sigma_v}{4\sigma_{cr}}\right)$ σ_v : 재료의 항복응력		

다. 여기서 항복응력 σ_v 는 다음 값으로 한다.

$$\sigma_v = \frac{235}{K} \quad (N/mm^2)$$

2) 좌굴강도의 판정

전 1)에서 구한 결과를 이용하여 다음 (1) 또는 (2)의 조건에 만족하여야 한다. 단, λ 는 좌굴 판정치로서 표 2에 따른다.

(1) 등가탄성 좌굴응력 σ_{cr} 의 값이 항복응력 σ_v 의 1/2 보다 큰 경우

$$\sigma_{cr}' \geq \lambda \sigma_{eq}$$

(2) 등가탄성 좌굴응력 σ_{cr} 의 값이 항복응력 σ_v 의 1/2 보다 작은 경우

$$\sigma_{cr} \geq \lambda \sigma_{eq}$$

3. 선종별 직접강도 계산

3.1 이중선체 유조선

3.1.1 일반

이중선체 유조선(Double Hull Tanker)의 화물

유 탱크내 부재의 치수를 직접강도계산에 의하여 결정할 때는 다음에 따르며, 여기에서 특별히 언급하지 아니한 사항은 전 2에 따른다.

3.1.2 구조의 모델링

1) 해석범위

해석대상의 범위는 중앙부 평행부의 인접한 2개 화물유 탱크 한쪽 현으로 하며 이때 각 화물유 탱크의 길이는 전체 또는 1/2 화물유 탱크로 하며 화물유 탱크 사이의 횡격벽을 포함한다. 다

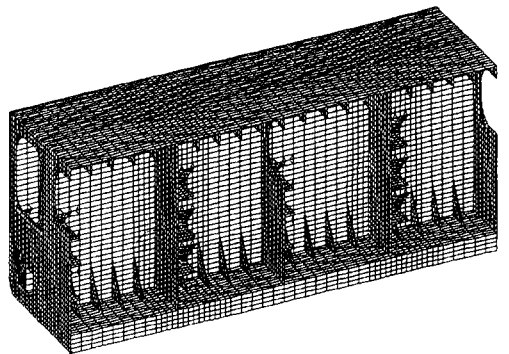


그림 5 화물유 탱크의 모델 예

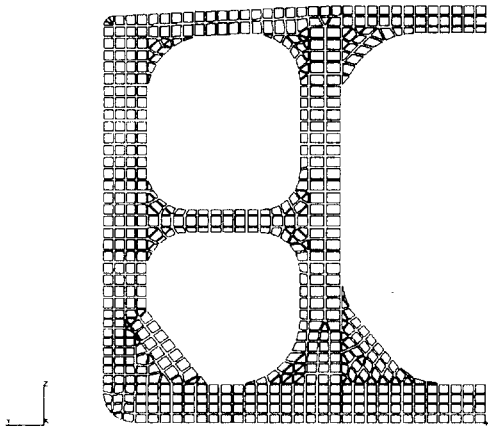


그림 6 선측 트랜스버스의 모델 예

만, 이중선체구조의 밸러스트 탱크의 배치, 화물유 및 밸러스트의 적재방법 및 거더와 적벽의 중·횡방향 대칭성 등을 고려하여 모든 상태를 재현할 수 있도록 이 범위는 필요에 따라 확장시켜야 한다.

2) 구조 모델링 및 경계조건

관구조로 모델링하는 경우에는 절 2.2에 따르며 이 경우 화물유 탱크와 선측 트랜스버스에 대한 요소분할의 예를 그림 5 및 6에 나타내었으며, 각 요소의 짧은 변의 길이는 늘림간격 정도로 한다. 그리고 모델의 경계조건은 절 2.2.3에 따른다.

3.1.3 하중

구조모델에 작용하는 하중은 다음 각 호에 정한 외부하중과 내부하중을 조합한다. 다만, 다음 각 호에 의한 하중보다 큰 하중의 명확한 하중조합 상태가 있을 때에는 다음의 하중 조합대신에 이러한 상태를 고려하여야 한다.

1) 내부 하중

(1) 수압시현 상태

수두는 선측에서 갑판상 2.45m로 하며, 선박형태에 따른 하중상태의 대표적인 예는 표 5와 같다.

(2) 항해 상태

원칙적으로 항해상태시의 하중상태는 만재적재 상태 및 밸러스트 상태로 한다. 다만, 2 항구

표 5 하중상태의 예(3열 중격벽을 갖는 선박)

	Case	적재양상	중앙탱크	전후탱크	
수압시현상태	T-1				
	만재상태 및 만재상태에 대한 하중상태	F-1			
		F-2			
밸러스트 상태	B-1				
	B-2				

적재와 같은 특수한 적재상태가 있는 경우에는 이들 상태도 포함하여야 하며, 표 5는 이들의 대표적인 예이다.

(1) 각 화물유 탱크에서의 수두 h' 는 다음 식에 의한다.

$$h' = \rho(h + \Delta h) \quad (m)$$

ρ : 적하지침서에 명시된 화물유의 최대설계 비중.

h : 고려하는 위치로부터 창구정부까지의 높이 (m). 다만, 중간갑판을 갖는 선박의 하부 화물유 탱크에서는 고려하는 위치로부터 중간갑판까지의 거리.

Δh : 부가수압으로서 다음 식에 의한 값. 다만 L형 또는 U형 탱크에 대하여는 본 선급이 적절하다고 인정하는 값으로 한다.

$$\Delta h = \frac{16}{L} (\ell_1 - 10) + 0.25 (b_1 - 10)$$

ℓ_1 : 탱크의 길이 (m). 다만, 10m 이하일 때에는 10m로 한다.

b_i : 선박의 나비 (m). 다만, 10m 이하일 때에는 10m로 한다.

② 벨러스트탱크의 수두 h' 은 다음식에 의한다

$$h' = \rho h \text{ (m)}$$

ρ : 해수의 비중으로 1.025로 한다.

h : 고려하는 위치로부터 탱크의 정부와 넘침관 상단 사이의 1/2 지점까지의 높이 (m).

③ 화물유 탱크가 벨러스트 탱크로 사용되는 경우에는 ②의 수두도 고려하여야 한다.

④ 항내 등 파랑의 영향이 적은 구역에서의 수두 h' 은 Δh 를 고려하지 않아도 된다.

2) 외부하중

(1) 수압시험 상태

수압시험 상태하의 선저 및 선측의 수두는 계획만재홀수의 1/3에 해당하는 정수압으로 한다.

(2) 항해 상태

항해상태하의 선저 및 선측의 수두는 전 2.3.4의 파랑하중을 적용한다. 항해상태에서 화물유 탱크가 공창이 되고 파랑하중으로서 파 정을 고려한 경우에는 갑판부의 하중도 고려하여야 하며, 이때 갑판부의 하중은 갑판하 거더 하중으로 다음 식을 적용한다.

$$h = a(bf - y) \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

표 6 판구조를 사용하였을 때의 허용응력 (N/mm²)

해석대상부재			σ	σ, σ_v	σ_e
이중선체내의 주요부재	종강도부재	외판, 종격벽판, 내저판	145/K-35f, 최대 125/K	145/K	145/K
		거더, 스트링거			
	늑판, 트랜스버스	-	175/K		
1. 등가응력 σ_e 는 다음에 따른다. 수평 종강도부재 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$ 수직 종강도부재 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$ 횡 강 도 부 재 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$ σ_x : 선박길이 방향의 직응력 (nomal stress) σ_y : 선박나비 방향의 직응력 σ_z : 선박깊이 방향의 직응력 τ : 전단응력 2. 거더 또는 늑판에 개구가 있을 경우에는 이들을 고려하여 응력을 검토하여야 한다. 3. 응력판별 위치는 요소의 중심으로 한다. 4. f 는 선체 횡단면의 수평중성축에서 0, 강력갑판에서 f_D 및 선저외판에서 f_B 로 하며, 중간위치에서는 중립축으로부터 멀리 떨어진 거리에 따라 보간법에 의한다.					
해석대상부재			σ_a	σ_e	
이중선체구조 이외의 주요부재	면 재	평행부		175/K	-
		모서리부		195/K	-
	웨 브	평행부		-	175/K
		모서리부		-	195/K
1. σ_a : 면재의 직응력 2. 등가응력 σ_e 는 다음에 따른다. $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$ σ_x : 요소좌표계의 x방향의 응력 σ_y : 요소좌표계의 y방향의 응력 τ : 요소좌표계의 x-y평면내의 전단응력 3. 응력 판별위치는 요소의 중심으로 한다.					

a : 2.25(선박의 중앙부에 있어서 강력갑판의 갑판구 축선밖에 설치하는 갑판하 종거더), 또는 3.25(그 이외의 갑판하 거더인 경우)

b : 1.0

f : 계수로서 다음에 따른다.

선박의 길이	f
$L < 150\text{m}$	$\frac{L}{10}e^{-\frac{L}{150}} + \left(\frac{L}{150}\right)^2 - 1.0$
$150\text{m} \leq L < 300\text{m}$	$\frac{L}{10}e^{-\frac{L}{150}}$
$300\text{m} \leq L$	11.03

y : 만재흘수선으로부터 노출갑판까지의 선측에서 측정된 수직거리 (m)

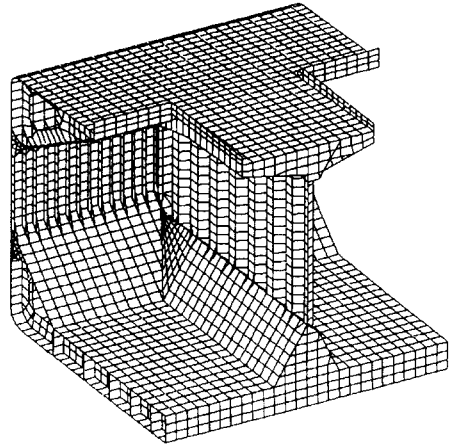


그림 7 판구조 모델의 예

3. 1. 4 허용응력

판구조를 사용하였을 때의 허용응력은 표 6에 따른다.

3. 1. 5 트랜스버스의 처짐

직접강도계산 결과에서 종늑골, 종갑판보 또는 격벽 휨보강재를 지지하는 트랜스버스 상호간의 상대변위 또는 트랜스버스와 격벽간의 상대변위가 크게 나타날 경우에는 추가로 상세해석을 수행하여야 한다.

3. 2 산적화물선

3. 2. 1 일반

산적화물선(Bulk Carrier)의 화물창내 부재의 치수를 직접강도계산에 의하여 결정할 때는 다음 3.2.2 내지 3.2.4에 따른다.

3. 2. 2 구조의 모델링

1) 구조의 모델링

(1) 해석대상의 범위는 중앙부 평행부의 인접 2개의 화물창의 한쪽 현으로 하며 이때 각 화물창의 길이는 전체 또는 1/2 화물창으로 하며 화물창 사이의 횡격벽을 포함한다.

(2) 판구조로 모델링하는 경우에는 전 2.2에 따르며 이 경우에 요소분할의 표준 예를 그림 7

에 표시하였다. 길이 방향으로는 각 늑골간격으로, 폭 방향으로는 인접하는 2개의 거더 사이를 2개 이상의 요소로 분할하며 이중저 거더 및 늑판은 길이 방향으로 3개 이상으로 분할함을 원칙으로 한다.

(3) 전 2.2.1에 따라 상세분할 해석을 하는 경우에 선형요소를 이용한 요소분할의 예를 그림 8에 나타내었다. 이 경우 트랜스버스의 길이 방향으로 3개 이상의 요소로 분할함을 원칙으로 한다.

2) 경계조건 : 전 2.2.3을 준용한다.

3. 2. 3 하중

1) 하중조건

고려하는 하중조건은 만재시 및 밸러스트를 기준으로 한다. 격창적하, 2항구 적하 또는 비중이

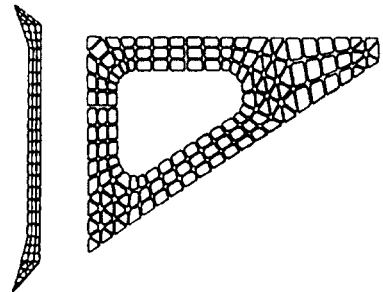


그림 8 상세분할 해석에 의한 모델의 예

큰 화물의 적하 등과 같이 특수한 적재상태가 예상될 경우 그러한 적하상태도 계산에 포함한다. 표 7은 각 하중조건에의 예를 표시하였다.

2) 내부하중

(1) 광석 등 입상화물에 의한 하중

① 화물의 적재 높이 및 형상은 다음 (i) 내지 (iv)를 기준으로 한다.(그림 9 참조)

(i) 화물의 적재형상은 화물창 중앙부에서는 종횡방향으로 수평하고 선측방향으로는 화물적하각(repose angle) ϕ 로 하향 경사진다고 가정한다.

(ii) 화물창 중앙부 수평부분의 폭 b 는 화물창폭의 1/4로 가정한다.

(iii) 적재높이 h_{cl} 은 적재되는 화물의 질량, 화물적하각, 밀도에 따라 결정한다. 길이 방향의 적하형상은 전 (i) 및 (ii)의 폭방향 형상으로 일정하다고 가정한다.

(iv) 화물의 밀도 및 적하각이 명시되지 않았을 때에는 밀도 $3.0(t/m^3)$ 및 화물 적하각 30° 로 가정한다.

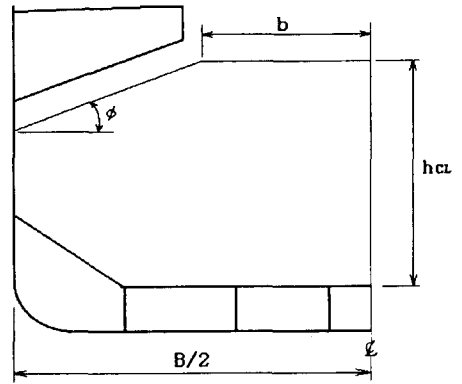


그림 9 화물창의 적재형상

② 화물창의 내벽에 작용하는 하중은 다음 식에 의한다. 다만, 화물하중은 선측 외측에 작용하지 않는다.

$$9.81\gamma h k^2 (N/m^2)$$

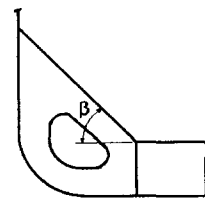
γ : 화물의 밀도 (kg/m^3)

h : 고려하는 패널로부터 직상부 화물의 표면까지의 수직 높이 (m).

k : 다음 표에 따른다

경사각 β (도)	k
$\beta \leq 40^\circ$	1.0
$40^\circ < \beta < 80^\circ$	$1.4 - 0.01\beta$
$\beta \geq 80^\circ$	0.6

β : 빌지호퍼 탱크의 경사판과 내저판 사이의 각은 아래의 그림에 따른다.



(2) 액체화물 및 밸러스트 등에 의한 하중
 밸러스트 검용창에 있어서 각 위치에서의 수두는 다음 식에 의한 값과 식 중의 h 의 값 중 큰

표 7 하중조건에의 예

수압시험상태	만재 및 특수한 적재상태	밸러스트 상태
(a) Center Tank Test 종단면 횡단면 후부화물창 전부화물창	(a) Homogeneous loading 	(a) Normal Ballast
(b) Side Tank Test 	(b) Alternate Loading (또는 2항적재) 	(b) Heavy Ballast
$h = D + 2.45$ $d_s = 1/3 \times$ 만재홀수	$d_s =$ 만재홀수 (또는 2항 적재홀수)	$d_s =$ 밸러스트 홀수

값으로 한다.

$$0.85(h + \Delta h) \quad (m)$$

h : 고려하는 위치에서 창구코밍까지의 높이 (m).

Δh : 다음 식에 의한다.

$$\Delta h = \frac{16}{L}(l_1 - 10) + 0.25\left(\frac{2}{3}B - 10\right)$$

l_1 : 탱크의 길이 (m)로서 10m 이하일 때는 10m로 한다.

B : 선박의 나비 (m)로서 15m 이하일 때는 15m로 한다.

3. 2. 4 허용응력

1) 요소의 종류별 허용응력

(1) 판구조로 모델링하였을 경우의 허용응력
 각 부재의 허용응력 σ 와 등가응력 σ_e 는 표 8에 따른다. 다만, 전 2.2.1에 따라 상세분할 해석을 한 경우 횡부재의 허용응력은 표 9에 따른다.

(2) 보요소로 모델링 하였을 경우의 허용응력
 각 부재의 허용응력은 표 8 및 9에 따라야 하

표 8 판구조를 사용하였을 때의 허용응력(N/mm²)

해석대상부재		d	σ, σ_y	σ_e
종강도부재	선저외판, 내저판, 밑지호퍼탱크 또는 돛사이드 탱크의 경사판	110/K	145/K	145/K
	거더		-	175/K
횡강도부재	스틀의 경사판, 횡격벽판		145/K	175/K
	늑판		-	175/K

(비고)
 1. 등가응력 σ_e 는 다음에 따른다.
 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$ (종강도부재)
 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau^2}$ (횡강도부재)
 σ_x : 선박 길이방향의 직응력
 σ_y : 선박 나비방향의 직응력
 σ_z : 선박 길이방향의 직응력
 2. 늑판 또는 거더에 개구가 있을 경우에는 응력을 평가할 때 이를 적절히 고려하여야 한다.
 3. 응력판별 위치는 요소의 중심으로 한다.
 4. K : 규정된 재료계수

표 9 판구조를 사용하였을 때의 허용응력(N/mm²)
 (상세분할 해석을 한 경우)

해석대상부재		σ	τ	σ_e
횡늑골판	평행부	-	-	175/K
	보서리부	195/K	-	195/K
선측늑골	평행부의 중앙부	175/K	-	175/K
	평행부의 상하단부	215/K	70/K	195/K

(비고)
 1. σ_e : 면재의 면내 직응력
 2. 등가응력 σ_e 는 다음에 따른다.
 $\sigma_e = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau^2}$
 (요소 좌표계는 x-y좌표 좌표계로 한다)
 σ_x : 요소좌표계는 x방향의 응력
 σ_y : 요소좌표계는 y방향의 응력
 τ : 요소좌표계는 x-y평면내의 전단응력
 3. 응력판별 위치는 요소의 중심으로 한다.
 4. K : 규정된 재료계수

며, 보요소에 의한 해석법의 상세한 자료를 제출하였을 경우 본 선급과 협의하여 정할 수 있다. 다만, 이 경우 이중저 구조부재에 대한 허용응력은 표 10에 따른다.

표 10 보요소를 사용하였을 때의 허용응력(N/mm²)

해석대상부재	σ	σ	τ	σ_e
거더, 늑판	-	-	100/K	175/K
내저판, 선저외판	100/K	145/K	-	-

(비고)
 1. 등가응력 σ_e 는 다음에 따른다.
 $\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$
 σ : 면내 직응력으로 다음 식에 의한다.
 $\sigma = \sigma_x + \sigma_y$
 σ_x : 축응력
 σ_y : 굽힘응력
 σ_z : 선박 길이방향의 직응력
 σ_r : 선박 나비방향의 직응력
 τ : 평균 전단응력
 2. 늑판 또는 거더에 개구가 있을 경우에는 응력을 평가할 때 이를 적절히 고려하여야 한다.
 3. K : 규정된 재료계수

2) 선체 횡단면계수에 여유가 있을 때의 허용 응력
 선저외판 및 내저판의 선체 길이방향의 허용응력 (N/mm^2)은 다음 식에 의한다.

- 판구조를 사용한 모델

$$\frac{145}{K} - 35f_B$$

- 보요소를 사용한 모델

$$\frac{135}{K} - 35f_B$$

4. 결 론

본 연구에서는 유조선, 산적화물선 및 기타선박에 대하여 유한요소 프로그램을 이용한 선체구조의 직접강도해석 방법에 대한 구체적인 내용을 소개하였다. 그러나 현재 보편화되어 있는 상용 유한요소 프로그램 (ANSYS, NASTRAN 등)을 이용하여 선박의 직접강도 해석을 수행할 경우, 반복적이고 다량의 입력작업 등으로 인하여 많은 시간이 소요되고, 또한 해석결과가 부적절한 경우 최적화 작업을 위한 모델링의 수정작업에 많은 시간이 요구된다. 이런 단점들을 해결하기 위하여 한국선급에서는 유한요소법을 이용한 직접강도해석 program의 P/C Version인 KR-STARS를 개발 중에 있으며, 상용 유한요소 program의 사용에 따른 단점을 보완하여 작업시간을 줄이고 사용자가 사용하기 편리하도록 기능을 보완한 program을 개발하고 있다.

또한, 한국선급에서는 단순히 선급규정에 따라 계산하는 기능에 추가하여 조선소 및 선주와 선급 (KR) 간의 문서, 데이터 등의 정보교환을 현재와 같이 문서로 하지 않고 전자정보로서 교환할 수 있는 소위 CALS (Computer Added Acquisition and Logic Support)를 향한 인프라 정비를 함과 동시에 data format의 표준화 (STEP, Standard of Transfer of Geometry Information) 연구를 추진하

고 있다. 이들 연구 작업이 완료되는 경우 보다 질 높은 서비스를 제공할 수 있으리라 생각하며, 추후에는 개발이 완료된 이들 program의 구체적인 연구내용에 대하여 소개하고자 한다.

참 고 문 헌

1. 선급 및 강선규칙 제3편 선체구조, 한국선급, 1998
2. 선급 및 강선규칙 적용지침 제3편 선체구조, 한국선급, 1999
3. 선급 및 강선규칙 제7편 전용선박, 한국선급, 1998
4. Rule and Regulations for the Classification of Ships, Part 3, Lloyd's Register, 1998
5. "Buck Carrier" Guidance for Hull Structural Design, Class NK, 1995
6. Yukio Ueda, M. H. Rashed and J. K. Paik, "Elastic Buckling Interaction Equation of Simply Supported Rectangular Plates Subjected to Five Load Components", 昭和 60 年
7. 齊藤 和彦, "ばら貨物船の構造解析について (解析システム "NKBULK" について)", 日本海事協會會誌, 1988
8. 齊藤 和彦, "ばら貨物船の構造解析について (作用應力の失態と 許容應力の設定)", 日本海事協會會誌, 1988
9. S. Tashiro and A. Nitta, "Full Scale Test and Theoretical Analysis on the Structural Behavior of U.L.C.C. 'Nisseki-Maru'", 日本海事協會會誌, 1973
10. Yukio Ueda, Sherif M.H. Rashed, "Elastic Buckling Interaction Equation of Simply Supported Rectangular Plates Subjected to Five Load Components", 日本造船學會春季講演會, 1985