

# 휨 모멘트를 받는 박스거더 구조 강도 실험에 대한 수치해석 방법에 관한 연구

이명수\* · 박주신\*\*†

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

## A Study on the Numerical Analysis Methods for Predicting Strength Test Result of Box Girder under Bending Moment

Myung-Su Yi\* · Joo-Shin Park\*\*†

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

\*\* Part leader, Ship and Offshore Research Institutes, Samsung heavy industries, Geoje 53261, Korea

**요 약 :** 선박 및 교량 구조물은 일종의 길이가 긴 박스형 구조로서 수직 굽힘 모멘트에 대한 저항력이 설계의 주요 인자이다. 특히 선박 거더는 반복적으로 불규칙적인 파랑하중에 장시간 노출되어 있기 때문에 구조부재의 연속 붕괴 거동을 정확하게 예측하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 논문에서는 순수 휨모멘트를 받는 박스거더의 하중 변화에 따른 좌굴을 포함한 소성 붕괴 거동을 수치해석적 방법을 이용하여 분석하였다. 분석대상은 Gordo 실험에서 사용한 세 가지 박스거더로 선정하였다. 구조강도 실험 결과와 비선형 유한요소해석에 의한 결과를 비교하여 차이가 발생하는 원인에 대해서 고찰하였다. 본 논문에서는 카본스틸 재료의 제작 시 필연적으로 사용하는 용접열에 의한 초기 처짐의 영향을 반영하기 위하여 전체와 국부적인 처짐 형상의 조합을 제안하였고, 이 결과는 실험 결과와 거동 및 최종강도 추정율이 7% 이내에서 잘 일치하고 있었다. 논문에서 검토한 절차 및 초기 처짐 구성에 대한 내용은 향후 유사 구조물의 최종강도를 분석하는데 좋은 지침으로 사용할 수 있다.

**핵심용어 :** 굽힘 모멘트, 선박 구조, 거더, 최종강도, 유한요소해석

**Abstract :** Ship and bridge structures are a type of long box-shaped structure, and resistance to vertical bending moment is a key factor in their structural design. In particular, because box girders are repeatedly exposed to irregular wave loads for a long time, the continuous collapse behavior of structural members must be accurately predicted. In this study, plastic collapse behavior, including buckling according to load changes of the box girder receiving pure bending moments, was analyzed using a numerical analysis method. The analysis targets were selected as three box girders used in the Gordo experiment. The cause of the difference was considered by comparing the results of the structural strength experiment with those of non-linear finite element analysis. This study proposed a combination of the entire and local sagging shape to reflect the effect of the initial sagging caused by welding heat that is inevitably used to manufacture carbon steel materials. The procedures reviewed in the study and the contents of the initial sagging configuration can be used as a good guide for analyzing the final strength of similar structures in the future.

**Key Words :** Bending moment, Ship structure, Girder, Ultimate strength, Finite element analysis

### 1. 서 론

선박 및 해양구조물의 기본 골격 구조는 상자형 철 구조물로서 판(Plate), 보강판(Stiffened plate) 그리고 거더(Girder) 부재의 조합으로 구성된다. 기본적인 판과 보강재는 대표적

인 환경 외력인 파랑 하중에 의해 국부적으로 좌굴 및 소성 붕괴가 발생하며, 이로 인하여 구조 강성이 저하하게 된다. 이러한 현상은 주변 구조 부재의 하중 분담을 증가시켜서 연쇄적으로 많은 영역의 구조부재의 강성을 상실하게 하여 전체 구조 붕괴의 위험성에 노출된다. 파랑 하중에 노출된 선박 구조는 중 굽힘 모멘트에 의해 호깅(Hogging)과 새깅(Sagging)에 의해서 반복적으로 압축과 인장 하중에 영향을

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

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

받는다. 좌하중을 받으면 선체 길이 방향으로 부력분포가 변하게 되고 중력과의 차이가 발생한다. 좌하중의 에너지가 가장 최대인 조건은 선체의 길이와 좌하중의 길이가 같을 때이며 선체 중앙부에 좌하중이 놓이는 경우가 호강이며, 갑판과 선저에 균열이 발생하고 이 상태가 반복되면 선박의 중앙부가 절단되기도 한다. 이와는 반대의 개념이 새강이며, 좌하중이 선수/미에 위치하여 갑판부는 압축력이 선저판에는 인장응력을 발생시킨다. 선박 구조의 안전한 설계를 위해서 선각거더의 최종강도 평가를 의무화하고 있고, 국제선급연합에서는 공통 선급 규칙(Common Structural Rule, 2020)을 제정하여 주요선종(원유 운반선, 산적 화물선)에 적용해오고 있다. 선각거더의 비선형 붕괴 거동 특성은 아주 복잡하며, 복잡하게 구성된 부재의 좌하중 거동을 분석하기 위해서는 더 많은 대변화 모델을 이용한 구조 강도 실험을 기반으로 한 연구가 필요하다. 본 연구와 관련된 기존의 선행연구를 아래와 같이 요약하였다.

Lee and Lee(2006)는 운반선의 선각 구조 중앙 단면의 최종강도 평가를 위하여, 3척의 원유 운반선 모델을 이용하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 비선형 모델로 구조해석을 수행하였다. 국제선급연합(IACS)에서 제시된 최종강도 평가식을 일부 보완한 경험식을 제안하였다. 새강 상태에서는 제안식과 공통 선급 규칙의 평가 결과가 일치하였으나, 호강 상태에서는 공통 선급 규칙의 결과가 10~20% 낮게 나타났다. 제안식의 적용성을 상세 검토하기 위하여, 총 10척의 유조선 모델의 결과와 비교 하였고, 한 가지 모델은 같은 값을 보였고, 대부분의 결과는 최대 오차 11%를 보였다. 연구에서 사용한 실적선 모두는 중강도 관점에서는 단면계수가 충분한 여유를 갖고 있음이 증명되었다. 제안된 식의 결과와 공통 선급 규칙 제안된 식의 검증을 위하여, 참고 문헌(Dow, 1991)의 1/3 축소 모델의 실험 결과와 비교하였다. 최종강도 이전의 거동은 실험 결과와 잘 일치하였으며, 최종강도 이후의 거동은 다소 차이를 보였다. 저자는 차이가 발생하는 원인으로 보강판 붕괴 이후 하중 제하에 대한 국부 붕괴 상태를 고려하지 않았다는 점을 지적하였다.

Hu et al.(2018)은 비틀림과 휨 하중이 작용 시에 대형 개구부를 갖는 박스거더의 잔류 최종강도를 수치 해석적 방법으로 연구하였다. 균열 길이, 위치, 방향각을 변수로 하여 비선형 시리즈 유한요소해석을 수행하였다. 조합 하중 조건에서 균열손상이 있는 개구부를 갖는 박스거더의 최종강도 특성을 분석하기 위하여 가장 위험한 조건의 균열손상 2가지를 결정하였다. 균열의 가로 위치는 세로 위치보다 강도 저하가 크게 발생하며, 가로 방향 가장자리 균열이 가장 구조적으로 취약한 조건임을 확인하였다. 언급한 두 가지 하중이

복합적으로 작용하였을 때의 잔류 최종강도를 예측하기 위한 상관 평가식을 제안하였다.

Saad-Eldeen et al.(2010)은 4개의 위치에서 수직 휨모멘트를 받는 조건에서 좌굴 및 최종강도 붕괴 거동을 실험적으로 묘사하였다. 하단부는 인장 응력이 상부는 압축응력이 발생하는 조건이며, 전단 하중 효과를 방지하기 위하여 하중 작용 위치를 박스거더 지지 위치로부터 충분히 떨어진곳을 선정하였다. 700 kN 유압잭을 이용하여 하중을 전달하였으며, 수평 빔을 통해 박스거더에 분산시켰다. 실험을 통해서 계산된 박스거더의 최종강도에서의 휨모멘트를 비교하기 위하여 참고문헌(Paik and Thayanballi, 1997)을 이용하였다. 참고문헌의 계산 결과는 실험 결과보다 약 1.56% 낮게 나타났으며, 실험의 정합성을 확인하였다.

Zhong and Wang(2022)은 수직 굽힘 모멘트와 비틀림 하중을 받는 샌드위치 박스거더의 최종강도를 수치 해석적 방법을 이용하여 조사하였다. 기하학적 수치가 다른 7개의 박스거더 모델을 선정하고, 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 용접 때문에 발생할 수 있는 초기 처짐의 영향은 고려하지 않는 이상적인 모델의 최종강도에 비교하여 21.8%를 낮게 평가하였다. 판 두께의 증가와 웹 두께의 감소하는 조건에서는 박스거더의 비틀림 응력이 증가하여 최종강도가 낮아지게 하는 주요 원인이었다.

Quispe et al.(2022)는 수에즈막스 탱커의 이중저 패널 모델을 축소하여 박스거더 모델의 4점 휨모멘트 강도 실험을 수행하였다. 평가 모델과 서포트 사이의 마찰 효과를 구현하기 위하여 ABAQUS 프로그램의 유한요소모델링 시 반영하였다. 초기 처짐의 영향을 묘사하기 위하여, 실험 모델에서 계측된 초기 처짐 데이터를 분석하여 해석 모델에 반영한 경우와 고유치 좌굴 해석을 수행한 후 1모드를 적용한 두 가지 조건을 검토하였다. 최대 초기 처짐 양은 참고 문헌(Smith, 1977)에서 제안한 값과 같은 비율이 되도록 설정하였다. 상단부에 스트레인 게이지를 부착하여 하중 변화에 따른 변형률을 계측하여, 수치해석 결과와 비교하였다. 연구에서 사용한 축소모델에서의 좌굴 경향은 보강판 상부 판에서 좌굴이 먼저 발생하는 거동을 나타냈으며, 최종강도에서의 휨 모멘트값은 국제선급연합(IACS)에서 제시하는 경험식 값과 잘 일치하였다. 본 연구에서는 축소 실험 모델을 실선으로 확장하기 위하여 휨모멘트 변화에 따른 최종강도 거동을 분석하였으며, 초기 처짐 효과를 반영하는 과정을 필수적으로 고려해야 함을 제안하였다.

Ao and Wang(2016)은 균열의 영향으로 인한 데크 개구부가 있는 박스 거더의 비틀림에 의한 최종강도 거동을 수치 해석적 방법으로 검토하였다. 개구부를 갖는 축소형 모델은

컨테이너 화물창을 묘사하였고, 요소의 분할 크기에 의한 영향을 확인하기 위하여 수렴도 테스트를 수행하고, 그 결과를 해석에 적용하였다. 초기 처짐 3가지 조건에 따른 해석 모델을 구성하였고, 비틀림에 의한 고유치 좌굴 모드, 압축 하중에 의한 고유치 좌굴 모드 그리고 참고문헌(Paik et al., 2008)에서 제안한 계측된 초기 처짐이다. 손상된 박스 거더의 최종강도를 평가하기 위하여 저자는 두 가지 개념을 제안하였다. 첫 번째는 유효잔차구간(ERS)이고, 손상이 없는 박스 거더에 대한 초기 손상 파손 영역(IDFZ)이다. 여기에서 균열 크기는 균열이 유효잔류영역에 위치할 때 구조강도에 상당한 감소 효과를 미치는 핵심 변수임을 검증하였다.

Gordo and Soares(2009)는 휨 모멘트를 받는 3개의 박스 거더의 최종강도 실험을 수행하였으며, 사용된 재료는 항복 응력 690 MPa의 고장력강이다. 시험편 제작 시 발생한 잔류 응력을 최소화하기 위하여, 예비하중을 반복적으로 적용하였다. 실험 결과와 수치 시뮬레이션 결과를 비교하기 위하여 HULLCOL 프로그램을 사용하였고, 잔류응력을 반영한 비선형 최종강도 거동 예측이 가능하였다. 고장력강 재료는 선체 구조와 같은 휨모멘트가 주요한 상황에서 효율적인 대안으로 충분함을 확인하였으며, 실험에서 계측된 최대 휨모멘트보다 수치해석 결과가 약 2% 작게 나타났다. 대표적인 선형연구를 분석해본 결과 선각거더의 비선형 붕괴 거동을 정확하게 예측하기 위하여 수치해석 기법에 의존하여 다양한 원인을 분석하였고, 축소 모델에 대한 구조강도 실험 사례도 꾸준히 보고되고 있었다. 본 연구에서는 축소 모형 구조 강도 실험 결과를 가장 잘 표현할 수 있는 수치 해석적 방법에 대해서 검토하였다. 특히, 해석 모델링을 구성할 때의 요소의 분할 크기와 부재 별 초기 처짐 형상에 대한 가정 그리고 어떻게 조합할 것인지에 대해 검토를 진행하였다.

## 2. 비선형 구조 붕괴 평가

### 2.1 선각거더 붕괴 사고

2002년 11월 13일 프로스티지호는 라트비아의 벤츠필스에서 지브롤터로 향해하던 중에 악천후를 만나 우현 쪽 구조에 구멍이 나기 시작했다. 기름이 새고 있는 상태로 입항을 거부 받아 11월 19일 포르투갈 해역에서 Fig. 1과 같이 중앙부가 쪼개지면서 가라앉았다. 침몰 후 기름이 유출이 계속되면서 총 2천만 갤런의 기름이 유출된 사고였다. 이 사고를 계기로 선박의 구조 관련 기준이 강화되고, 기름유출 및 선박 고유의 기능 강화를 위하여 이중저 구조의 전면 확대를 불러왔다.



Fig. 1. Prestige tanker sinking (<https://safety4sea.com/>).

### 2.2 해석 모델링

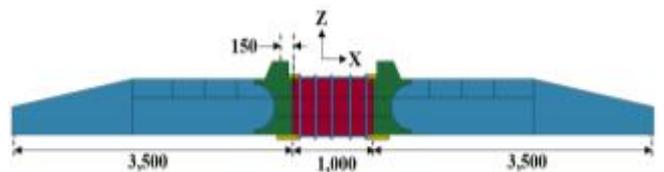
박스거더의 최종강도 실험(Gordo and Soares, 2009) 결과와 수치해석을 비교하기 위하여 사용된 재료의 물성값은 고장력강이며 Table 1과 같고, 실험에 사용된 세 개의 주요 치수는 Table 2와 같고 상세한 치수와 모델 구성은 Fig. 2와 같다. 보강재의 간격이 총 세 가지로 구성하였고, 나머지 치수들은 동일하게 유지하였다. 해석에 사용된 쉘(Shell) 요소는 55,940개와 156,472개의 절점으로 구성되었고, 박스거더 모델은 요소의 크기가 10mm보다 작게 분할되었다.

Table 1. Material properties of S690 high tensile steel

Properties	Specification
Elastic Modulus	200,000 MPa
Poisson's ratio	0.3
Density	78.5 kN/m <sup>3</sup>
Yield Strength	732 MPa
Tensile Ultimate Strength	800 MPa
Tensile Strain at Break	15%

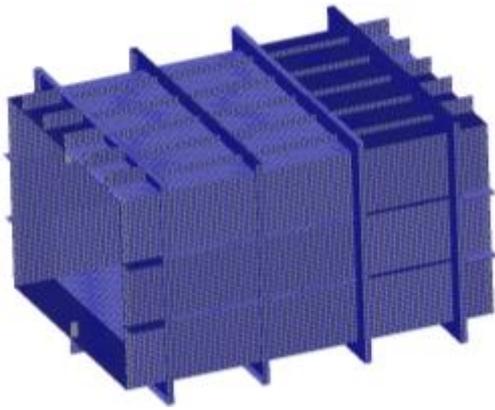
Table 2. Principal dimensions of the scaled box girder

Model	Length (mm)	Span (mm)	Breadth (mm)	Depth (mm)
H200	1,000	200	800	600
H300	1,100	300		
H400	1,400	400		

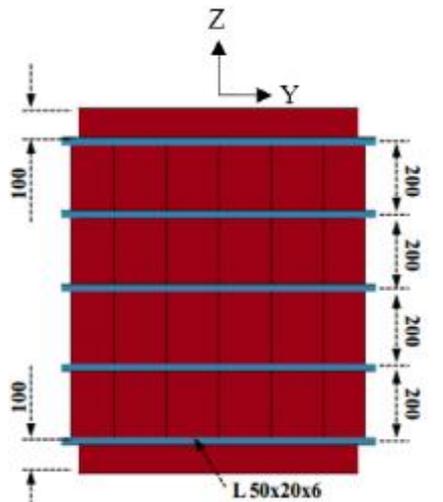


(a) whole dimension of the experimental model

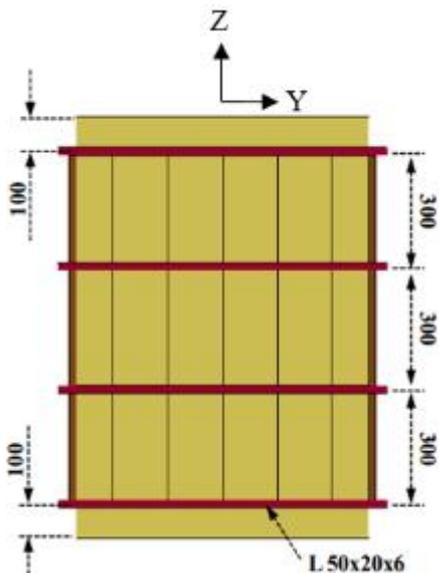
휨 모멘트를 받는 박스거더 구조 강도 실험에 대한 수치해석 방법에 관한 연구



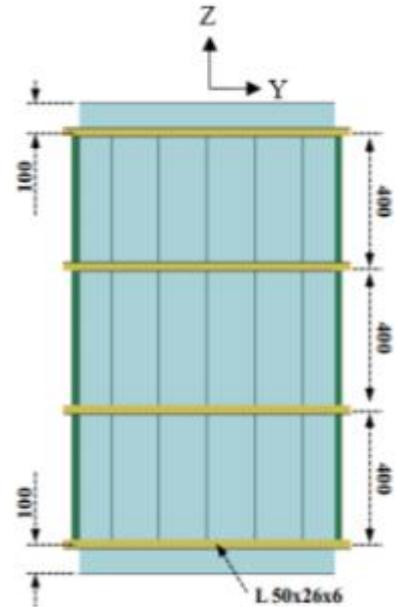
(b) local box girder model



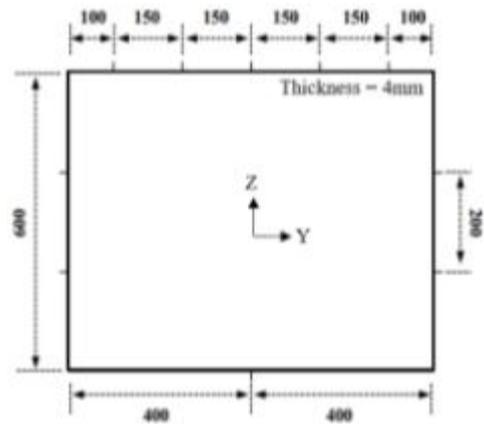
(c) H200 model dimension (elevation view)



(d) H300 model dimension (elevation view)



(e) H400 model dimension (elevation view)



(f) model dimension (section view)

Fig. 2. Principal dimension and model view of the box girder (unit: mm).

### 2.3 초기 처짐 구성

카본 스틸로 구성된 박스형 선박 구조물은 용접이나 절단 등의 열 가공 작업에 의한 초기 처짐이 발생한다. 특히 얇은 두께로 구성된 판넬 구조물에서는 초기 처짐 형상과 크기에 따른 좌굴 및 최종강도 거동은 아주 민감하게 나타나게 된다. 구조 강도 실험 문헌(Gordo and Soares, 2009)에서 시편 제작 시 초기 처짐 형상 및 크기에 대한 측정 결과를 명확하게 제시하지 않고 있지만, 수치해석에서는 판의 국부 좌굴 모드(2.1)와 전체 좌굴 모드(2.2) 그리고 길이 방향 보강재의 비틀림 좌굴 모드(2.3)를 조합하여 구성하였고, Fig. 3-(a), (b), (c)와 같다. 부재별 최대 초기 처짐 양(Smith, 1976)은 판 두께

와 길이의 함수로 적용하였다. 계측 정보가 명확하게 제시되지 않을 경우, 압축 하중 작용 시 부재별로 좌굴이 가장 쉽게 발생할 수 있는 초기 처짐을 가정하여 좌굴 및 최종강도 거동을 계산하게 된다. 이 가정의 정확도에 따라서 판 구조물의 붕괴 거동에 미치는 영향이 크게 나타난다.

$$w_{0L} = W_{0L} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \quad (2.1)$$

$$W_{0L} = 0.05\beta^2 t$$

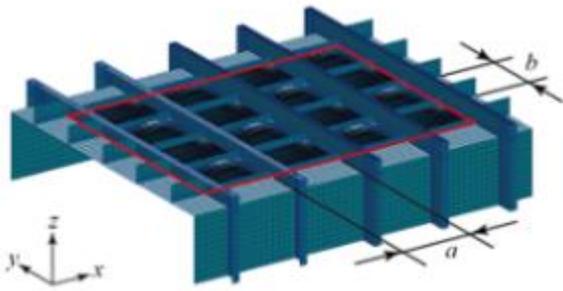
$$w_{0O} = W_{0O} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{B} \quad (2.2)$$

$$W_{0O} = 0.0025 \times a$$

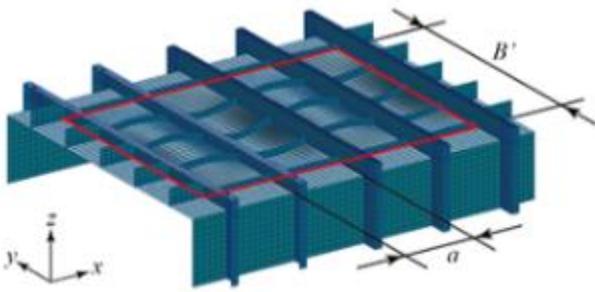
$$v_{0S} = V_{0S} \sin \frac{\pi x}{a} \frac{z}{h} \quad (2.3)$$

$$V_{0S} = 0.0025 \times a$$

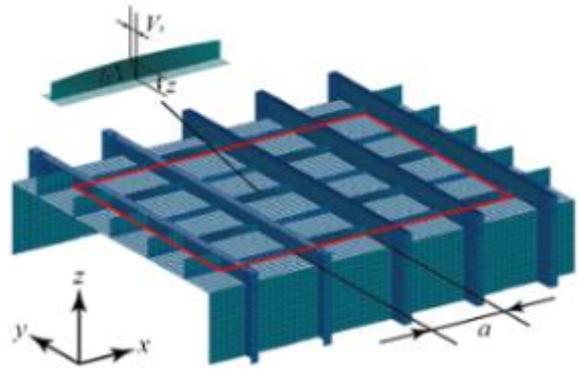
여기에서,  $w_{0L}$  는 국부 좌굴이 발생하는 초기 처짐,  $W_{0L}$  와  $W_{0O}$  는 판 부재에 발생하는 최대 초기 처짐 양,  $V_{0S}$  는 보강재에 발생하는 최대 초기 처짐 양,  $w_{0O}$  는 전체 좌굴이 발생하는 초기 처짐,  $a$  는 프레임 사이의 거리,  $b$  는 길이 방향 보강재 사이의 폭,  $B'$  는 전체 폭,  $z$  는 변형 전 보강재의 높이,  $h$  는 변형 후 보강재의 높이이다.



(a) local imperfection mode



(b) overall imperfection mode



(c) torsional imperfection mode of stiffener

Fig. 3. Types of the initial imperfection.

### 2.4 해석 이론 및 방법

초기 처짐을 고려한 비선형 붕괴 거동을 계산하기 위해서 유한요소해석 프로그램인 MSC Patran & Nastran V.2012를 사용하였다. 해의 수렴을 위해서 반복 스텝마다 강성이 업데이트되는 Full Raphson 방법을 적용하였다. 연구에 사용된 모델은 카본 스틸이면서 등방성 재료이고, 하중의 증가에 따른 요소의 항복 평가 기준은 von-Mises를 사용하였다. 요소의 최종강도 평가는 응력과 변형률 관계의 거동 이력을 보고 결정하였으며, 재료의 항복 응력과 같은 값이 요소의 중앙부를 관통한 경우를 정의하였다. 수치해석에서 구한 해의 정확도를 결정하기 위해서, 각 반복 계산에서 구한 변위의 증가나 내력과 외력의 차이가 허용오차보다 작은 조건에서만 수렴한 것으로 판단하였다. 연구에서는 반복 구간에서의 하중과 모멘트 오차의 표준편차(Square Root Sum of the Squares) 값이 적용된 하중의 표준편차값의 0.5%가 되었을 때를 수렴한 것으로 설정하였다.

### 2.5 경계조건 및 하중 조건

해석을 수행하기 위한 경계조건 및 하중 조건은 참고 문헌 (Gordo and Soares, 2009)과 같은 제원이며, 서포트의 양쪽 끝단부에 단순 지지 조건을 구현하였다. 박스거더 모델의 상단부 시트에 순수 휨 거동이 발생하도록 수직 하중을 부여하였으며, Fig. 4와 같다. 수직 하중을 전달하는 시트부는 강체 거동을 할 수 있도록 박스거더보다 강성이 큰 부재를 사용하였다.

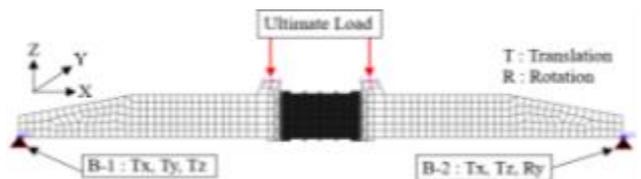


Fig. 4. Boundary and load condition.

## 2.6 평가 절차

수치해석을 통하여 실험 결과를 가장 잘 예측할 수 있도록 변수는 요소의 크기와 초기 처짐 형상의 가정이다. 경계 및 하중 조건은 실험 결과에서 언급한 바와 같이 구현하였으며, 거동 및 최종강도 지점의 일치율이 10% 이내의 조건을 찾는 과정을 Fig. 5에 나타내고 있다.

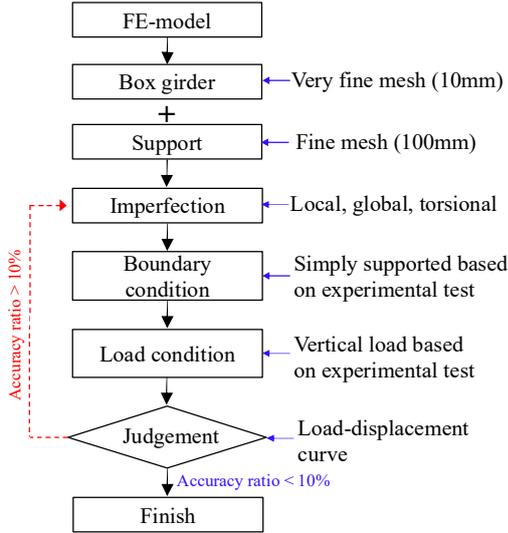


Fig. 5. Flow-chart for finding result most similar to experimental results.

## 3. 유한요소해석 결과

### 3.1 붕괴 거동(H200)

수직 하중 증가에 따른 박스거더의 좌굴 및 최종강도 거동을 확인하기 위하여, 박스거더의 상단부 시트에서 질량이 없고 하중을 받아도 변형이 발생하지 않는 강체 요소 (Rigid Body Element, RBE2)를 사용하였다. H200 모델에 대한 하중과 변위 관계 곡선을 Fig. 6의 실험 결과와 비교하고 있다. 실험에 의한 하중과 변위 변동 이력은 실선으로 나타내고, 비선형 수치해석은 점선으로 비교하였다. 수직 하중이 400 kN 이상 지점부터 박스거더의 면내 강성 기울기가 감소하며, 실험 결과는 최종강도 이후에 기울기 감소가 크게 나타나고 있다. 수치해석에서는 강성 감소 기울기가 크지 않게 나타나고 있으며, 중앙 상단부 판넬에서 하중 분담 효과가 크게 작용하였기 때문으로 판단된다. 실험에 의해서 구해진 최종강도보다 수치해석의 결과가 약 2% 높게 평가하고 있다.

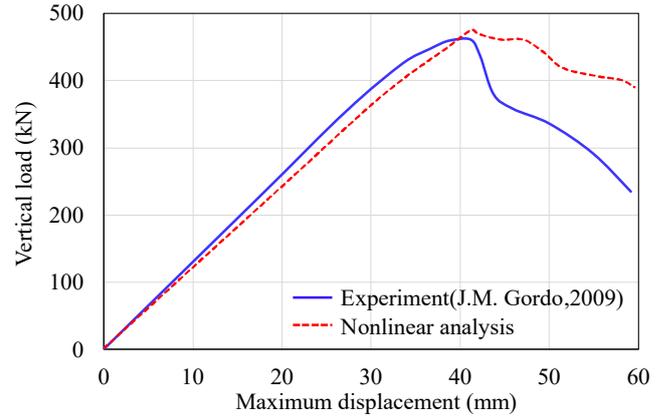


Fig. 6. A comparative result of between experimental and numerical simulation in the H200 model.

최종강도에서의 붕괴 형상을 Fig. 7에 나타내고 있다. 전체 거동(Fig. 8-a)은 새깅 모드가 잘 구현되었음을 확인할 수 있으며, 박스거더에서도 굽힘 모멘트에 의한 부재의 좌굴이 대칭적으로 잘 표현되었다. 이러한 변형은 박스거더 상단부에 압축응력이 작용하여 좌굴을 동반한 소성이 발생하며, 최종강도에서의 응력 상태를 Fig. 8에 나타내고 있다. 서포트와 가장 인접한 보강재와 관넬에서 좌굴이 발생하면서 상단면은 전체 좌굴 거동을 나타낸다.

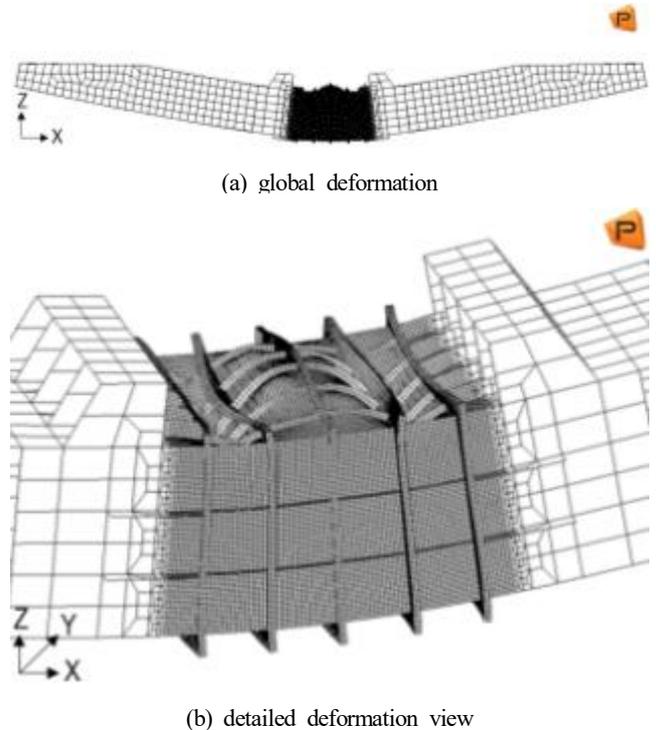


Fig. 7. Deformed shape under bending moment (stiffener width = 200 mm).

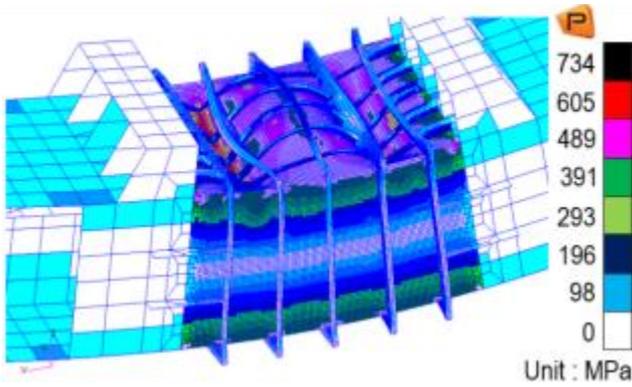


Fig. 8. The von-mises stress contour under bending moment (stiffener width = 200 mm).

### 3.2 봉괴 거동(H300)

H300 모델에 대한 하중과 변위 관계 곡선을 Fig. 10에서 실험 결과와 비교하고 있다. 수치해석 결과는 실험 결과에 비교하여 하중 증가에 따른 변위는 크게 나타나며, 최종강도는 낮게 평가하지만, 최종강도 이후의 거동 특성은 잘 일치하고 있다. 횡보강재의 폭이 100 mm 증가하면 최종강도 지점에서의 봉괴 패턴은 판과 보강재의 대칭적인 판넬좌굴 형상을 보여주고 있다. 부재의 크기와 두께를 같이 유지하고 횡 보강재의 폭이 증가하면서 부재의 좌굴 강성이 감소하여 최종강도는 H200에 비교하여, 낮게 평가하고 있다(Fig. 9). 실험에 의해서 구해진 최종강도는 수치해석 보다 약 8% 높게 평가하며, 일치율 기준인 10%를 만족하고 있다. 최종강도 지점에서의 봉괴 패턴은 횡 보강재를 기준으로 대칭이면서 연속적인 형상을 나타내는 특징을 Fig. 10에서 보여주고 있다.

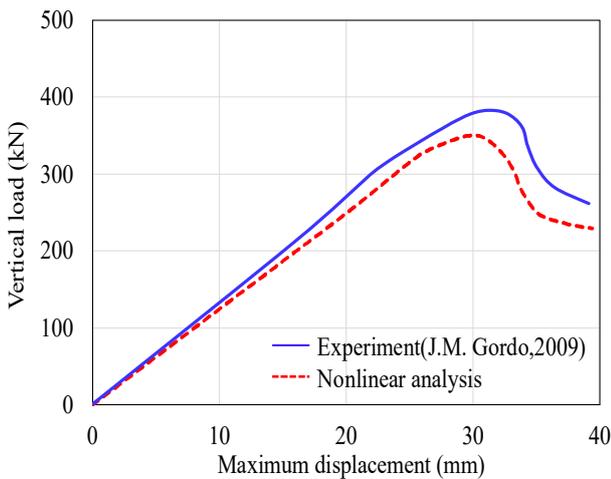
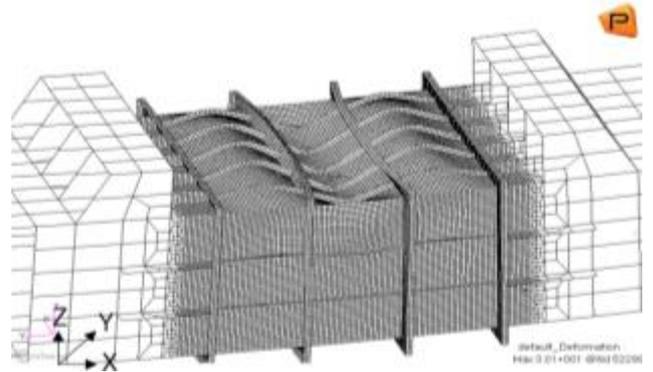


Fig. 9. A comparative result of between experimental and numerical simulation according to imperfection shape in the H300 model.

비선형 해석에 의한 최종강도에서의 von-Mises 응력 상태를 Fig. 11에 나타내고 있다. 횡 보강재 사이 중앙부 판재의 전체 좌굴로 인하여, 폭 방향으로 전단면 항복이 발생하고 있다. 판재의 좌굴로 인하여 횡 보강재도 폭 방향으로 전체가 변형하는 특징이 있다.



(a) global deformation



(b) detailed deformation view

Fig. 10. Deformed shape under bending moment (stiffener width = 300mm).

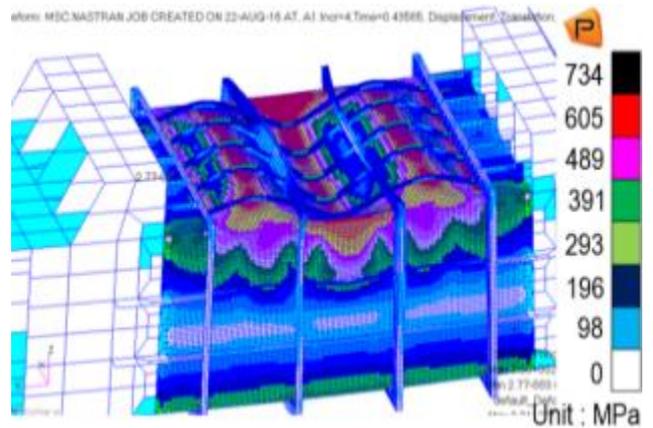


Fig. 11. The von-mises stress contour under bending moment (stiffener width = 300 mm).

### 3.3 봉괴 거동(H400)

H400 모델에 대한 하중과 변위 관계 곡선을 Fig. 12에서 실험 결과와 비교하고 있다. 수치해석 결과는 실험 결과와 비교하여 잘 일치하고 있다. 횡 보강재의 폭이 400 mm 증가하면 최종강도 지점에서의 봉괴 패턴은 선축 보강재의 좌굴

에 의해서 상단부 판넬에서 하중 분담이 많이 증가하며, Fig. 13과 같다. 중앙부 판넬에서 발생한 좌굴이 하중 증가하면서 항복 응력 수준으로 진전되면서 전단면에 걸쳐서 넓게 분포하며, Fig. 14 결과와 같다. 이로 인하여 측면부 판넬도 연쇄적으로 면내 강성 감소가 발생하여 가장 낮은 최종강도를 보인다. 실험에 의해서 구해진 최종강도는 수치해석 보다 약 1% 높게 나타나며, 면내 강성 감소 기울기도 정확하게 일치하고 있다.

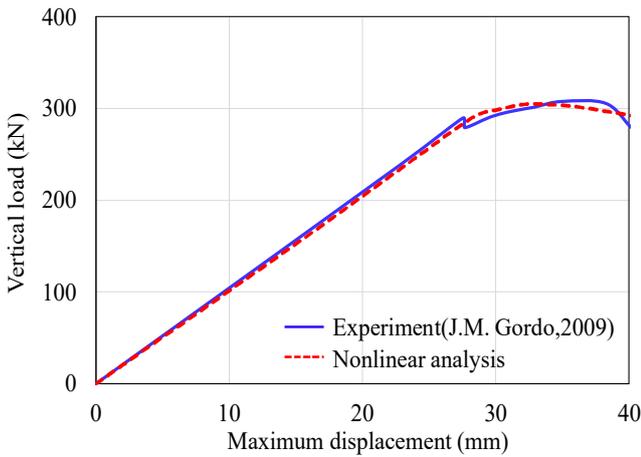


Fig. 12. A comparative result of between experimental and numerical simulation according to imperfection shape in the H400 model.

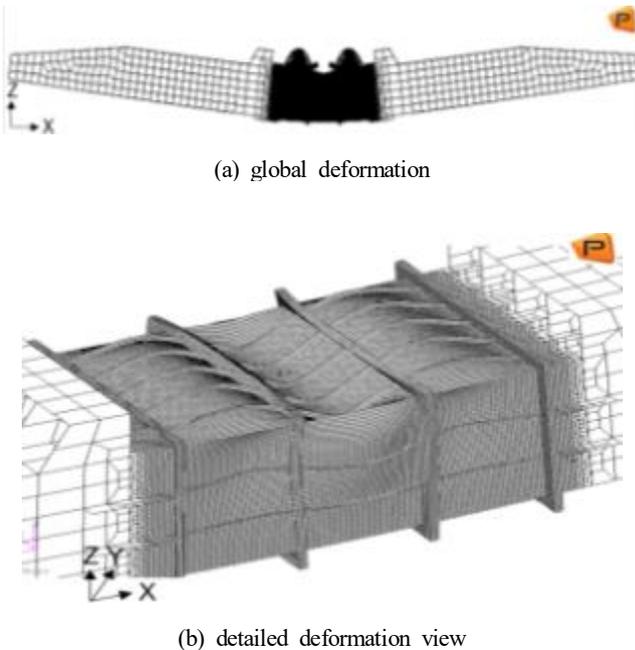


Fig. 13. Deformed shape under bending moment (stiffener width = 400 mm).

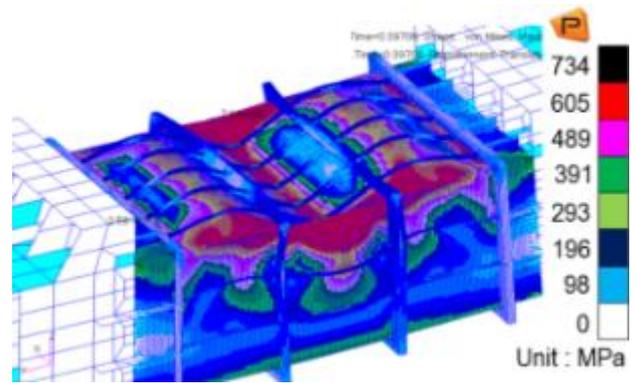


Fig. 14. Von-mises stress contour under bending moment (stiffener width = 400 mm).

#### 4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 선박 및 해양구조물에서 주로 사용하고 있는 박스구조물의 좌굴 및 소성 붕괴 거동을 예측하기 위하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 절차 및 결과에 대한 검증을 위하여 참고 문헌에서 수행한 실험 결과와 비교 하였으며 세 가지 초기 처짐 패턴과 최대 진폭에 관한 결정을 통하여 거동을 잘 추적할 수 있는 결과를 확인하였다. 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- [1] 박스거더의 순수 굽힘 모멘트 전달을 위하여 상단부 하중 제어부는 강제 요소를 적용하였다. 이 효과를 적용하지 않으면, 시트부가 하중 분산 효과가 발생하여 결과에 영향이 미치게 된다.
- [2] 경계조건 영향을 최소화하기 위하여, 전체 모델을 이용하며, 전체거동 형상이 잘 확인되었다.
- [3] 보강재의 폭이 짧을수록 최종강도는 높게 나타나지만, H200 모델에서만 비대칭적인 좌굴 붕괴 패턴이 발생하였다. 박스거더의 최종강도 수치를 높이기 위해서는 보강재 폭 결정 시 주의해야 한다.
- [4] 횡보강재의 폭이 300 mm 모델에서 최종강도 지점에서의 붕괴 패턴은 판과 보강재의 대칭적인 판넬좌굴 형상을 보여주고 있다. 이러한 경향은 폭 400 mm 모델에서와 같다.
- [5] 측면부 판넬도 연쇄적으로 면내 강성 감소가 발생하여 가장 낮은 최종강도를 보인다.

향후 연구과제로서는 용접에 의한 잔류응력과 계측된 초기 처짐 구조해석에 반영하여 하중 변화에 따른 박스거더의 붕괴 거동을 예측할 수 있는 평가식을 개발하는 것이다. 이를 위해서는 박스거더의 구조 강도 실험이 절대적으로 필요하다.

## 사 사

This research was 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] Ao, L. and D.-Y. Wang(2016), Ultimate Torsional Strength of Cracked Stiffened Box Girders with a Large Deck Opening, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 8, pp. 360-374.
- [2] Dow, R. S.(1991), Testing and Analysis of a 1/3-Scale Welded Steel Frigate Model, *Proceedings of International Conference on Advances in Marine Structures*, Dunfermline Scotland, pp. 749-773.
- [3] Gordo J. M. and C. Guedes Soares(2009), Tests on Ultimate Strength of Hull Box Girders made of High Tensile Steel, *Marine Structures*, Vol. 22, Issue 4, pp. 770-790.
- [4] Hu, K., P. Yang, T. Xia, and Z. Peng(2018), Residual Ultimate Strength of Large Opening Box Girder with Crack Damage under Torsion and Bending Loads, *Ocean Engineering*, Vol. 162, Issue 15, pp. 274-289.
- [5] IACS(2020), *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers*, Chapter 5-Hull Girder Strength, Section 2, pp. 342-347.
- [6] Lee, H. G. and J. S. Lee(2006), On the Ultimate Longitudinal Strength Assessment of Ship's Hull Structure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 43, No. 3, pp. 340-350.
- [7] MSC Software(2012), *Patran 2012 User's Guide*, Chapter 6-, Material modeling, pp. 125-136.
- [8] Paik, J. K. and A. K. Thayamballi(1997), An Empirical Formulation for Predicting Ultimate Compressive Strength of Stiffened Panels, *7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, USA, Vol. 4, pp. 328-338.
- [9] Paik, J. K., B. J. Kim, and J. K. Seo(2008), Methods for Ultimate Limit State Assessment of Ships and Ship-shaped Offshore Structures : Part 3 Hull Girders, *Ocean Engineering*, Vol. 35, Issue 2, pp. 281-286.
- [10] Quispe, J. P., S. F. Estefen, Marcelo Igor Lourenço de Souza, J. H. Chujutalli, Diogo do Amaral M. Amante, and T. Gurova (2022), Numerical and Experimental Analyses of Ultimate Longitudinal Strength of a Small-scale Hull Box Girder, *Marine Structures*, Vol. 85, pp. 26-32.
- [11] Saad-Eldeen, S., Y. Garbatov, and C. Guedes Soares(2010), Experimental Assessment of the Ultimate Strength of a Box Girder Subjected to Four-Point Bending Moment, *11<sup>th</sup> International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, pp. 1134-1143.
- [12] Smith, C. S.(1976), *Compressive Strength of Welded Steel Ship Grillages*, RINA Transactions, Vol. 118, pp. 325-359.
- [13] Smith, C. S.(1977), Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of A Ship's Hull, *Proceedings of 3rd International Symposium on Practical Design in shipbuilding*, Tokyo, pp. 73-79.
- [14] Zhong, Q. and D. Wang(2022), Numerical Investigation on Ultimate Strength of Sandwich Box Girders under Vertical Bending and Torsion, *Ocean Engineering*, Vol. 254, No. 15, pp. 125-132.

---

Received : 2023. 05. 23.

Revised : 2023. 06. 26. (1st)

: 2023. 07. 13. (2nd)

Accepted : 2023. 08. 29.