



15,000TEU 컨테이너선의 스칼럽 반지름 확대에 따른 선체 구조 안전성 평가

이정우¹·이재승¹·주한백^{2,†}

울산대학교 조선해양공학부¹

울산대학교 미래모빌리티공학부²

Structural Safety Assessment of a 15,000TEU Container Ship Considering an Increased Scallop Radius

Jeong-Woo Lee¹·Jae-Seung Lee¹·Han-Baek Ju^{2,†}

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan¹

School of Mobility Engineering, University of Ulsan²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The hull structure is assembled by welding plates and stiffeners, and welding efficiency plays a critical role in ship production. Scallops are widely incorporated into hull structures to enhance welding efficiency; however, the resulting reductions in cross-sectional area and section modulus must not compromise structural integrity. In this study, a finite element structural analysis model based on the midship section of a container vessel was developed to quantitatively evaluate the structural response as a function of scallop radius. Eight load cases were analyzed with particular emphasis on stress concentration phenomena at scallop regions. At the scallop edge, both shear stress and von Mises stress exhibited a consistent increasing trend with increasing scallop radius; nevertheless, all stress values remained within the allowable design limits, even at a scallop radius of 250mm. Stress distributions were additionally examined at the girder and inner bottom, where scallops introduce geometric discontinuities. A transition in the dominant stress concentration mode was identified at a specific scallop radius threshold. The local stresses in both the girder and inner bottom were found to satisfy the prescribed design criteria, suggesting that the current conservative scallop radius design standards may have room for relaxation.

Keywords : Scallop(스칼럽), Structural safety assessment(구조 안전성 평가), Finite Element Method(FEM, 유한요소해석), Stress concentration(응력 집중)

1. 서론

선박 및 해양구조물은 수많은 보강재(stiffener)와 판재가 결합되는 복잡한 용접 구조물로, 설계 단계에서 구조적 안전성뿐만 아니라 용접 토치의 접근성 및 생산 편의성을 반드시 고려해야 한다(Kim et al., 2020). 특히 컨테이너선의 중앙부(midship section)는 횡수밀격벽(watertight transverse bulkhead) 사이의 횡웨브(web section)와 수많은 종보강재가 교차하는 격자형 구조로 이루어져 있어 작업 공간이 매우 제한적이다. Fig. 1과 같이 수직 용접부에 적용되는 스칼럽(scallop)은 용접 작업을 편리하게 해주며, 용접선이 한 점에 집중되는 것을 방지하여 삼축 응력

(triaxial stress) 상태를 완화하고 취성 파괴 위험을 낮추는 역할을 수행한다.

그러나 스칼럽은 필연적으로 부재의 유효 단면적 및 단면계수를 감소시키고, 형상 불연속부에 따른 국부적인 응력 집중(stress concentration)을 유발한다(Shin, 2006). 이는 선체 전체의 강도 저하뿐만 아니라, 반복적인 파랑 하중에 노출되는 선박의 특성상 피로 균열(fatigue cracking)의 주요 기점으로 작용할 위험이 있다. 스칼럽 주변의 용접 단부에서 시작된 미세 균열이 주 구조물로 전파될 경우 선체의 치명적인 손상으로 이어질 수 있어, 현행 선급 규칙(CSR 등) 및 조선소 설계 표준에서는 스칼럽의 크기를 제한하고 있다(Det Norske Veritas (DNV), 2016). DNV 선급에서

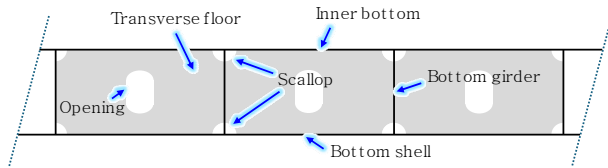


Fig. 1 Application of scallop at double bottom

Table 1 Selection of scallop radius in shipbuilding industry

Web depth (D)	Scallop radius (R)	Remark
$D < 200$	No scallop	—
$200 \leq D < 300$	50mm	$R \leq D/4$
$300 \leq D < 500$	75mm	$R \leq D/4$
$500 \leq D < 650$	100mm	$R \leq D/4$
$650 < D$	125mm	$R \leq D/4$

는 스칼럽을 포함한 개구부(openings)에 의한 단면계수(section modulus) 감소율을 약 3% 이내로 제한하며, 이에 따라 스칼럽의 최대 반지름은 웹(web)의 깊이에 따라 75~100mm 내외로 제한해왔다(DNV, 2016).

Table 1과 같이, 현업에서는 이중 선체(double hull structure) 내부와 같이 닫힌 구조물(closed structure)이 아닌 기타 열린 구조물(open structure)에 대해서는 스칼럽의 반지름을 웹 깊이의 1/4로 제한하고 있다. 또한 특정 웹 깊이 이상에서는 최대 스칼럽 반지름을 125mm로 제한하고 있다. 이는 경험적으로 적용되는 값이며, 실험적 및 해석적인 방법을 활용하여 스칼럽 반지름 적용 기준에 대한 명확한 기준 정립이 필요하다.

최근 조선 산업에서 가속화되고 있는 로봇 용접 및 자동화 공정은 기존의 수동 용접보다 훨씬 넓은 작업 공간과 정밀한 접근성을 요구하고 있다(Choi et al., 2025). 로봇 용접 시스템의 경우, 75mm 이하의 협소한 스칼럽 환경에서는 로봇 팔(arm)이나 센서 뭉치가 인접 부재와 간섭(collisions)을 일으켜 용접 궤적(trajecory) 확보가 불가능한 경우가 빈번하다(Jeong et al., 2025).

이에 따라 스칼럽 반지름을 확대 적용함에 따른 구조적 안전성 재검토 연구가 필요한 시점이다. 과거 스칼럽에 관한 선행 연구에서는 용접 용입 깊이와 스칼럽 형상이 구조물의 피로 내구성 및 응력 특성에 미치는 영향을 분석함으로써, 스칼럽의 기하학적 형상이 피로 강도를 결정하는 핵심 변수임을 규명하였다(Kang et al., 2015). 또한, 선박 구조물에서 발생하는 용접 결함을 최소화하기 위해 웹 플레이트의 그루브를 연장하여 스칼럽 자체를 제거하고, 이를 보충하기 위한 웨지형 세라믹 백킹재(CBM)를 개발하여 구조적 불연속성을 개선하는 방안이 제시되기도 하였다(Kang et al., 2015). 이러한 기존 연구들은 주로 스칼럽에 의한 노치 효과 완화 및 결함 방지에 집중되어 왔으나, 최근 조선 산업의 공정 자동화 추세에 대응하기 위한 대형 스칼럽 설계와 그에 따른 안전성 검토 연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 유한요소해석(FEA)을 통해 스칼럽 반지름 확대가 컨테이너선 선체 구조의 응력 분포에 미치는 영향을 정량적으

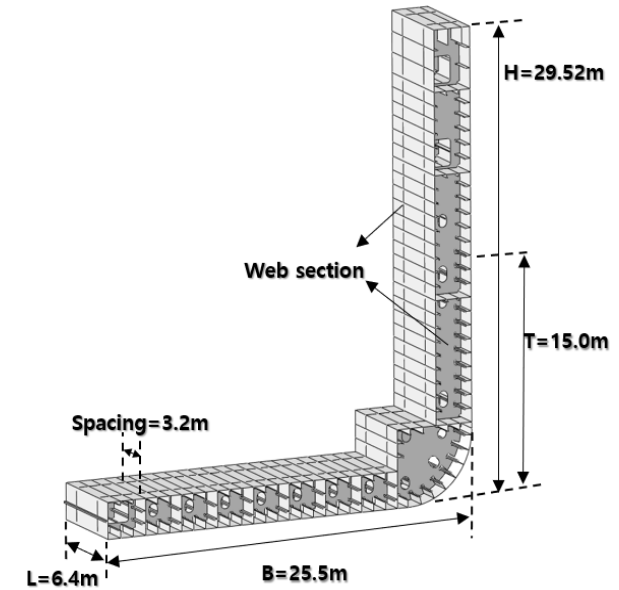


Fig. 2 3D 모델 형상과 치수

Table 2 Principal dimensions of model

Category	Item	Value
General	Draft (T)	15.0m
	Height (H)	29.52m
	Length (L)	6.4m
	Half breadth (B/2)	25.5m
Spacing	Web section	3,200mm
	Bottom girder	2,520mm
	Longitudinal(bottom)	840mm
	Longitudinal(side)	864mm
	Outer to inner(bottom)	2,300mm
	Outer to inner(side)	2,500mm

로 분석하고자 한다. 이를 통해 생산 자동화를 위한 시공성 향상과 선체 구조의 안전성을 동시에 만족할 수 있도록 scallop radius 확대 적용이 구조적 관점에서 문제가 없는지 초기에 검토하는 것에 목적이 있다.

2장에서는 스칼럽을 적용한 구조 해석 모델에 대한 상세 설명이 이루어지며, 3장에서는 변위 및 응력 관점에서 구조 해석 결과에 대한 분석이 기술된다. 4장에서는 스칼럽 반지름 선택 시 참고할 수 있는 내용들을 요약하여 기술한다.

2. 스칼럽을 고려한 구조 해석 모델

2.1 해석 모델 개요

본 연구에서는 15,000TEU급 컨테이너선 중앙부를 유한요소 모델링 범위로 선정하였다. 경계 효과(boundary effect)를 최소화하기 위해, Fig. 2와 같이, 모델의 길이는 횡웹 간격(web

section spacing, 3,200mm)의 2배인 6,400mm로 설정하여 총 2개의 횡웨브가 포함되도록 구성하였다. 폭은 선박의 반폭 길이로 25.5m, 높이(height)는 선저(bottom plating)부터 상갑판(upper deck plating)까지 29.52m, 흘수(draft)는 15.0m로 설정하여 상세 모델링을 진행하였다.

선박의 주요 제원 및 선체 중앙부의 구조 부재들에 대한 상세 정보는 Table 2와 같다. 해석에는 고장력강인 AH32 강재가 모든 구조 부재들에 동일하게 적용되었으며, 탄성계수(young's modulus) 209,000MPa, 포아송비(poisson's ratio) 0.3, 밀도 7.85×10^{-9} ton/mm³를 입력하여 등방성 탄성 거동을 모사하였다. 해석은 상용 프로그램 Abaqus version 2025를 활용하였으며, 셸 요소(shell element)중 S4(4절점 shell요소) type을 적용하였다. 이를 기반으로 평면 응력 상태(plane stress condition)를 구성하였으며, 본 연구의 핵심인 스캘럽을 포함하여 횡웨브에 존재하는 다양한 개구부들도 상세히 모델링 하였다.

2.2 스캘럽 및 종보강재 슬롯 모델링

본 연구에서는 선저부에 있는 종보강재의 단면 형상에 따라 각각 다른 치수의 longitudinal slot을 적용하였다. Fig. 3과 같이, flat bar 타입은 $R = 35\text{mm}$, $B_1 = 50\text{mm}$, angle bar 타입은 $R = 35\text{mm}$, $B_1 = 35\text{mm}$ 를 적용하였고, T-bar 타입의 경우 $B_1 = 50\text{mm}$ 의 정밀한 슬롯 형상을 모델링에 반영하였다.

본 연구의 목적에 따라 스캘럽 반지름 크기가 전단 응력 및 구조 안전성에 미치는 영향을 평가하기 위해, 모델에 적용한 스캘럽 크기를 다양하게 조절하였다. 반지름의 크기는 50mm부터,

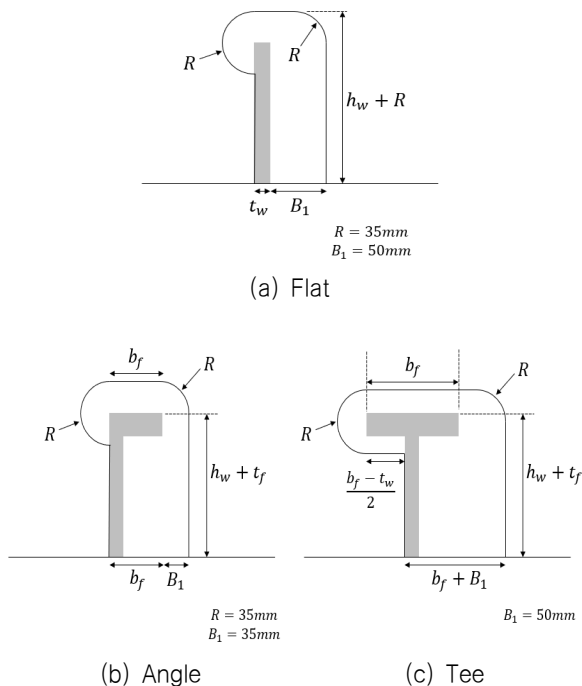


Fig. 3 Detailed dimensions of longitudinal slot

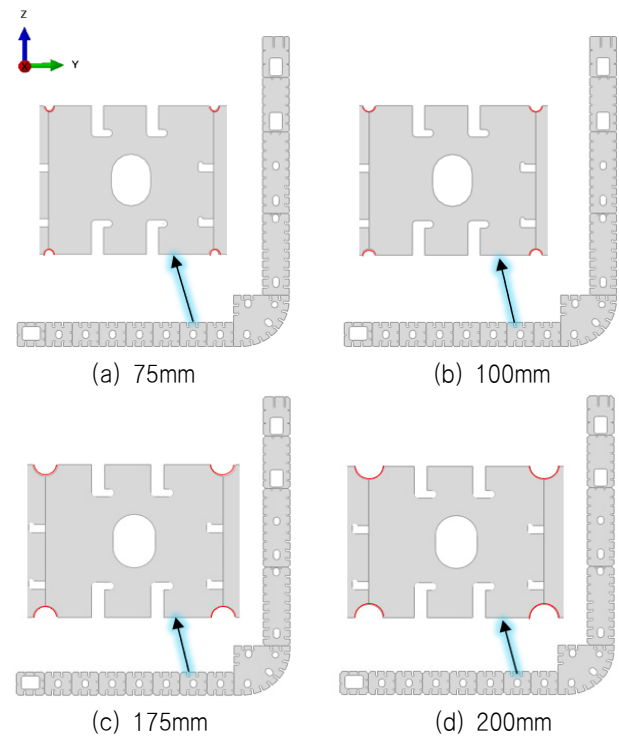


Fig. 4 Sizes of scallop radius

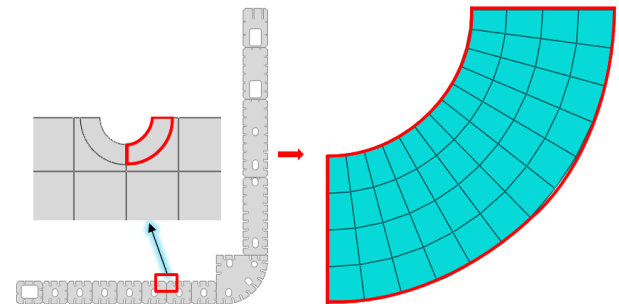


Fig. 5 Detailed partition sketch for formation of mesh

75mm, 100mm, 125mm, 150mm, 175mm, 200mm, 250mm까지 총 8가지 case의 모델을 생성하여 해석을 수행하였으며, Fig. 4는 8가지 모델 중 75mm, 100mm, 175mm, 200mm 총 4가지의 스캘럽 반지름에 따라 생성된 구조 해석 모델을 나타낸다.

2.3 하중 및 경계 조건

격자 수렴성 테스트(mesh convergence test)를 통해 격자 크기 14mm 이하에서 구조 해석 결과가 수렴하는 것이 확인되었다. 격자 수렴성 테스트에는 Fig. 6, 7 및 8에 제시된 본 해석과 동일한 하중 및 경계조건을 적용하였다. 이를 기반으로 해석에 가장 얇은 판의 두께에 해당되는 t by t(12.5mm × 12.5mm) 크기의 격자를 적용하였다. Fig. 5와 같이, 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해, 격자의 종횡비(aspect ratio)를 최대한 1에 가깝게 하였다. 또한 응력 추출 지점인 스캘럽 부근에는 partition 기능을 활용하여 곡면에서의 격자 완성도를 높였다.

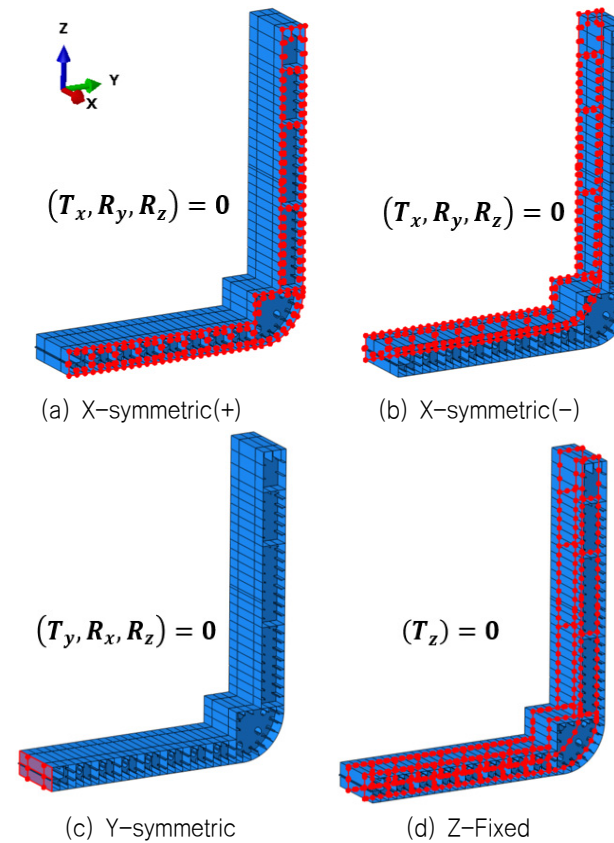


Fig. 6 Boundary conditions

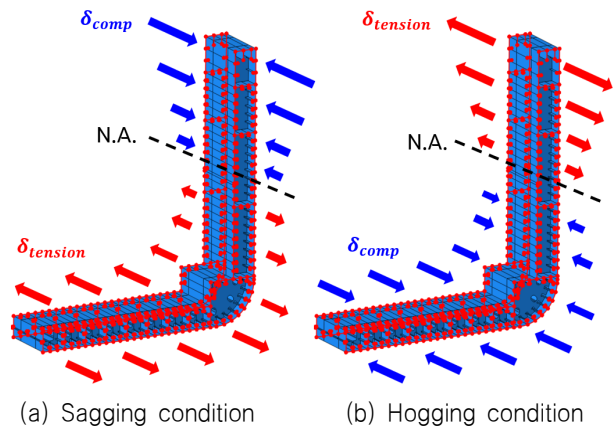


Fig. 7 Application of hull girder bending moment

구조 해석 모델에 적용된 경계 조건들은 Fig. 6과 같다. 모델의 대칭성을 고려하여 선박의 길이(longitudinal) 방향 $+x$, $-x$ 와 선박의 transverse 방향인 y 축 방향에 대칭 조건(symmetric B.C.)을 적용하였고, 변형이 거의 발생하지 않는 횡웨브와 내/외판 교차 지점에는 Z 축 고정 조건(Z -fixed B.C.)을 설정하였다. 이때, 모델링의 간략화를 위해 컨테이너선에 배치되는 서포트 횡격벽(support bulkhead)의 영향은 해석에서 고려되지 않았다.

또한, Fig. 7과 같이, 파랑 하중에 의한 선체 거동을 모사하기 위해 선체 종굽힘 모멘트(HGBM)로 인해 발생하는 호깅(hogging)과 새깅(sagging) 상태를 변위 경계 조건으로 고려하였

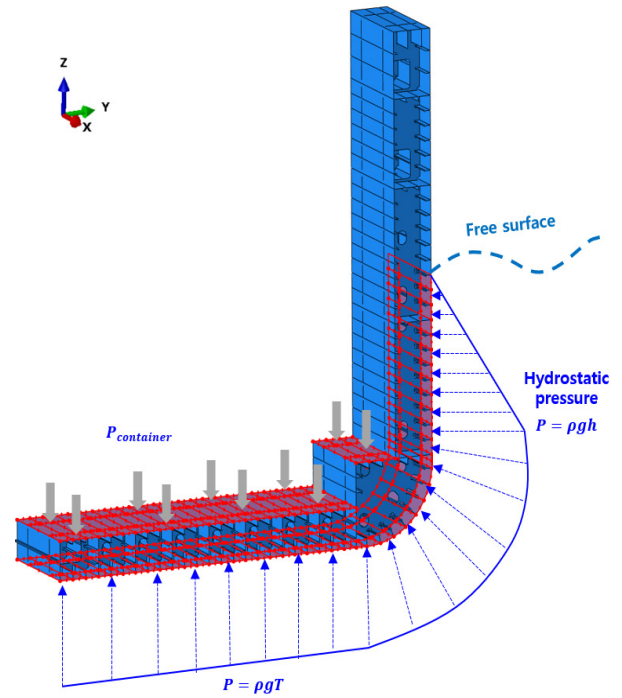


Fig. 8 Load conditions

다. 일반적으로 선박의 국부 구조 해석 시에는 전선 모델을 활용한 전선 해석(global analysis) 결과를 국부 모델의 경계면에 매핑(mapping)하는 방식을 사용한다. 하지만 본 연구에서는 전선 모델을 활용한 전선 해석까지 수행하기에는 한계가 있어 직접적인 강제 변위 제어 방식을 채택하였다. 선체의 종강도에 대한 허용 응력을 바탕으로 보수적인 최대 변위를 산출($\pm 5.67\text{mm}$)하였으며, 이를 모델 양단에 적용할 때, 중립축(neutral axis)을 기점으로 변위량이 선형적으로 변하는 분포를 갖도록 최대 $\pm 2.835\text{mm}$ 의 강제 압축 및 인장 변위를 결정하였다.

HGBM에 대응되는 변위 계산 식

$$\delta = \pm l \cdot \frac{\sigma_{allow}}{E} \quad (1)$$

여기서 δ 는 선체 종굽힘 모멘트에 의해 발생하는 최대 변위, l 은 국부 모델의 Longitudinal 방향의 길이, E 는 탄성 계수, 그리고 σ_{allow} 은 선체 종굽힘 모멘트에 대한 최대 허용 응력을 의미한다.

선박의 운항 조건은 크게 만재 상태(laden condition)와 밸러스트 상태(ballast condition)로 분류되며, 이에 따라 선체에 작용하는 하중의 형태가 변화한다. 본 연구에서는 보수적인 구조 해석을 위해 만재 상태를 하중 조건으로 선정하였다. Fig. 8과 같이, 첫째, 외판에는 해수에 의한 정수압(hydrostatic pressure)을 수심 깊이에 비례($P = \rho gh$)하도록 외측 선체에 수직 방향으로 부여하였다. 둘째, 이중저 구조에는 KR선급에서 규정하는 20ft 컨테이너 화물에 의한 적재 하중(cargo load)을 부과하였다(Korean Register (KR), 2024). 컨테이너선의 화물창 내부에는

컨테이너 코너를 지지하기 위한 소켓 및 스튜가 존재하며, 이로 인해 컨테이너의 하중은 네 모서리에서 상대적으로 높게 발생된다. 다만 해석의 간략화를 위하여 컨테이너 하중은 균일 분포 하중으로 선정하였다. 내부선저와 Step type 코너 구조에 동일한 중량이 작용한다는 가정하에 설계 적재량을 계산하고 이를 압력으로 변환하여 이중저 바닥 면에 균일하게 입력하였다(KR, 2024).

20ft Container에 의한 하중 계산 식

$$n_{container} = \frac{V_{tank}}{V_{20ft}} \quad (2)$$

$$M_{container} = 2.5 \times n_{container} \quad (3)$$

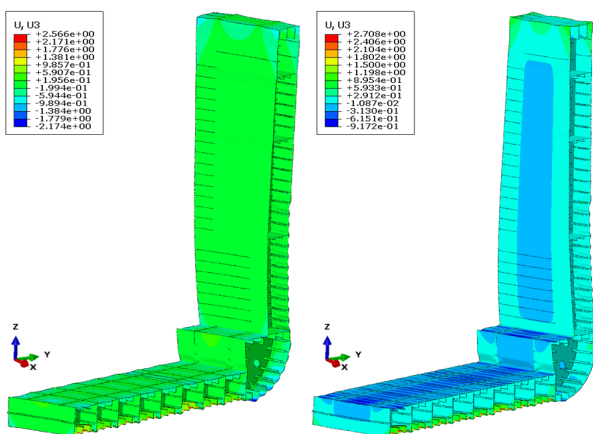
$$F_{container} = M_{container} \times g(N) \quad (4)$$

$$\therefore P_{container} = \frac{F_{container}}{A_{inner bottom}} (Pa) \quad (5)$$

이때, $n_{container}$ 는 컨테이너의 개수로써, 20ft 컨테이너가 들어갈 수 있는 전체 화물창 부피 V_{tank} 를 20ft 컨테이너 부피 V_{20ft} 로 나누어 그 값을 구한다. 컨테이너 한 개 당 무게는 2.5 톤으로 하여 전체 컨테이너의 개수를 곱해주면 전체 컨테이너에 대한 질량 $M_{container}$ 을 구할 수 있다. $F_{container}$ 는 전체 컨테이너에 의해 발생하는 힘(N), $P_{container}$ 는 전체 컨테이너의 힘을 내부 선저의 면적으로 나눈 컨테이너의 하중(Pa)을 의미한다.

3. 스칼럽 반지름에 따른 구조 해석 결과

3.1 선체 변위 분포



(a) Hogging condition (b) Sagging condition
Fig. 9 Global deformation of hull girder bending moment

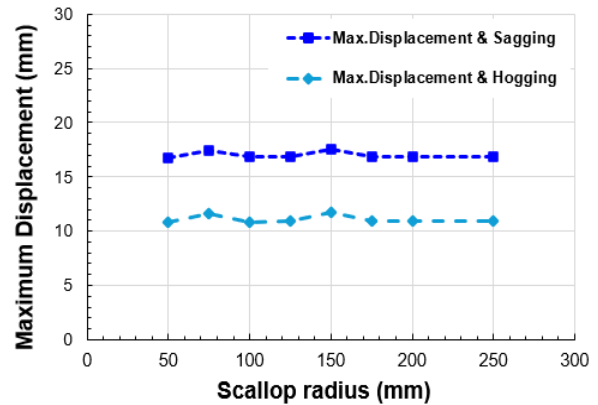


Fig. 10 Results of maximum displacement

8가지 스칼럽 반지름($R=50\sim 250\text{mm}$)을 적용한 해석 모델에 대하여 만재 상태의 하중을 부과한 후 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9는 Scale factor 150을 적용한 스칼럽 반지름 100mm 모델에 대한 호깅 상태와 새깅 상태일 때의 변위 결과 그림이다. 해석이 적절히 이루어졌는지 판단하기 위해 전체 변위 결과를 확인하였다. 정수압 및 컨테이너 하중에 의해 선저 및 선측에 longitudinal 간격으로 국부 굽힘(local bending)이 발생하는 것이 관찰되었으며, 계산된 변위 값이 타당한 범위의 값을 가지기에 구조 해석이 적절하게 수행되었다고 판단할 수 있었다.

Fig. 10은 스칼럽 반지름에 따른 선체 구조에서 발생하는 최대 변위를 나타낸다. 8가지 모든 모델에 대하여 호깅 상태와 새깅 상태 모두 홀수를 기준으로 모델 상부에서는 정수압에 의한 영향을 받지 않고 하부에서는 정수압에 의한 영향을 받게 된다. 그 결과 전체 모델에 대해 변위에 대한 크기(magnitude)를 도출해봤을 때 최대 변위 크기는 수선면 근처 지점에서 최댓값을 가지게 되는 것을 확인하였다.

최대 변위 값을 살펴보면, 스칼럽 반지름이 250mm까지 커지더라도 선체 구조의 global 반응에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 스칼럽 반지름에 따라 최대 변위가 소폭 변동하는 현상은, 이중선체 측면의 개구부가 격자 형상에 영향을 미침으로써 불가피하게 발생하는 수치적 오차로 볼 수 있다. 즉 스칼럽 반지름의 적용은 스칼럽이 적용되는 주변부의 선체 구조 반응에 국한적으로 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 국부 영향을 확인하기 위하여 스칼럽, 거더 및 내측 선체의 국부 응력에 대해 살펴본다.

3.2 Scallop edge에서의 응력 결과

화물에 의한 하중 및 정수압에 의한 하중은 스칼럽이 적용되는 플로어(floor), 플로어와 수직으로 직교하는 거더에 면내 전단 변형을 지배적으로 발생시킨다. 그렇기에 스칼럽 주변 선체 구조의 항복 및 파손 가능성을 평가하기 위해 구조 부재에 작용하는 von-Mises 응력(von-Mises stress)과 전단 응력(shear stress) 분

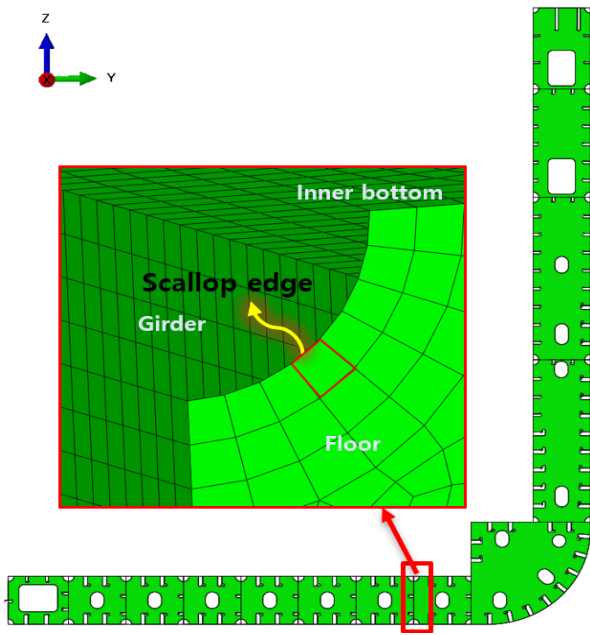


Fig. 11 Location for the results derived (scallop edge)

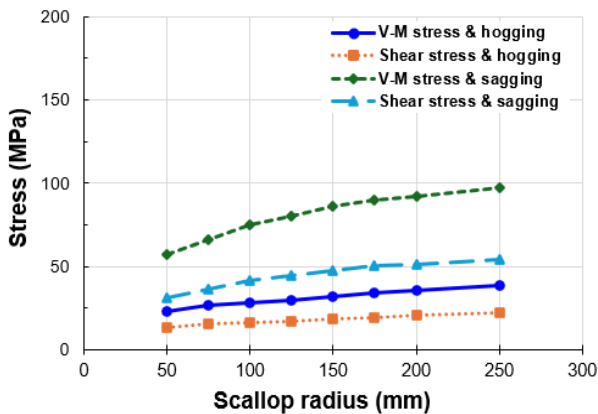


Fig. 12 Stress responses on scallop edge

포를 중점적으로 분석하였다. 응력값은 Fig. 11과 같이 모델링된 선체의 중심선(center line) 기준 일곱 번째 거더와 내부 선저가 만나는 지점에서의 스칼럽 엣지에 대해 응력값을 도출하였으며, 빨간색으로 표시된 요소를 기준으로 스칼럽 엣지 부근의 요소 2×3 개의 응력값을 평균을 냈고, 각 요소의 centroid값을 사용했다. 본 연구에서 사용된 AH32 steel의 허용응력은 315MPa를 사용하였으며, KR선급에서 정의한 선박을 크게 세 가지 상태인 운항 상태, 정적 상태, 사고 상태로 분류하여 각각의 하중 조합에 의해 허용응력 보정계수를 도입하도록 하였다. 이때, 3가지 조합 중 가장 보수적인 관점에서 정적 상태에서의 허용응력 보정계수 0.8을 도입하였을 때 최소 허용 응력은 252MPa이다(KR, 2024).

Fig. 12에 나타난 것과 같이, 스칼럽 반지름이 커짐에 따라 스칼럽 엣지(scallop edge)에서 발생하는 최대 응력 역시 증가하는 경향성이 나타났다. 최대 응력이 발생하는 지점은 모든 해석 케이스들에 대하여 스칼럽 엣지 중앙부로 동일하였다. 새김 조건에서는 선체 종굽힘 모멘트에 의해 선저에서는 인장 효과가 발생되고 이는

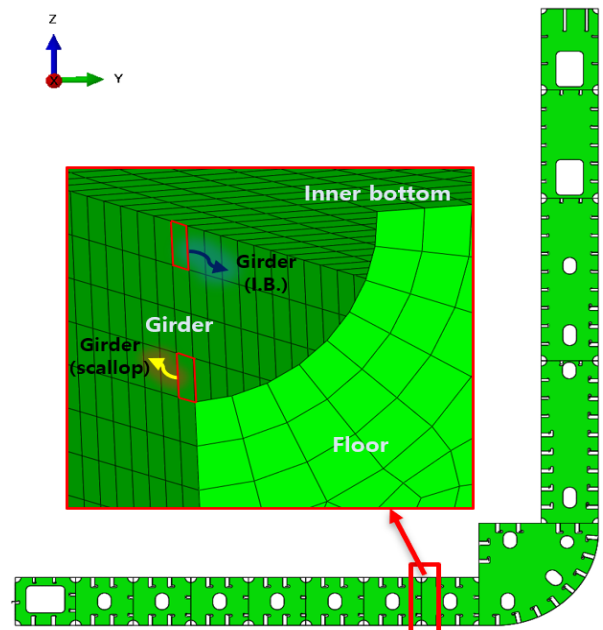


Fig. 13 Locations for the results derived (girder)

컨테이너 하중 및 해수의 정수압에 의한 압축 효과를 증폭시킨다. 따라서 상대적으로 호킹 조건에 비해 스칼럽 엣지에서 큰 전단 응력이 발생된다. 현업에서 사용되는 스칼럽에서의 허용전단응력 60MPa를 기준으로 비교하면, 스칼럽 반지름이 250mm까지 확대 적용되어도 구조 안전성이 만족하는 것으로 확인되었다.

스칼럽 반지름이 커지면 컨테이너 하중에 의해 유발되는 스칼럽 엣지에서의 전단 변형이 상대적으로 크게 발생하게 되고, 이는 스칼럽 엣지에서의 전단 응력 증가로 이어진다. 스칼럽 반지름의 증가에 따른 인장 및 압축 응력의 변화는 전단 응력 변화에 비해 상대적으로 작았다. 따라서 아래의 수식과 같이 표현되는 평면 응력(plane stress) 조건에서의 von-Mises 응력의 경향성은 전단 응력과 유사한 경향성을 가진다.

$$\sigma_{V-M} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (6)$$

3.3 Girder 및 Inner bottom에서의 응력 결과

스칼럽이 발생시키는 기하학적 비선형성에 의해 스칼럽 엣지와 맞닿은 거더에서는 응력 집중이 발생한다. 국부 응력(local stress)을 도출한 위치는 Fig. 13과 같으며, 8가지 해석 모델 중 스칼럽 반지름이 250mm인 모델에 해당한다. Fig. 14에서 보는 것과 같이 스칼럽 반지름이 50mm에서 150mm 이하인 모델들의 경우 기하학적 형상 불연속부에 해당하는 스칼럽 엣지와 거더가 만나는 지점에서 최대 응력값이 도출되었다. 이 부위는 선체 굽힘 하중 및 수직 변위 고정 등의 경계 조건 영향으로 인해 국부적인 응력 집중 현상이 두드러지게 나타나는 영역이다.

스칼럽 반지름이 50mm에서 150mm로 커질수록 해당 스칼럽

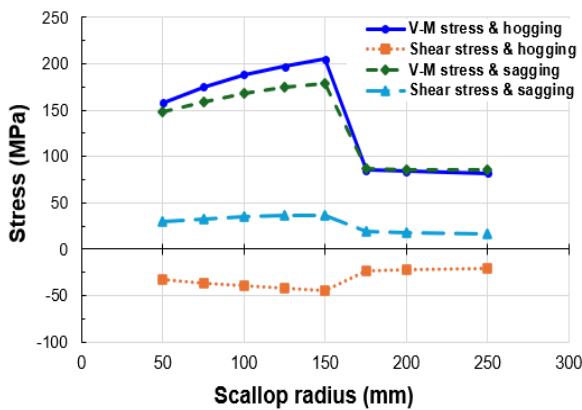


Fig. 14 Stress responses on girder(scallop)

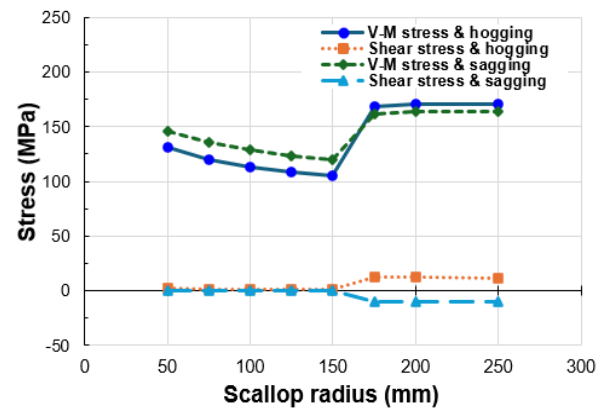


Fig. 17 Stress responses on inner bottom

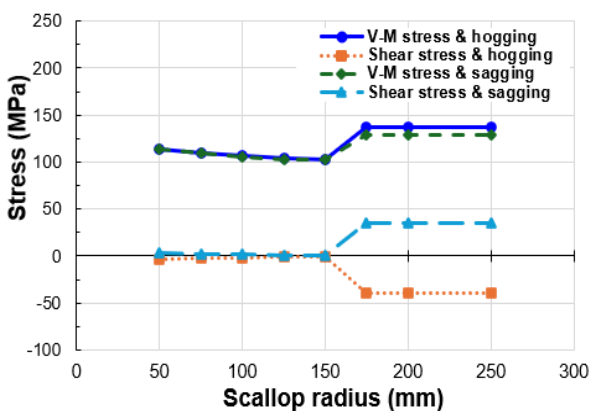


Fig. 15 Stress responses on girder(inner bottom)

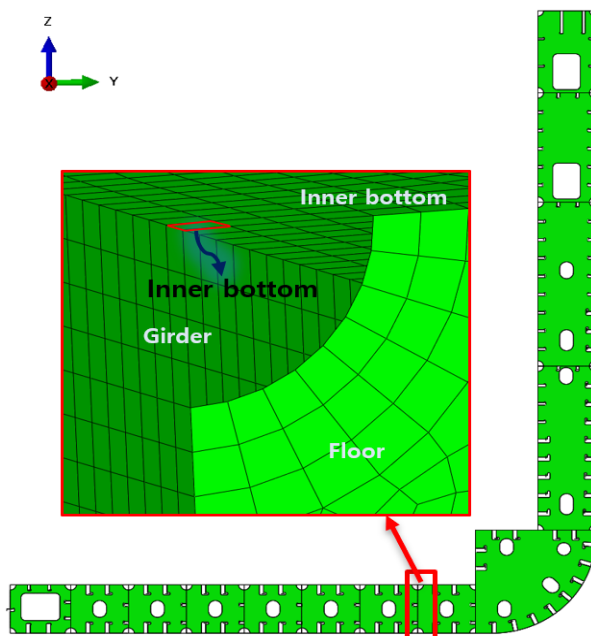


Fig. 16 Location for the results derived (inner bottom)

엣지 코너 부근에서 발생하는 von-Mises 및 전단 응력의 최대값이 점점 더 커지는 경향이 뚜렷하게 관찰되었다. 이는 스칼럽의 반경이 커지면서 필연적으로 개구부 면적이 넓어지고, 그에 따라

엣지 코너 주변 구조물의 유효 하중 지지 면적이 줄어들어 점진적인 응력 상승을 유발한 것으로 분석된다.

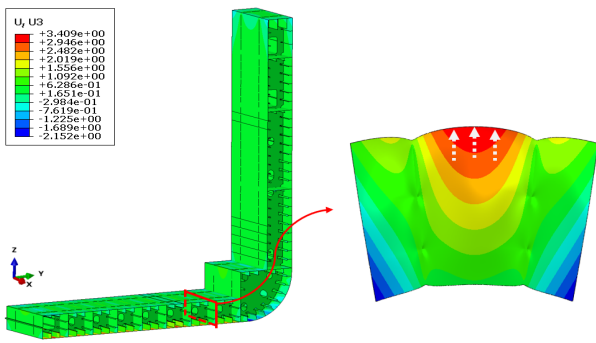
스칼럽 반지름이 150mm를 넘어가게 되면, 스칼럽 엣지 코너와 만나는 거더에서의 국부 응력이 급격하게 감소하는 현상이 확인되었다. 응력 집중 모드가 변함을 확인하기 위하여 내부 선저와 맞닿는 거더에서도 국부 응력값을 도출하였으며 위치는 Fig. 13과 같다. Fig. 15와 같이 해당 부위에서는 150mm에서 175mm로 넘어갈 때 응력 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

추가로, 거더와 맞닿는 내부 선저에서 발생하는 국부 응력 역시 확인하였으며 위치는 Fig. 16과 같다. Fig. 16은 8가지 해석 모델 중 스칼럽 반지름 크기 175mm인 경우이며, Fig. 17에서 보이는 것과 같이 스칼럽 반지름이 150mm에서 175mm로 커지는 구간에서 전단 응력 및 von-Mises 응력이 급격하게 증가하는 양상이 나타났다. 이는 스칼럽 엣지 코너와 맞닿는 거더와는 정반대의 경향성이며, 내부 선저(inner bottom)와 맞닿는 거더와는 동일한 경향성이다.

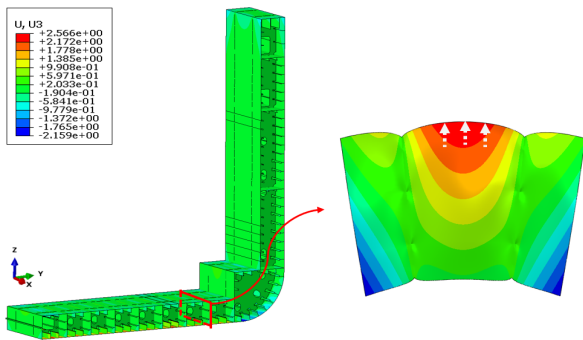
정리하면, 50mm부터 150mm에서는 스칼럽 엣지와 거더가 만나는 지점에서 최대 응력이 도출되었으나, 175mm 이상부터는 거더와 내부 선저가 만나는 지점, 특히 내부 선저 부위에서 최대 응력 값이 발생하는 것으로 확인되었다. 이로부터, 스칼럽 반지름이 상대적으로 작은 경우에는 내부 선저에 작용하는 컨테이너 하중을 거더와 스칼럽 엣지 코너가 만나는 부위에서 지배적으로 지지하는 반면, 스칼럽 반지름이 특정 크기를 넘어가게 되면 girder와 내부 선저가 만나는 부위로 하중 지지점이 옮겨가는 것을 확인할 수 있다.

이러한 현상은 스칼럽의 크기가 커짐에 따라 횡웨브의 유효 단면적이 점차 상실되고, 이로 인해 기존에 거더와 웨브를 타고 흐르던 하중 전달 경로가 변경되어 인접한 주요 구조 교차부(inner bottom)로 하중이 쏠리게 됨을 의미한다. 즉, 스칼럽 반지름 확대에 의해 구조물 전체의 거동을 지배하는 응력 집중 모드(stress concentration mode)가 변화하였음을 확인하였다.

위 그림 Fig. 18과 Fig. 19는 중심선 기준 일곱 번째 거더에 해당한다. Fig. 18은 위에서부터 스칼럽 반지름이 150mm와 175mm 모델의 호깅 상태에서의 변형 형상을 보여준다. 또한,



(a) 150mm



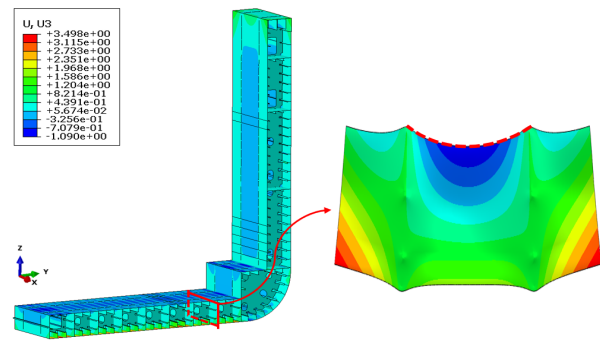
(b) 175mm

Fig. 18 Local deformations of 150mm and 175mm models at Hogging

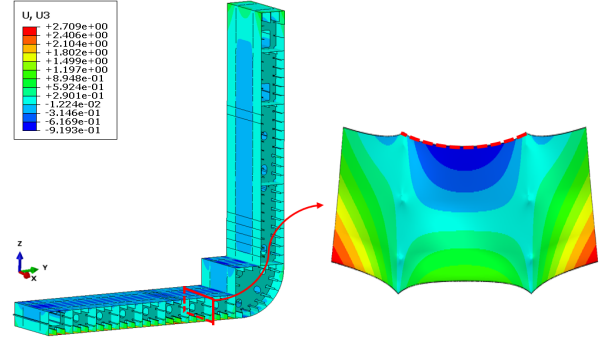
Fig. 19는 위에서부터 스캐럽 반지름이 150mm 와 175mm 모델의 새깅 상태에서의 변형 형상을 시각적으로 보여준다. 두 Figure 모두 명확히 확인하기 위해 변위에 대한 scale factor 1000을 적용하여 나타낸 것이다.

Fig. 18의 그림을 살펴보면, 스캐럽 반지름이 150mm에서 175mm로 증가함에 따라 거더의 절대적인 변형량은 감소하며 이로 인해 거더에서 발생하는 응력(von-Mises 및 shear)이 줄어드는 경향이 나타난다. 반면에 거더, 횡웨브, 내부선저가 서로 교차하는 부위에서의 국부 변형률이 증가하여 내부 선저에서 발생하는 응력은 증가하는 경향이 나타난다. 새깅 상태(Fig. 19)에서도 동일한 경향이 관찰되며 특히 거더의 변형량 감소는 더욱 뚜렷하게 확인된다. 스캐럽 반지름의 확대로 인해 개구부가 커짐에 따라 선체의 횡부재인 플로어의 유효 단면적이 점차 줄어들게 된다. 그 감소량이 특정 기준을 넘어서게 되면 기존에 거더와 횡웨브를 타고 흐르던 하중의 일부가 내부 선저로 분산되면서 응력 집중 모드가 변화하는 것으로 보인다.

구조 해석을 위해 채택된 컨테이너 선박은 종방향으로 끊기지 않고 이어지는 거더가 타 선박에 비해 다수 배치된다. 반면에 원유운반선(oil Tanker), LNG 운반선(LNGC)은 상대적으로 적은 개수의 거더 혹은 부분거더(partial girder)가 배치된다. 이는 스캐럽 반지름 확대에 따른 응력 집중 모드의 변형은 선종에 따라서 상이하게 나타날 수 있는 특징임을 의미한다. 즉, 횡부재에 허용 가능한 스캐럽 반지름에 대한 기준은 선종 별로 각각의 구조적 특성을 고려하여 결정되어야 할 것이다.



(a) 150mm



(b) 175mm

Fig. 19 Local deformations of 150mm and 175mm models at Sagging

파랑 하중에 의한 선체 굽힘 거동을 모사한 호깅 및 새깅 상태에서의 응력 해석 결과를 살펴보면, 선체 종굽힘 모멘트의 작용 방향에 따라 도출되는 전단 응력의 방향성이 뚜렷하게 구분되는 것을 확인할 수 있다. 호깅 상태에서는 선체 종굽힘 모멘트에 의해 상갑판이 인장을 받고 선저부가 압축을 받는 굽힘 거동이 발생하는 반면, 새깅 상태에서는 하중 방향이 반전되어 상갑판이 압축을 받고 선저부가 인장을 받게 된다. 이러한 선체 상하부의 인장-압축 거동 변화에 따라, 국부 구조물인 스캐럽 엷지에서 측정된 전단 응력은 호깅 상태에서 음(-)의 값을 나타내었으며, 반대로 새깅 상태에서는 양(+)의 값을 나타내는 특징을 보였다. 이는 선박에 작용하는 종굽힘 모멘트가 국부 구조물인 스캐럽 주변의 전단 응력장(stress field) 방향성을 결정하는 지배적인 요인임을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 선박 구조물에 적용되는 스캐럽의 기하학적 크기가 증가함에 따라 선체 구조의 응력 분포 및 구조 반응에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 스캐럽 반경이 커짐에 따라 선체 구조의 개구부 면적이 증가하므로 유효 단면적이 감소한다. 이에 따라 스캐럽 엷지에서는 스캐럽 반지름이 커질수록 점진적으로 von-Mises 응력 및 전단 응력이 증가하는 것이 확인되었다. 선체 종굽힘 모멘트에 의해

선저에서 인장이 발생하는 새깅 상태에서 상대적으로 큰 응력이 발생되었다. 다만 스캘럽에서의 허용전단응력 60MPa 기준으로 보면 스캘럽 반지름 250mm까지 구조 안전성을 만족하는 것이 확인되었다.

(2) 스캘럽 반지름이 50~150mm인 구간에서는 기하학적 형상 불연속부인 거더와 스캘럽 엣지 코너가 만나는 지점에서 최대 응력이 도출되었다. 반면, 스캘럽 반지름을 175mm~250mm로 확대할 경우, 개구부 증가에 따른 하중 전달 경로의 변경으로 인해 최대 응력 발생 위치가 거더와 내부 선저 교차부로 이동하는 응력 집중 모드의 변화가 관찰되었다. 전단 응력의 값을 살펴보면 스캘럽 엣지의 전단 응력에 비해 상대적으로 낮은 수준이었다.

(3) 앞서 도출된 최대 응력값 및 최대 von-Mises 응력은 본 연구에서 사용한 AH32 강의 허용 응력 기준인 315MPa에 미치지 못하는 수준으로 확인되었다. KR 선급에서는 선박을 크게 세 가지 상태인 운항 상태, 정적 상태, 사고 상태로 분류하여 각각의 상태에 허용응력 보정계수를 도입하도록 하였다. 그 값은 각각 1, 0.8, 1이고, 가장 보수적인 허용응력 보정계수 0.8을 도입하였을 때 재료의 허용 응력은 252MPa 이다. 그러나 Fig. 12, 14, 15, 17에서 발생하는 von-Mises 응력의 최대값은 200MPa 안쪽인 것을 확인할 수 있다. 즉, 스캘럽 반지름이 250mm 까지 커지더라도 허용 응력을 초과하지 않아 구조적 파손에 대해 충분히 안전하며, 동시에 스캘럽에 의한 단면계수의 감소율이 3% 이내인 기준을 충족한다면 스캘럽 반지름의 확대 적용이 구조적으로 안전함을 확인하였다. 본 연구에서 적용한 황웨브의 스캘럽의 경우 선체 종강도에 미치는 영향은 종부재들에 비해 상대적으로 작을 것으로 판단된다.

(4) 다만, 본 연구의 해석 결과는 15,000TEU급 컨테이너선의 중앙부 격자형 구조와 20ft 컨테이너 만재 상태라는 특정 조건에 국한하여 도출된 결과이다. 선종에 따라 선체 구조 부재의 배치, 주요 하중의 크기 및 전달 경로가 상이하므로 본 결과를 모든 선종에 일괄적으로 적용하기에는 어려움이 있다.

(5) 따라서, 실제 선박 구조 설계에서 생산 효율성을 위해 125mm 이상의 대형 스캘럽을 범용적으로 적용하고자 할 경우, 해당 선종과 운항 조건에 맞춘 개별적인 구조 해석이 필수적으로 수반되어야 하며, 응력 집중 모드의 변화로 하중이 쏠리는 거더와 이너 바텀 교차부 등에 대한 상세한 피로 안전성 검토가 다시 한번 확인되어야 한다.

후 기

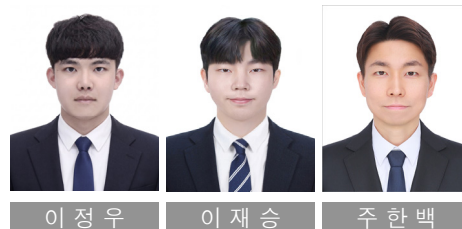
이 성과는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평화원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2025-02263945, 산업 혁신인재성장지원사업).

References

- Choi, M.K., Do, B.H. and Yoon, J.H., 2025. Development of welding robot system for sub-assembly of ship's block. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 80th Anniversary Annual Conference*, pp. 1141-1144.
- Det Norske Veritas (DNV), 2016. Rules for classification: Ships – Part 3 hull – Chapter 1 hull structural design.
- Jeong, D.J., Kim, S.W., Han, E.J., Ahn, C.W., Mun, S.H., Kim, H.J., Choi, D.J. and Kwon, K.Y., 2025. Robot collision checking method for welding automation in ship block construction. *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, 30(4), pp.522-532.
- Kang, S.K., Yang, J.S. and Kim, H.K., 2015. Development of method to remove weld scallop and ceramic backing material of wedge type and its application. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7, pp.315-323.
- Kim, J.S., Jo, J.S., Ryu, C.U., Jo, Y.J., Kim, J.W. and Choi, J.H., 2020. A study on the prediction of the quality of welding parts of ship equipment according to the variables of welding process. *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Annual Conference*.
- Korean Register (KR), 2024. Rules for the classification of steel ships, chapter 14 container ships.
- Shin, J.C., 2006. Stress concentration at connection and cut-out parts according to existence of scallop and diaphragms on orthotropic steel decks. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 18(3), pp.289-299.

Authorship Contribution Statement

Jeong-Woo Lee: Data curation, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Jae-Seung Lee:** Data curation, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing; **Han-Baek Ju:** Conceptualization, Methodology, Resources, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing.



이 정 우

이 재 승

주 한 백