

SeaTrust-Holdan의 좌굴강도 평가 기능 개발 현황

도형민, 이정렬, 염철웅 (한국선급)

1. 서론

화물창의 구조해석에서 항복강도 및 피로강도와 더불어 좌굴강도 검토를 수행해야 한다. 좌굴강도 검토는 선박구조의 특성상 좌굴 용 Panel의 치수 및 경계조건을 고려하여 검증해야 하기 때문에 많은 공수가 소요된다.

최근에는 유한 요소 모델이 대형화되고 많은 하중조건을 고려해야 하기 때문에 재래식 방법으로는 모든 하중조건 및 전체 구조부재에 대한 좌굴강도 검토가 현실적으로 불가능하다. 따라서 신속하고 정확하며 자동화된 좌굴강도 평가 수단이 절실히 요구되는 실정이다.

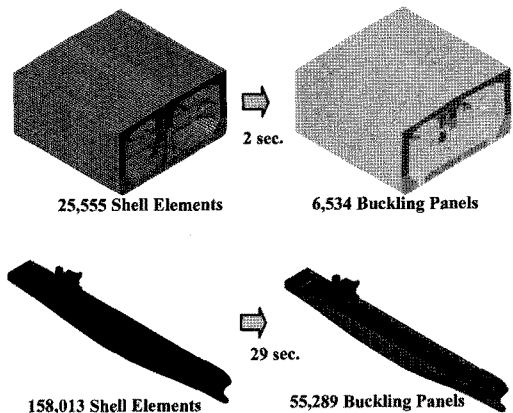
좌굴강도 평가 시스템의 핵심은 유한 요소 모델에서 좌굴 Panel의 인식에 있다. SeaTrust-Holdan의 좌굴강도 평가 시스템에서는 상당히 빠른 시간 내에 좌굴 Panel을 찾을 수 있도록 개발하였으며 다양한 유한 요소 모델에 대한 검증을 통해 그의 유효성을 검증하였다.

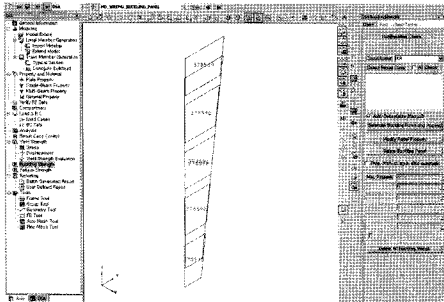
SeaTrust-CSR에서는 KR 규칙, 산적화물선 및 이중선체유조선에 대한 공통 구조규칙에 대한 좌굴강도 검토 기능을 지원하고 있으며, SeaTrust-Holdan에서는 여러 선급의 규칙에 의한 좌굴강도 검토 기능을 추가로 지원하고 있다.

2. 좌굴 Panel의 자동인식

좌굴 Panel은 별도로 모델링하는 것이 아니라 구조해석에 사용된 유한 요소 모델로부터 추출해야 한다. 따라서 유한 요소의 주변 유한 요소가 연결된 상황을 고려하여 자동으로 찾을 수 있는 기능을 추가하였다. 좌굴 Panel은 판 요소의 Edge에 보나 봉 요소가 있거나 판과 판 요소가 같은 평면상에 있지 않은 경우를 고려하여 찾는 알고리즘으로 되어 있으며, 이 때 선택된 유한 요소가 여러 평면상에서 존재하거나 좌굴 Panel의 일부 유한 요소만을 선택한 경우에도 좌굴 Panel을 찾을 수 있다. 그리고 좌굴 Panel의 응력은 유한 요소의 응력이 좌굴 Panel의 좌표축에 맞춰서 자동으로 변환된다.

좌굴 Panel의 자동인식은 다양한 유한요소 모델에 대하여 검증하였으며 충분히 짧은 시간 이내에





찾는 다는 것을 검증하였다. 25,555개의 판 요소에 대하여 6,434의 좌굴 Panel을 찾는데 2초가 소요되며, 158,013개의 판요소에 대하여 55,289개의 좌굴 Panel을 찾는데 29초가 소요된다.

좌굴 Panel을 찾다 보면, 유한 요소 모델이 판 요소의 형상이 이상하거나 겹친 요소들로 인하여 좌굴 Panel을 찾기에 적절하지 못한 경우가 존재한다. 이런 경우에는 프로그램 상에서 “HD_WRONG_BUCKLING_PANEL”이란 그룹을 생성하여 사용자가 모델의 적절성을 검토할 수 있도록 하였다.

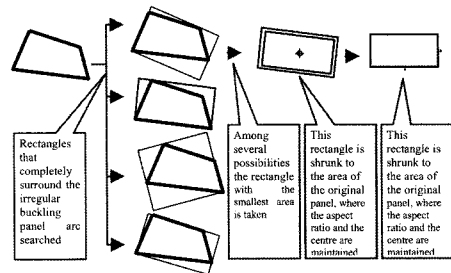
좌굴 Panel을 찾는 기능은 유한 요소 모델의 판 요소와 빔 요소들이 적절히 연결되어 있는지를 검토하는 방법으로서도 유용한 기능이다. 유한 요소 모델의 판 요소들이 제대로 연결되지 않았거나 빔 요소가 빠진 경우, 의도한 좌굴 Panel의 형상이 나오지 않게 되며 일반적으로는 정상적인 Panel의 크기에 비해 크게 나오게 되어 이를 통해 유한 요소 모델의 연결성을 확인할 수 있다. 프로그램의 초창기에는 좌굴 Panel은 해석 결과가 존재하는 경우에만 찾을 수 있도록 하였으나, 현재는 결과가 없어도 좌굴 Panel을 만들 수 있도록 하여 유한 요소 모

델의 검증 틀로 활용할 수 있도록 하였다.

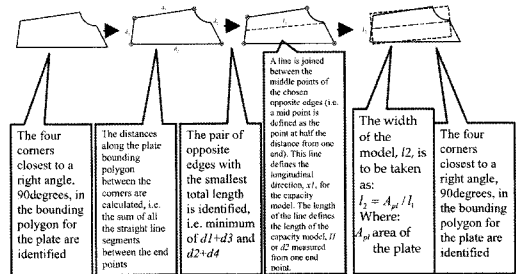
3. 직사각형이 아닌 좌굴 Panel의 이상화

좌굴에 대한 계산식들은 직사각형 형태의 좌굴 Panel에 대한 식이다. 선체구조에서 중부재의 경우에는 직사각형으로 이루어져 있으나 횡부재의 경우에는 직사각형으로 좌굴 Panel이 이루어지는 경우가 상당하다. 한국선급에서 교육용으로 작업하였던 유한 요소 모델의 경우 6,534개의 좌굴 Panel 중에서 직사각형이 아닌 좌굴 Panel은 1,657개가 존재한다.

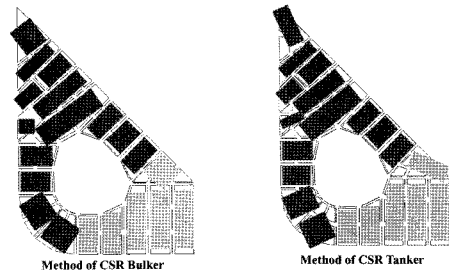
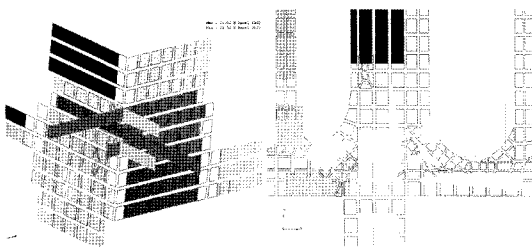
공통구조규칙 이전에는 직사각형으로 이상화하는



산적화물선의 Panel 이상화 방법



이중선체 유조선의 Panel 이상화 방법

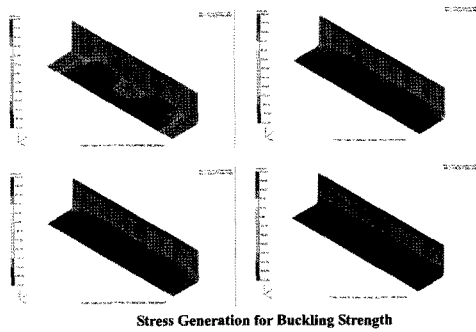




방법이 선급 규정 상에 존재하지 않아 사용자가 적절하게 대략적으로 좌굴 Panel을 이상화하였고, 한국 선급에서는 자체적인 이상화 방법에 따라서 직사각형이 아닌 좌굴 Panel을 이상화하였다. 공통구조규칙에는 이상화하는 방법이 각각 규정되어 있으며 본 시스템에서는 자동적으로 좌굴 Panel을 이상화한다.

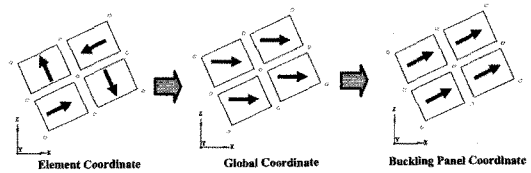
4. 좌굴 강도 검토 용 응력 생성

규정에 따라서 항복 강도 평가시의 응력과 좌굴 강도 평가시의 응력이 다른 경우가 존재한다. 구조 해석 시에 수밀구조 경계상의 판 요소에는 압력이 가해지며 이를 국부하중이라 하고, 여기에 추가적으로 선체 거더 하중을 고려하기 위하여 추가인 고려가 필요하다. 선체 거더 하중을 구조 해석 시에 직접 모멘트로 적용하는 방법을 직접법이라 하고, 구조해석 후에 보 이론에 따라서 선체 거더 하중을 종강도 부재에 고려하는 방법을 중첩법이라 한다. 선급 규정 별로 규정이 상이하기 때문에 좌굴 강도 검토 용 응력을 프로그램의 도움 없이 계산하는 것은 쉽지 않으며 본 시스템에서는 사용자가 원하는 좌굴 계산용 응력을 쉽게 생성할 수 있다.



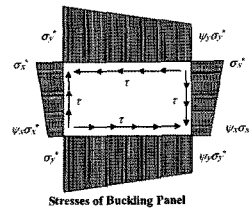
5. 좌굴 Panel의 응력 계산

범용 구조 해석 툴로서 널리 사용되는 NASTRAN의 판 요소 해석 결과는 요소 좌표계를 기준으로 한 응력이 출력되어 있다. SeaTrust-Holdan에서는 구조 해석 결과를 읽어 들일 때, 전역 좌표계의 응력



으로 수정하며 각각의 좌굴 Panel에 대해서는 좌굴 Panel 좌표계 상의 응력이 필요하다. 본 시스템에서는 좌굴 Panel 상의 좌표계로 응력을 자동적으로 변환하여 계산을 수행한다.

좌굴에 대한 계산식은 응력이 선형적으로 분포한다는 가정하에서 만들어졌다.



$$\sigma_x^* = \frac{\sum \sigma_x}{n}$$

$$\tau = \frac{\sum \tau_i}{n}$$

Buckling panel composed of uniform element

$$\sigma_x^*(x) = C + Dx$$

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [\sigma_x^* - (C + Dx)]^2$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^n [\sigma_x^* - (C + Dx)] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial D} = 2 \sum_{i=1}^n x_i [\sigma_x^* - (C + Dx)] = 0$$

$$C = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \sigma_x^* \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \sigma_x^* x_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$D = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n \sigma_x^* x_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \sigma_x^* \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$\sigma_x^* = \max(C, C + Dx)$$

$$\psi_x = \frac{\min(C, C + Dx)}{\max(C, C + Dx)}$$

$\sigma_x = \sigma_x^* - \nu \sigma_y^*$
 $\sigma_x = \sigma_x^* - \nu \sigma_y^*$
 $\sigma_x^* = \sigma_x^* - \nu \sigma_y^*$
 $\sigma_x^* = \sigma_x^* - \nu \sigma_y^*$

Stresses of Buckling Panel (Uniform Element)

$$\sigma_x^* = \frac{\sum A_i \sigma_x^*}{\sum A_i}$$

$$\tau = \frac{\sum A_i \tau_i}{\sum A_i}$$

Buckling panel composed of uniform elements
 Weighting using area of each element

$$\sigma_x^*(x) = C + Dx$$

$$\Pi = \sum_{i=1}^n A_i [\sigma_x^* - (C + Dx)]^2$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^n A_i [\sigma_x^* - (C + Dx)] = 0$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial D} = 2 \sum_{i=1}^n A_i x_i [\sigma_x^* - (C + Dx)] = 0$$

$$\sigma_x^* = \max(A_i, A_i + Bx)$$

$$\psi_x = \frac{\min(A_i, A_i + Bx)}{\max(A_i, A_i + Bx)}$$

$$C = \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_x^* \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_x^* x_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n A_i \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \right)^2}$$

$$D = \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_x^* x_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i \sigma_x^* \right)}{\left(\sum_{i=1}^n A_i \right) \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n A_i x_i \right)^2}$$

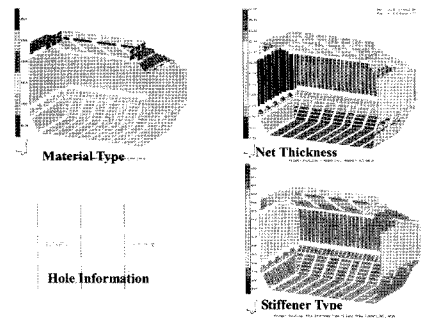
Stresses of Buckling Panel (Non Uniform Element)

이에 반해 실제 좌굴 Panel의 응력 구배는 정확한 선형분포를 이루지 않고 있어서 이에 대한 적절한 이상화가 필요하다. X축 방향의 응력은 판 요소가 일반적으로 하나 존재하기 때문에 본 시스템에서는 좌굴 Panel의 이상화를 위하여 판 요소의 크기가 일정한 좌굴 Panel의 경우에는 최소자승법(Least Square Method)을 사용하였고, 판 요소의 크기가 일정하지 않은 경우에는 판 요소의 면적에 가중치를 둔 최소자승법을 적용하였다.

6. 좌굴 Panel의 Property 생성

좌굴 강도 검토 시에는 좌굴 Panel의 응력뿐만 아니라, 재질, 좌굴 Panel을 구성하는 보강재에 대한 정보, 부식, 선체 거더 응력, Panel을 이루는 주변의 보강재 정보, 좌굴 Panel에 홀이 있는 경우에 대한 정보 등과 선급 별로 추가로 필요한 사항들이 존재한다.

이미 유한 요소 모델에 재질, 보강재 정보, 부식 추가 두께정보가 항복 강도 검토 부분에서 Hull Girder 응력 정보가 주어진 경우에는 자동으로 좌굴 Panel에 입력되며, 그렇지 않은 경우에는 수동으로 입력을 하여야 한다. 또한 좌굴 Panel이 만들어진 이후에도 재질, Stiffener 정보, Corrosion 정보 등이 수정가능하며, 수정과 동시에 관련된 결과들이 다시 갱신된다.



7. Worst Case 생성

좌굴 강도는 모든 Case가 좌굴 강도 기준을 만족

해야 하기에, 구조해석을 수행한 후에 여러 가지 Case의 결과를 중에서 Worst Case를 알아내는 것이 중요하다. 본 프로그램은 여러 개의 하중 Case에 대하여 동시에 좌굴 강도 검토가 가능하며 계산 시에 Worst Case를 자동으로 생성한다.

8. 좌굴 Panel 수정 용 계산기능

좌굴 강도 계산 후에 좌굴 Panel에 대한 특성과 Case별 응력이 바뀔 때 따라서 검토할 수 있도록 수정 계산기능을 지원한다.

아래 그림에서 푸른색으로 보이는 사항들에 대해서 변경가능하며 "Calculation for Modified Panel" 버튼을 누르면 결과가 갱신된다. 이 기능은 사용자가 매개변수들을 수정 시에 결과에 미치는 영향을 시험해보는 것으로 이 결과는 저장되지 않는다.

Calculation for Buckling Panel Modification

Case No.	Case Name	Load Case	Material	Thickness	Stiffener	Corrosion	Factor	Stress	Stress Ratio	Status
1	Full Scale	100%	CS	12	100%	0	1.00	100.0	1.00	OK
2	Reduced Scale	50%	CS	6	100%	0	1.00	50.0	0.50	OK
3	Reduced Scale	50%	CS	12	50%	0	1.00	100.0	0.50	OK
4	Reduced Scale	50%	CS	6	50%	0	1.00	50.0	0.25	OK

9. 검토 결과 보고서 용 파일 작성

좌굴 강도 검토 결과는 선택된 좌굴 Panel들에 대하여 Text File로 출력을 할 수 있도록 하였다. Text File의 이름은 선택된 Group 명과 Load Case 명을 조합하여 고유한 이름을 갖도록 하였다.

Case No.	Case Name	Load Case	Material	Thickness	Stiffener	Corrosion	Factor	Stress	Stress Ratio	Status
1	Full Scale	100%	CS	12	100%	0	1.00	100.0	1.00	OK
2	Reduced Scale	50%	CS	6	100%	0	1.00	50.0	0.50	OK

10. PULS 용 입력 데이터 생성

CSR for Double Hull Oil Tankers 규정에 따라 좌굴 강도를 검토하기 위해서는 PULS용 입력 Data를 만들어야 한다. PULS를 사용하여 좌굴 강도를



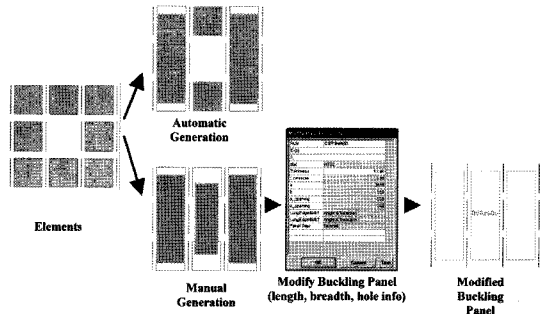
검토하면 기존의 선급 Rule에 비하여 계산시간이 상당히 증가하기 때문에 산식으로 구성된 기존의 선급 Rule로 검토하여 일정값 이상의 결과가 주어지는 좌굴 Panel에 대해서만 PULS 입력 데이터를 생성하도록 하였다.

PULS 입력 데이터 생성순서는 우선 Stiffened Panel을 생성하고 기존의 선급 Rule로 계산 후에 이 중에서 필요한 경우에만 선택적으로 PULS 입력 데이터를 생성하도록 하였다. PULS에서는 기존의 선급 Rule에서 요구되는 입력 데이터와 더불어 Stiffened Panel에 존재하는 Stiffener의 개수와 관련된 하중 Case에서의 압력이 필요하며 이를 자동으로 생성할 수 있도록 하였다.

PULS 입력 데이터는 PULS 프로그램 중에서 PULS Excel 형식에 맞추어서 생성되며 생성된 결과를 PULS Excel에 복사 후 실행하면 된다. 실행 후에 PULS Excel 결과를 본 프로그램에 복사하여 갱신하면, 그 결과를 그림으로 출력이 가능하며, 또한 그 결과를 본 프로그램에 저장될 수 있다.

11. 개구부 주변의 좌굴 강도 검토 기능

개구부 주변의 좌굴 Panel의 경우에는 선급 별 규정에 따라 추가적인 검토가 필요하며, 유한 요소 모델에 개구부를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우



Case No.	Case Name	Case Type	Case Description	Case Length	Case Breadth	Case Hole	Case Stiffener	Case Stiffness	Case Buckling Load	Case Buckling Stress
1	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
2	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
3	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
4	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
5	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
6	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
7	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
8	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
9	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
10	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
11	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
12	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
13	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
14	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
15	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
16	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
17	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
18	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
19	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
20	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
21	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
22	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
23	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
24	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
25	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
26	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
27	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
28	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
29	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000
30	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000	1000000

에 추가적인 검토가 필요하다.

12. 결론 및 향후 과제

SeaTrust-Holdan의 좌굴 강도 평가 시스템은 빠른 좌굴 Panel 자동인식과 사용의 용이함과 필요시 손쉬운 좌굴 Panel의 수정 및 수정기능 지원 등이 장점이라 할 수 있으며 이를 통해 좌굴 강도 평가에 소요되는 시간을 단축 시킬 수 있다.

선급 규정의 변경에 따른 지속적인 유지보수가 필요하며, 앞으로도 다양한 검토 기능, 사용자가 유한 요소 모델을 변경하였을 때 이에 대한 처리 방안, 메모리 효율화 방안, 그리고 사용자의 요구 사항을 지속적으로 반영하여 수정 보완할 예정이다. ∩