

# 수치해석 모델링을 이용한 유조선 선미부 구조에 발생한 좌굴 발생 원인 검토

이명수\* · 박주신\*\*†

\* 조선대학교 선박해양공학과 교수, \*\* 삼성중공업 조선해양연구소 프로

## Examination of Root Causes of Buckling in the Stern Structure of an Oil Tanker using Numerical Modeling

Myung-Su Yi\* · Joo-Shin Park\*\*†

\* Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

\*\* Principal engineer, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

**요 약** : 최근, 구조설계 기준 및 평가방법의 전문화로 인하여, 선급 규칙의 통합화가 이뤄졌었다. 그 좋은 일례가 국제공통규칙(CSR, Common Structural Rule)이다. 그러나, 종강도 하중이 크게 작용하는 화물창 구역에만 국한하여 세부규정이 제시되어 있고, 선수와 선미부 구조에는 별다른 평가 지침이 없다. 언급한 구역의 구조설계는 조선사의 설계 경험에 의존하여 진행되고 있으며, 선급에서도 명확한 기준이 없으므로 구조 손상 문제가 발생하더라도 근본적인 원인을 파악하기가 힘들다. 본 연구에서는 선미부에 주로 발생하고 있는 좌굴 손상의 대표적인 사례에 대한 근본적인 원인을 파악하기 위한 엔지니어링 기반의 해법을 제시하였다. 유한요소해석 모델링 기반 구조 강도 검증을 위하여, 하중 조건, 경계조건, 모델링 방법 그리고 평가 기준에 대한 합리적인 해법을 제시하였다. 선미부에 작용하는 휨 모멘트에 의하여 높이 방향으로 압축하중에 의해서 좌굴이 발생할 가능성이 있으며, 좌굴 강성 증가를 위하여 판 두께 증가 혹은 수직 보강재의 추가가 필요하다. 앞으로도 이 결과는 유사 운반선의 선미부 구조 강도 검토 시 도움을 줄 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 국제공통규칙, 선미부, 좌굴 손상, 구조 강도, 엔지니어링

**Abstract** : Recently, due to the specialization of structural design standards and evaluation methods, the classification rules are being integrated. A good example is the common international rules (CSR). However, detailed regulations are presented only for the cargo hold area where the longitudinal load is greatly applied, and no specific evaluation guidelines exist for the bow and stern structures. Structural design of the mentioned area is carried out depending on the design experience of the shipbuilder, and because no clear standard exists even in the classification, determining the root cause is difficult even if a structural damage problem occurs. In this study, an engineering-based solution was presented to identify the root cause of representative cases of buckling damage that occurs mainly in the stern. Buckling may occur at the panel wall owing to hull girder bending moment acting on the stern structure, and the plate thickness must be increased or vertical stiffeners must be added to increase the buckling rigidity. For structural strength verification based on finite element analysis modeling, reasonable solutions for load conditions, boundary conditions, modeling methods, and evaluation criteria were presented. This result is expected to be helpful in examining the structural strength of the stern part of similar carriers in the future.

**Key Words** : Common structural rule, After-part, Buckling damage, Structural strength, Engineering

\* First Author : true413@chosun.ac.kr, 062-230-7182

† Corresponding Author : scv7076@nate.com, 055-630-9613

## 1. 서 론

국제선급연합회(IACS)는 국제해사기구(IMO)의 GBS(Goal Based Standard) 권고사항을 만족하기 위하여, 기존에 별도로 분리된 산적 화물선, 원유 운반선 공통규칙을 보완한 통합규칙(CSR-H)을 적용해오고 있다. 여러 가지 항목들이 개선 또는 보완되었지만, 가장 큰 이슈는 직접해석에 의한 구조설계 결과물의 확인이라고 할 수 있다. 그러나, 구조해석의 평가 범위가 화물창에 국한되어 있어서 상대적으로 선수와 선미부는 조선사의 실적에 근거한 설계가 진행되어오고 있다. 특히 선수, 선미부는 형상의 특이성과 구조의 불연속성이 강해서 구조해석 기반의 접근을 하는데 명확하게 결정해야 하는 인자들이 많다. 본 연구에서는 유조선의 운항 중 선미부에서 발생한 좌굴 사례의 원인을 파악하기 위하여 구조해석 모델링 기반 평가를 진행하였으며, 과정 및 결과의 검증에 대해서도 논의하고 있다.

본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Cho and Song(2003)은 최종강도 이후의 거동을 정확하게 규명하기 위해서, 총 21개의 보강판 시편을 제작하고, 압축강도 테스트를 수행하였다. 보강재의 단면 속성은 플랫바(flat-bar)와 앵글바(angle-bar) 두 가지이다. 실험 시편은 최소 두께 1.86mm에서 2.13mm이고, 용접에 의한 초기 처짐은 판과 보강재로 분리하여 계측하여 수치해석 시 적용하였다. 최종강도를 예측할 수 있는 이론식에서 몇 가지 경험계수를 회귀 분석법을 이용하여 도출하였다. 앵글바 보강재를 갖는 보강판의 최종강도 및 이후까지 계산할 수 있는 경험식을 제안하였으며, 실험결과와 잘 일치함을 확인하였다.

Oh et al.(2007)은 운반선 및 해양플랫폼에서 주로 사용하는 곡판 구조에 조합 하중(수압 및 압축 하중) 작용 시 좌굴 및 최종강도에 대한 매개변수 비선형 시리드해석을 수행하였다. 용접이나 절단 작업에 의해 발생하는 초기 처짐의 효과를 고려하기 위하여 세장비를 함수로 한 스미스식(smith equation)을 적용하였다. 주요 결과로는 곡판의 세장비가 커질수록 최종강도는 감소하는 경향을 확인하였으며, 곡률의 증가도 유사하였다. 그러나, 특정 곡률(60도)에서는 몇몇 조건에서 2차 좌굴에 의한 최종강도 감소 경향이 발생하였으며, 두께가 얇은 조건에서만 해당하였다. 연구를 통하여 곡판의 좌굴 및 최종강도 거동의 특성을 잘 설명하였다.

Park et al.(2007)은 선체 보강판의 수치해석 모델링 방법에 따른 좌굴 및 최종강도 거동 차이를 분석하였다. 모델링에 사용된 제원은 cap size class 산적 화물선의 이중저 구조를 이상화하였다. 판과 보강재에 각각 초기 처짐을 적용하였고, 잔류응력은 고려하지 않았다. 모델링 방법은 보강재의 유효

폭을 고려한 PSC(Plate Stiffener Combination), 여러 개의 보강재와 패널 조합인 SPM(Stiffener Panel Model)이며, 모델 범위를 변수로 한 비선형 최종강도 계산을 수행하였다. PSC 모델링 방법은 최종강도를 높게 평가하는 경향을 보였으며, 최종강도 이후의 거동이 급격하게 변화하였다. SPM을 이용한 결과는 횡 프레임 효과를 고려하지 않더라도 최종강도 분포가 일정하게 나타났으며, 해석범위를 크게 할수록 최종강도는 감소하였다. 합리적인 좌굴 및 최종강도를 평가하는 관점에서는 SPM 모델 방법이 적합하며, PSC를 사용할 때는 최소 2개의 횡 프레임을 모델에 고려하여야만 최종강도를 과대평가하는 것을 막을 수 있다고 주장하였다.

Jang and Cho(2009)는 판 및 보강판의 좌굴 및 최종강도 평가에 있어서 현존하는 노르웨이 선급에서 제공하는 3가지 평가 기준에 따른 민감도 해석을 수행하였다. 사용된 평가 기준은 조선 좌굴 기준, 해양 좌굴 기준 그리고 최종강도 기반 좌굴평가 기준이다. 보강판의 구조 치수에 대해 평가 기준에 따른 결괏값 변화를 실험계획법과 분산분석법을 이용하여 분석하였으며, 선체 기준과 최종강도 기준은 하중 조건과 관계없이 보강판의 두께가 좌굴하중 값을 결정하는데 지배적이었다. 유한요소해석을 통하여, 위 관계를 재검증하였으며, 보강판의 두께가 가장 큰 인자였다. 최종강도 기준의 평가 결과는 선체 기준보다 두께를 최대 2mm까지 최적화할 수 있음을 확인하였다.

Akbari Alashi and Ahmad(2014)는 원통형 셸 구조 혹은 임의 곡을 갖는 얇은 곡판의 좌굴응력을 계산하기 위하여, 미분방정식을 개발하고, 이를 프로그래밍하여 변수 변화에 따른 응력 변화를 계산하였다. 제안된 이론에 의한 값과 현존하는 경험식과 비교 평가를 통해, 결괏값의 유사성을 확인하였다. 특히, 노르웨이 선급(DNV)의 곡판 좌굴응력 평가식은 미국 선급(ABS)과 비교하여, 보수적인 안전계수를 사용하여, 낮은 좌굴응력을 나타냈다. 이론 해의 상세한 검증을 위하여 수치해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 두께, 길이, 곡률에 대한 비교를 수행하였으며, 이론해가 다소 높은 결과를 제공하지만, 전반적으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Radwan and Kövesdi(2021)은 강철 건물 또는 교량을 설계하는 데 사용되고 있는 EN 1993-1-5 수치 설계 기법(기하학적 및 재료 비선형 분석, GMNIA)를 기반으로 한다. 순수한 압축을 받는 상자 단면 기둥의 경우, 국부 좌굴에 대한 합리적인 수치 모델에 대한 검증이 필요하였으며, 연구의 목표는 GMNIA 계산 방식을 적용하여 유한요소해석의 기하학적 결함을 조사하고, 이를 보완하는 것이다. 다양한 변수의 영향을 파악하기 위하여, 수치 매개변수 연구를 수행하였으며, 상자형 기둥 구조에 대한 좌굴 저항 계수를 계산할 수 있는 경험식을 제공하였다. 연구 결과물은 기존에 사용되고 있는

Winter 경험식 및 EN code의 개선점을 충분히 보완하고 있으며, 빨리 해를 도출할 수 있다.

본 연구에서는 유조선의 선미부 패널에서 발생하기 쉬운 좌굴 현상을 엔지니어링 방법으로 규명하기 위한 절차에 대한 제시와 함께, 결과에 대한 검증에 관한 내용을 언급하고 있다. 기존의 선행연구에서는 통상적인 종강도 화물창 구조에 대한 좌굴 및 최종강도에 관한 내용이었지만, 선박의 선미에만 발생 가능한 특이성을 반영한 연구라는 것이 차별성이 있다. 연구에서는 복잡한 수치해석 모델링 기반 구조해석을 수행하였지만, 다양한 연구와 검토가 수행된다고 하면 현재의 선급에서 제시하고 있는 부재의 설계 기준을 제시할 수 있다고 기대해본다.

## 2. 유조선 구조설계

### 2.1 주요 제원 및 배치

연구에서 사용된 선박의 주요 제원 및 배치는 아래 Table 1과 Fig. 1과 같다.

Table 1. Principal dimensions of the shuttle tanker

Component	Dimension
Length overall (m)	274.0
Length between perpendicular	264.0
Breadth overall (m)	48.0
Depth of hull (m)	23.0
Draft (m)	7.12
Max. dead weight (ton)	158,000
Max. speed (knots)	14

연구대상인 유조선은 선박 전체 길이의 70% 이상을 차지하는 화물창 구역과 선수부와 엔진룸을 포함하는 선미부로 구분할 수 있으며, Fig. 1과 같다. 일반적으로 4개의 화물창과 한 쌍의 기름탱크(Slop tank) 그리고 8개의 밸러스트(ballast) 탱크로 구성되어 있다. 화물창은 중앙부에 센터 격벽이 위치하며, 1번과 4번의 일부 구간을 제외하면, 주요 구조부재의 크기는 유사하게 결정 및 배치가 된다. 공통구조규칙(Common Structure Rule, CSR)은 국제선급연합회(International Association of Classification Societies, IACS)의 기술 전문가들이 만든 규칙으로, 2015년 7월 1일 이후 건조되는 90m 이상의 산적 화물선과 150m 이상의 원유 운반선에 대하여 강제 적용되고 있다. 특히 기존 좌굴 강도평가 방식을 개선하여 더 정확한 강도평가가 가능하도록 보강재의 평가도 추가되었다. 좌굴 거동은 압축 하중작용 시, 구조물의 횡 방향 변위가 발생하면서 손상되는 현상이며, 구조설계에서 중요한 평

가 항목이다. 선급마다 개별적인 평가 프로그램을 개발하여 사용하고 있으며, 규칙에 기반을 둔 전산 구조설계가 정확하고 짧은 기간에 가능하도록 지원하고 있다.

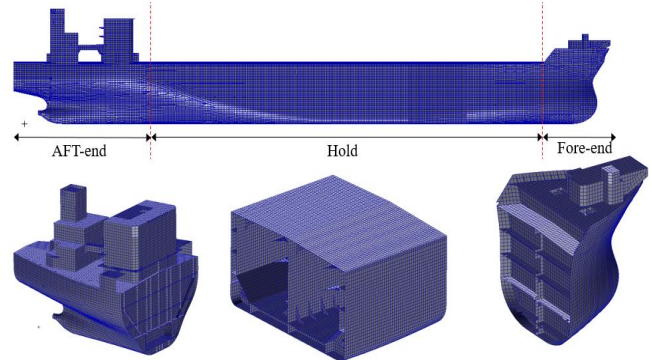


Fig. 1. Definition of main structural category in the tanker.

### 2.2 선미부 구조설계

선급에서 규정하고 있는 부재의 최소 두께, 배치 폭, 보강재의 최소 요구 단면계수를 이용하여, 적절한 부재 배치를 하여 선각 중량의 최적화를 수행하는 게 일반적인 화물창설계의 진행 방식이다. 그러나, 선미부는 메인 엔진과 주요 장비들의 배치, 선미 선형의 특이성으로 인하여 표준화된 구조설계 적용이 어려운 구역이다.

## 3. 유한요소해석 및 고찰

### 3.1 모델링 및 경계, 하중 조건

본 연구에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 근간으로 하여 공학용 해석이 가능한 상용프로그램인 MSC Patran/Nastran Version. 2012를 이용하였다. 판 부재의 모델링은 4노드를 갖는 2차원 쉘 요소와 보강재는 2노드 1차원 빔 요소를 적용하였다. 압축 하중에 대해 좌굴 거동이 정확하게 구현하게 하려고, 요소의 분할 크기는 20mm에서 40mm 범위에서 조절하였다. 해석에 사용된 유한요소의 개수는 225,521개, 노드는 518,698개로 구성되어 있다. 좌굴평가 구역은 압축 하중에 의한 좌굴 변형 현상을 구현하기 위하여 쉘 요소로만 모델링하였다. Fig. 2와 같이 해석의 경계조건은 4번 화물창과 slop tank 경계지점의 격벽(Bulkhead) 평면을 고정지지(x, y and z : fix) 조건을 적용하였다. 사용된 하중은 CSR에서 계산되는 휨 모멘트 두 가지(Hogging and Sagging)와 설계 흡수 압력이며, 휨 모멘트는 구조 부재의 강성이 확보되는 구간에서 적용해야 한다. 만약 가장 약한 구조 강성을 갖는 선미 끝단에서 하중을 작용하면, 연속거동이 나타나지 않고, 국부적인 응력 집중만 발생하는 현상이 나타난다. 선미부에는 별도의 내부에 밸러스트 탱크를 포함하지 않기 때문에, 내압은 고려하지 않는다.

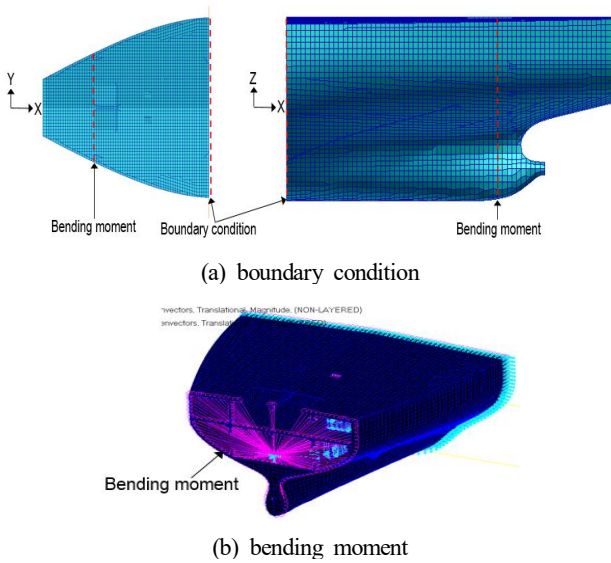
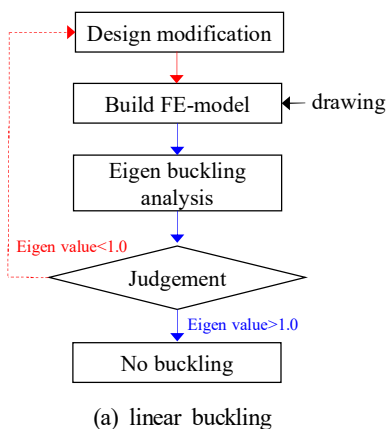


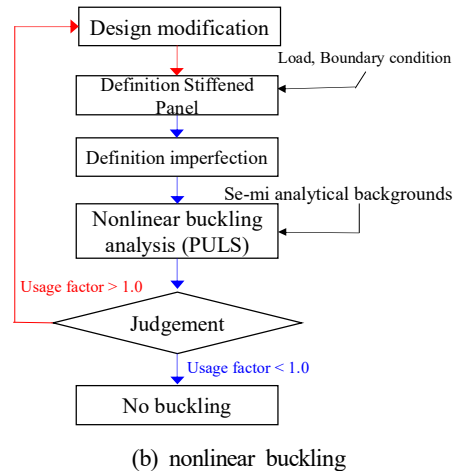
Fig. 2. Boundary and vertical bending moment.

### 3.2 좌굴평가 프로세스

좌굴 손상에 대한 발생 원인과 보강 방안을 도출하기 위해서 수치 해석적 방법을 이용하였다. 해석의 종류는 선형 좌굴해석과 비선형 좌굴해석이며, Fig. 3과 같은 순서로 진행되었다. 선형좌굴해석은 사용된 하중에 대한 구조의 좌굴 응답을 계수화하여 임계 좌굴하중을 계산할 수 있다. 이때 주요 결과로서는 모드 별 좌굴 형상과 응력분포이다. 선형 좌굴해석에서는 기하학적 비선형을 고려할 수 있도록 대변형 계산이 가능한 나스트란(Nastran) 105 솔버를 사용하였고, 비선형 최종강도 해석은 재료의 비선형까지를 추가 설정하고, 탄성 완전 소성 거동(Elastic perfectly plastic)특성 모델을 이용하여 탄소성 좌굴 및 최종강도 거동을 묘사하였다.



(a) linear buckling



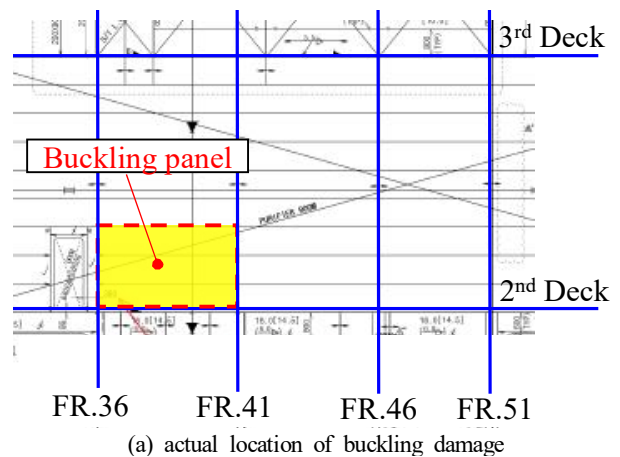
(b) nonlinear buckling

Fig. 3. Analysis flowchart of between linear and nonlinear buckling analysis.

비선형 좌굴해석에서는 선형좌굴해석에 사용한 모델을 그대로 사용하고, 실제 구조물의 제작 혹은 사용 중 발생하는 초기 처짐의 영향을 고려하기 위하여, 좌굴 발생 확률이 가장 높은 모드에서 초기 처짐의 크기를 변수로 하여 검토하였다.

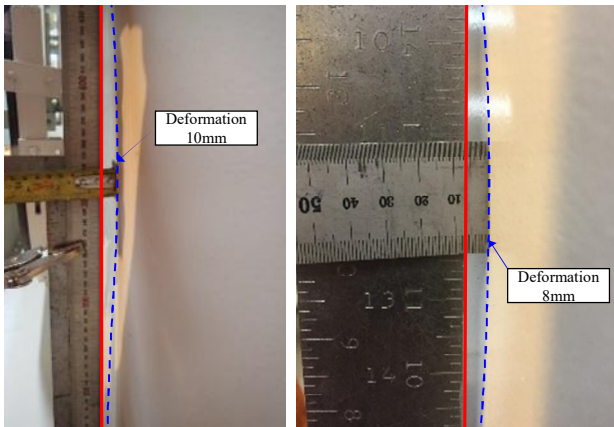
### 3.3 평가 패널 및 선미부 강도해석

선박의 운항하는 과정에서 발생하는 다양한 외력 및 내력에 충분히 안전한 설계를 하기 위해서, 선급 규칙에서는 복잡한 하중조합을 제시하고 있으나, 국부적인 좌굴 손상, 용접부 크랙 같은 손상 사례는 지속해서 보고되고 있다. 연구에서는 선미부의 웨브 패널에서 발생한 좌굴 손상 위치와 손상 형상을 Fig. 4에 나타내고 있으며, 발생 원인을 수치해석적으로 분석하고자 한다. 패널의 길이는 4,000mm이고, 폭은 815mm, 판 두께는 10mm이고 좌굴이 발생한 패널은 종방향 보강재 3개를 포함하고 있다.



(a) actual location of buckling damage

수치해석 모델링을 이용한 유조선 선미부 구조에 발생한 좌굴 발생 원인 검토



(b) buckling deformation

Fig. 4. Example of the buckling damage at the panel around AFT-end.

보강재는 앵글바이크 웨브 높이 150mm, 플랜지 폭 90mm, 두께는 9mm이고, 모든 강재는 저 탄소강(mild steel)이다. FR. 36과 41번 사이의 패널만 좌굴이 발생한 배치상의 특징을 보자면, FR. 36 왼편에 대형 개구부가 있어서 폭 방향의 압축 하중이 작용 시 상대적으로 좌굴 강성이 취약할 수 있다. 2<sup>nd</sup> deck 하부는 공간이 협소하고 선형의 변화가 있는 구역 이라서, 종/횡 부재를 상대적으로 두꺼운 두께가 설계되어 있다. 앞서 언급한 하중조합 중에 휨 모멘트는 호킹 조건에서 가장 큰 압축응력을 발생하였고, 이 조건을 고려한 경우의 본 미세스 응력(von-Mises stress)을 Fig. 5에 나타내고 있다. 좌굴에 의한 손상이 발생한 패널의 FR. 36부터 41까지의 응력분포를 Fig. 6에 나타내고 있다. 본 미세스 응력만으로 평가하자면 허용응력(199MPa)을 만족한다. 허용응력은 저탄소강의 항복강도(235MPa)에 안전계수(0.85)를 곱한 값이다. 선미부 전체 구조의 강도해석을 통하여, 항복강도 관점에서의 구조 안전성은 확인이 되었다.

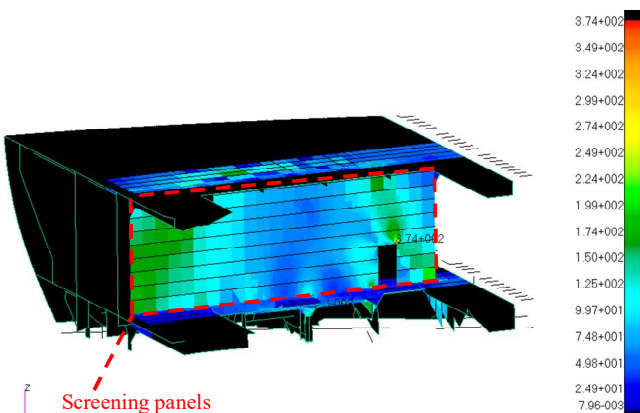


Fig. 5. Screening stress contour at the critical buckling panels in the AFT-end structure.

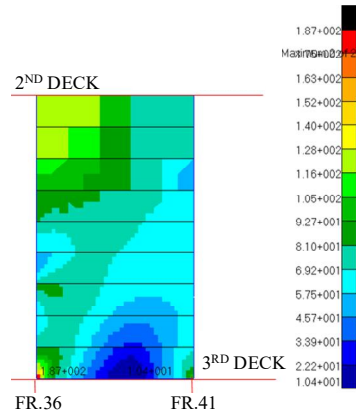
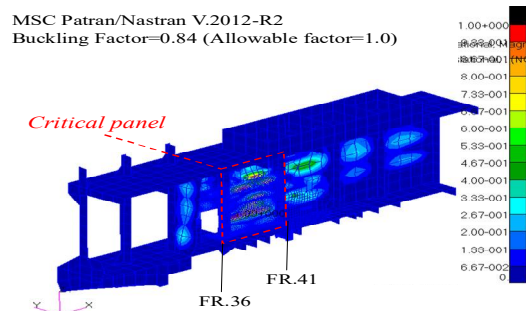
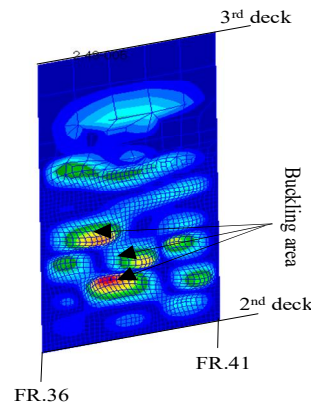


Fig. 6. Screening stress contour at the critical buckling panels in the AFT-end structure.

좌굴이 발생한 패널 주변으로 요소를 세분화한 후, 선형 좌굴해석을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내고 있다. 좌굴 형상은 패널의 폭 방향으로 압축 하중이 작용하여 보강재와 보강재 사이의 판에서 좌굴이 발생하였다. 좌굴이 발생 가능한 위치는 실제 현상과도 유사하다. 좌굴 계수는 0.84로 허용기준인 1.00보다 작으므로 고려한 하중에 의해서 좌굴은 발생하지 않는다.



(a) buckled shape at the global model



(b) buckled shape at the local panel model

Fig. 7. Results of the buckling factor as well as buckled shape around the critical panel.



CSR(common structure rule)에 의한 패널의 좌굴 강도 계산 시, 하중 조건별 정해진 안전계수를 고려한 평가를 하고 있으나, 선박의 블록 건조 시 용접이나 절단 등에 의한 판의 초기 처짐의 영향은 고려하지 않는다. 특히, 판 두께가 얇은 판에서는 열 하중에 의한 초기변형과 잔류응력으로 인하여 실제의 좌굴 강도와 최종강도는 낮아질 가능성이 크다(Paik and Thayamballi, 2003).

강선을 구성하는 탄소강 재질은 용접 때문에 조립 및 탑재의 생산공정을 거치면서 최소한의 초기변형이 잔류하게 된다. 보강판에서 허용할 수 있는 초기 처짐(IACS, 2012)은 4mm이며, 대부분의 생산 야드에서 채택하고 있다. 만약, 선미부 얇은 패널에 허용할 수 있는 최댓값인 4mm의 초기 처짐이 있었다고 가정하였을 때의 좌굴 계수 변화를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Summary of buckling factor varying magnitude of the imperfection calculated by MSC Nastran

IMP.	B.F	A.F	Remarks
0.0 mm	0.84	1.00	Ok
4.0 mm	1.16		Not ok
4.0 mm	0.84		2 EA carling reinforcement

Where, IMP. is imperfection, B.F is buckling factor and A.F is allowable factor about buckling strength

초기 처짐 4mm를 가정하면, 좌굴 계수는 허용기준을 16% 크게 평가되어, 보강이 필요한 수준이다. 중량을 최소화하면서 수직 하중 분담률을 높이는 칼링 보강재(Carling stiffener)를 2줄을 보강재 4개 구간에 보강하였다. 보강 결과는 초기 처짐 4mm를 고려하더라도 초기 설계 조건인 16%의 여유를 확보하였으며, 해석적으로 검토한 결과를 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 보강 효과 때문에, 좌굴 영역은 국부적으로 영역이 줄어들었고, 발생 가능성도 낮았다.

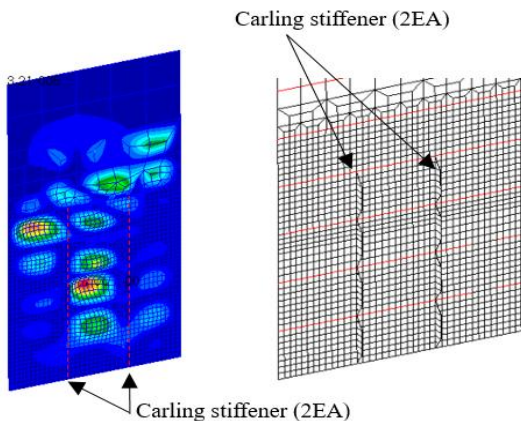


Fig. 8. Results of buckling shape with carling reinforcement by FEA.

PULS(Panel Ultimate Limit State)는 판의 4차 미분방정식을 근간으로 하는 적합 조건식을 사용하여, 좌굴 강도와 최종 강도를 쉽게 계산할 수 있는 전산 좌굴 프로그램이다. 특히, 용접 작업에 의해 필연적으로 발생하게 되는 초기 처짐을 고려한 좌굴 강도평가가 가능하며, 다양한 하중조합 효과를 빠른 시간 내 평가가 가능하다. 좌굴 발생 가능성이 있는 3개의 보강재와 판으로 구성하였고, 길이 방향으로 4,000mm를 갖는 패널이다. 초기 처짐을 고려하지 않는 경우, 좌굴 계수는 0.8이며, Fig. 9와 같은 좌굴 변형 형상을 나타낸다.

Buckling Factor=0.8 (Allowable factor=1.0)  
Stiffened plate buckling code  
No imperfection

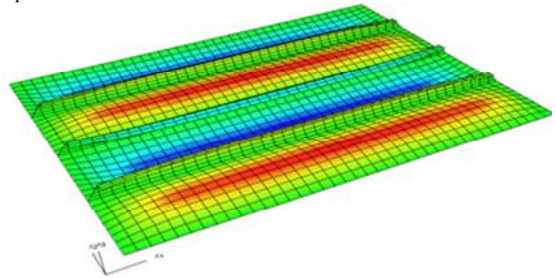


Fig. 9. Results of the buckling shape of the initial panel by DNV PULS (DET NORSKE VERITAS, 2006).

초기 처짐을 4mm를 고려한 결과는 1.03이며, 허용기준에 3% 크게 평가되며, 좌굴 모드를 Fig. 10에 나타내고 있다. 같은 보강을 적용할 경우, 초기 처짐 양을 5.5mm 수준까지 고려하더라도 좌굴 강도는 만족하며 조건에 따른 좌굴 계수 변화를 Table 3과 Fig. 11에 도시하였다.

Buckling Factor=1.03 (Allowable factor=1.0)  
Stiffened plate buckling code  
Imperfection : 4.0mm

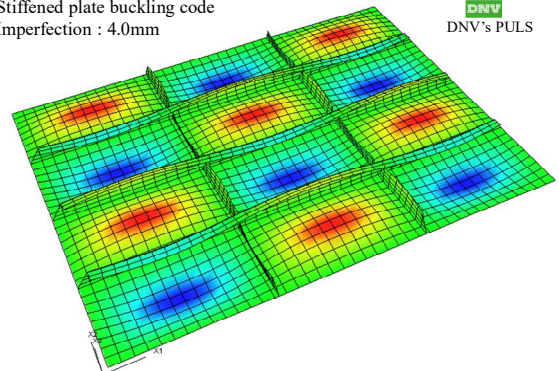


Fig. 10. Results of the buckling shape with carling reinforcement by DNV PULS (DET NORSKE VERITAS, 2006).

## 수치해석 모델링을 이용한 유조선 선미부 구조에 발생한 좌굴 발생 원인 검토

선형기반의 좌굴 계수 평가법에 비교하여, 한계상태설계법 기반의 결과가 초기 처짐이 증가할수록 보수적인 결과를 예측하였지만, 그 차이가 크지 않았다. PULS는 해석 모델링 기반 평가 프로그램이 아니라서, 좌굴 및 최종강도, 그리고 최적의 보강 효과를 산출하는 데 장점이 있어서 상황에 맞게 적용하면 빠른 의사 결정이 될 것으로 생각한다.

Table 3. Summary of buckling factor varying magnitude of the imperfection calculated by DNV PULS

IMP.	B.F	A.F	Remarks
0.0 mm	0.80	1.00	Ok
3.5 mm	1.00		Not ok
4.0 mm	1.03		Not ok
5.5 mm	0.84		2 EA carling reinforcement

Where, IMP. is imperfection, B.F is buckling factor and A.F is allowable factor about buckling strength

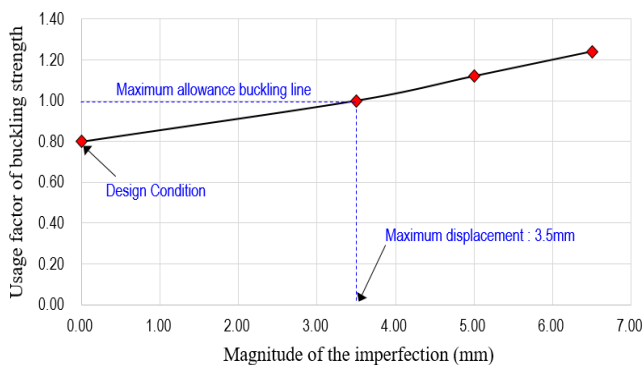


Fig. 11. A comparison of the usage factor of buckling strength varying magnitude of the imperfection at the critical panel.

### 4. 결론 및 향후 연구과제

구조설계 기준 및 평가방법의 전문화를 통한 통합 절차가 확대되면서, 국제공통규칙(CSR, Common Structural Rule)이 개발되고 적용해오고 있다. 그러나, 중강도 하중이 크게 작용하는 화물창 구역에만 국한하여 세부규정이 제시되어 있고, 선수와 선미부 구조에는 별다른 평가 지침이 없다. 언급한 구역의 구조설계는 조선사의 설계 경험에 의존하여 진행하고 있으며, 선급에서도 명확한 기준이 없어서 구조 손상 문제가 발생하더라도 근본적인 원인을 파악하기가 힘들다. 본 연구에서는 선미부에 주로 발생하고 있는 좌굴 손상의 대표적인 사례에 대한 근본적인 원인을 파악하기 위한 엔지니어링 기반의 해법을 제시하였다. 유한요소해석 모델링 기반

구조 강도 검증을 위하여, 하중 조건, 경계조건, 모델링 방법 그리고 평가 기준에 대한 합리적인 해법을 제시하였다. 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 패널의 좌굴 강도평가 시, 허용기준을 만족하였더라도 하더라도 운항 중 선박에서는 좌굴이 발생하는 사례가 있을 수 있다. 이러한 손상을 유발할 가능성 있는 요인으로서 생산 작업에서 유발되는 초기 처짐이 있다.
- [2] 초기 처짐의 크기가 커질수록 좌굴 계수를 높게 평가하게 하여, 안전도를 감소시킨다.
- [3] 유한요소해석 시 선미부의 구조의 특성상, 경계조건과 하중작용 위치 결정 시, 격벽을 갖는 위치에서 신중하게 결정해야 한다. 이는 선미부가 휨 모멘트를 받았을 때 연속거동을 구현하는 중요한 문제이다.
- [4] 해석 모델링 기반 유한요소해석과 한계상태설계 기반 PULS의 응답 패턴은 유사하였으나, PULS의 결과가 좀 더 보수적인 경향을 나타낸다.

향후 연구과제로서는 다양한 부재의 형상, 위치, 하중 패턴에 따른 해석 기반 데이터베이스를 구축하여, 엔지니어가 쉽게 판단할 수 있는 기준이 필요하다. 기준에는 보강하는 부재의 효과에 대한 영향을 포함해야 한다. 본 연구에서는 기초적인 좌굴 손상의 원인 검토 및 관련 엔지니어링 절차에 대해서 제안하였다.

### 사 사

This research was supported by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2022RIS-002).

This research was also supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (NRF-2022R111A3068558).

### References

- [1] Akbari Alashti, R. and S. A. Ahmadi(2014), Buckling Analysis of Panels and Comparative Study on ABS and DNV Rules, International Journal of Maritime Technology, Vol. 2, pp. 67-74.
- [2] Cho, S. R. and I. C. Song(2003), Experimental Investigation on the Ultimate and Post-Ultimate Strength of Stiffened Plates under Axial Compression, Journal of Ship and Ocean

- Technology, Vol. 7, Issue 1, pp. 1-12.
- [3] DET NORSKE VERITAS(2006), Nauticus Hull User Manual-Puls, Sec.3-Stiffened Plate Element, pp. 23-41.
- [4] IACS(2012), Shipbuilding and Remedial Quality Standard for New Construction, No.47 Ship Building and Repair Quality Standard, pp. 6-14.
- [5] Jang, B. S. and H. Y. Cho(2009), Comparison of Buckling Check Formulas and Optimal Design, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 23, No. 5, pp. 71-78.
- [6] MSC Software(2012), Patran 2012 User's Guide, Chapter 6-, Material modeling, pp. 125-136.
- [7] Oh, Y. C., J. Y. Ko and K. W. Lee(2007), A Study on the Buckling and Ultimate Strength for Cylindrically Curved Plate subjected to Combined Load, Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research, pp. 25-26.
- [8] Paik, J. K. and A. K. Thayamballi(2003), Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures, JOHN WILEY & SONS, LTD, England.
- [9] Park, J. S., J. Y. Ko and Y. C. Oh(2007), Estimation of Buckling and Plastic Behaviour according to the Analysis Model of the Stiffened Plate, Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 31, No. 3, pp. 271-279.
- [10] Radwan, M. and B. Kövesdi(2021), Equivalent Geometric Imperfections for Local Buckling of Slender Box-section Columns, Periodica Polytechnical Civil Engineering, Vol. 65, pp. 1279-1287.

---

Received : 2022. 11. 04.

Revised : 2022. 12. 05.

Accepted : 2022. 12. 28.