

## 선박의 docking 시 반력 계산 및 구조 안전성 평가법에 관한 연구

전민성<sup>\*\*</sup>, 서용석<sup>\*</sup>, 허기선<sup>\*</sup>, 정성욱<sup>\*</sup>, 박승문<sup>\*</sup>, 조현규<sup>\*</sup>

삼성중공업 조선해양연구소

### A Study on Structural Safety Assessment for Docking Condition

Min Sung Chun<sup>\*\*</sup>, Young Suk Suh<sup>\*</sup>, Ki Sun Hur<sup>\*</sup>, Sung Wook Chung<sup>\*</sup>,  
Seung Mun Park<sup>\*</sup> and Hyun Kyoo Cho<sup>\*</sup>

Marine Research Institute, Samsung Heavy Industry Co. Ltd.\*

#### Abstract

The objective of this paper is to find out a reasonable method for docking analysis of ships. The characteristics of reaction force distribution under docking condition are investigated by carrying out parametric study. To assess the allowable reaction force on keel block from structural strength point of view, two kinds of structural assessment methods are proposed in accordance with expected collapse pattern. In order to verify the proposed method, linear buckling and elasto-plastic large deflection analyses of typical double bottom structure are carried out and the results are compared.

※Keywords: Docking, Keel block, Floating dock, Buckling, Ultimate strength

#### 1. 서론

구조 강도 관점에서 선박의 설계는 선박의 운항 중 조우할 수 있는 가장 극한 하중을 예측하고 이에 대한 구조물의 강도를 평가 함으로서 이루어진다. 대부분의 경우, 이러한 하중과 강도 평가는 선박의 인도 후 운항상태를 대상으로 하고 있으며, 선급 협회에서 제시하고 있는 간이 식을 이용하거나 또는 정해진 구조해석 절차에 따라 수행이

되고 있다. 그러나 조선산업의 발달과 더불어 생성 향상을 도모하기 위한 여러 가지 새로운 시도들이 이루어짐에 따라 생산단계에서 그 동안 경험하지 못했던 새로운 품질사고의 위험이 나타나고 있다. 예를 들면 생산 일정의 단축을 위하여 블록이 대형화 됨에 따라 블록 인양 시 좌굴, 소성변형 등의 위험성이 증가하고 있으며, 진수 기간 단축을 위하여 진수 시 trim 조건을 완화함에 따른 선각의 국부적인 손상의 위험성도 증가하고 있다. 이러한 손상 위험을 회피하기 위하여 설계자는 설계 단계에서부터 생산과정 중에 발생할 수 있는 구조 손상의 위험 요소를 예견하고 이에 대한 대

†교신저자: minsung.chun@samsung.com,  
055-630-8859

비를 하여야 한다. 이러한 관점에서 docking 시 반목으로부터 전달되는 국부적인 집중하중에 대한 구조안전성 검토는 매우 중요한 관심사가 되고 있다. 그 동안 현장에서는 이러한 반목에 발생하는 반력으로 인한 구조 손상이 종종 발생하고 있었으나 대부분 제품이 인도되기 전 생산 단계에서 발생하는 문제였으므로 현장에서 적절한 수리조치를 통하여 문제를 무마시켜 오고 있었다. 그러나 이러한 품질 사고는 고객의 신뢰를 크게 저하시키는 결과를 초래하므로 장기적인 관점에서 매우 부정적인 영향을 미치게 된다.

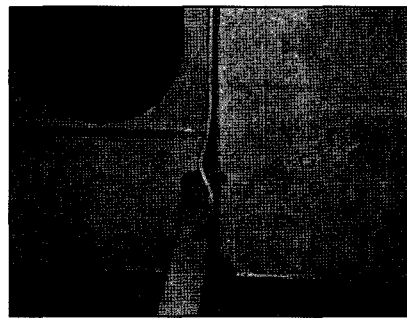
Lloyd 선급(1983)에서는 나무 반목의 평균 강성을 6ton/mm 인 spring 으로 고려하여 VLCC 에 대한 grillage 해석을 수행하였다. 최중효 등(2002)은 MSC.ACUMEN 을 이용하여 docking 해석을 효율적으로 수행하는 프로그램을 개발하였으며, 이 때 반목은 spring 으로 이상화 하였다. 또한 허용하중은 실험적으로 구한 반목의 허용하중 500ton/m<sup>2</sup> 을 사용하였으며, 선체의 허용하중은 해석 결과로부터 나온 응력 값과 재료의 항복응력을 바탕으로 적절한 허용응력을 산정하여 사용하였다. 그러나 이러한 연구 결과들에도 불구하고 docking 시 발생할 수 있는 손상의 원인을 체계적으로 파악하고 나아가 품질 사고의 예방과 생산성 향상의 관점에서 최적의 반목 배치를 이끌어 내기 위한 연구가 아직도 부족한 것으로 사료된다.

따라서 본 고에서는 docking 시 발생하는 손상의 원인을 파악하고 각 반목에 발생하는 반력의 분포 양상을 분석하였으며, 또한 반목의 모델링 방법 및 선체 손상을 방지하기 위한 허용 반력의 크기를 산정하는 방법을 제시하였다.

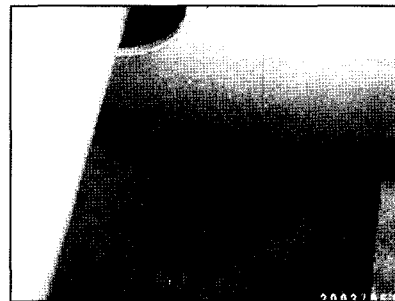
## 2. Docking 시 발생하는 손상 형태

Docking 에 의한 손상은 크게 선체의 손상과 반목 자체의 손상으로 생각될 수 있다. 그러나 선체의 손상을 유발시키지 않는 반목 자체의 손상은 크게 문제 될 것이 없으므로 여기서는 주로 선체의 손상에 대하여 논하기로 한다. Fig.1 은 docking 시 발생한 대표적인 선체의 손상형태를

보여주고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 docking 에 의한 손상은 slot hole 주변 web 의 좌굴 또는 종보강재 상부 vertical stiffener 의 좌굴과 같은 국부적인 손상이 대부분이다. 이러한 손상은 반목으로부터 유발되는 하중이 선체의 내구력 보다 클 때 발생하게 되므로 docking 시 발생할 수 있는 구조 손상의 유무를 판단하기 위하여는 반목에 발생하는 반력과 선체구조의 내구력을 잘 예측하여야 한다.



(a) Buckling of vertical



(b) Buckling of transverse web

Fig. 1 Typical shape of damage due to the docking

## 3. 반력 분포 특성 고찰

먼저 실제 문제에 있어 반목에 의한 하중을 예측하기 어려운 가장 큰 원인은 다양한 현장 조건에 있다. 즉 현장 작업 시 여러 가지 이유로 인하여 도면상의 반목 위치와 실제 설치된 반목 위치가 다를 수 있다는 것이다. 조사에 따르면 특별한

관리를 하지 않은 상태에서 반목의 위치가 도면과 일치하는 경우는 30~40% 정도이며, 전체 반목의 개수도 약 75~80% 정도 수준에서 설치되는 경우가 많았다. 이러한 불일치는 생산 공정과 밀접한 연관을 가지므로 초기 설계단계에서 현장의 작업 조건을 세심하게 고려하여 반목 배치도를 만들 필요가 있으며, 동시에 현장 작업자도 반목 설치 시 도면에 따라 설치가 될 수 있도록 노력을 하여야 한다. 이러한 관리문제를 제외하고 기술적인 측면에서 반력분포의 예측에 오차를 발생시킬 수 있는 원인은 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 1) 하중분포의 불확실성에 따른 오차
- 2) 모델링 방법에 따른 오차
- 3) 사용된 반목의 강성의 차이에 따른 오차
- 4) floating dock의 구조배치에 따른 오차

일반적으로 구조해석 단계에서 주어지는 선박의 하중은 선박의 길이방향 하중분포로만 주어지며, 폭 방향과 높이 방향의 하중분포는 주어지지 않는다. 따라서 docking 해석을 수행하기 위하여는 횡방향 하중분포를 가정하여야 하며, 이로 인한 오차는 모델링 방법에 따라 달라질 수 있다. 전선모델을 이용하여 해석을 수행한다면 모델에 가해지는 하중분포가 실제의 하중분포와 유사하게 되도록 모델을 정확히 만들어야 하며, grillage 모델을 이용하여 해석을 한다면 선체의 단면형상과 격벽의 배치를 고려하여 하중을 적절히 분배하여야 한다. Fig. 2는 grillage 모델과 shell 요소를 이용한 전선모델을 이용하여 얻은 반력의 분포 양상을 보여주고 있다. 전선모델의 경우 요소 크기의 제한으로 선수미에 위치한 반목은 2~5개의 반목이 하나의 spring 요소로 모델링 됨에 따라 선미 끝에 있는 반목에서 반력이 크게 나타난다. 이를 고려하여 최대 반력을 비교하면 grillage 모델의 경우 272 ton이며 전선모델은 380ton (=1900/5)이 된다. 이러한 차이는 grillage model에 하중을 어떻게 분배 시키느냐에 따라 크게 영향을 받는다. 또한 grillage 모델은 선체를 beam으로 이상화하여 모델링 하는 것이므로 선체의 강성을 어떻게 구현

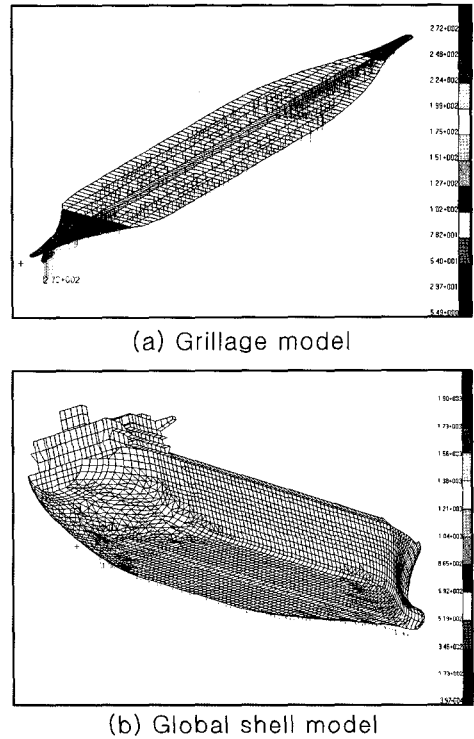


Fig. 2 Reaction force distribution for grillage model and global shell model

하느냐에 따라서도 반력분포는 달라질 수 있다. 그러나 dry dock에 대한 docking 해석을 수행하는 경우 선체의 변형에 의해 유발되는 반력의 증강량이 작으므로 beam의 강성이 충분히 크게 되도록 모델링을 하면 반력분포의 차이는 작게 나타날 수도 있다.

Docking 시 사용되는 반목은 조선소의 여건에 따라 다를 수 있지만 대체적으로는 콘크리트 상부에 나무를 놓는 나무반목이 주로 사용되고 있고 그 외 steel 구조 상부에 합성수지 제품인 테프론을 놓는 steel 반목이 있다. Fig. 3은 대표적인 나무반목과 steel 반목의 형상을 보여준다. Steel 반목을 사용하는 주된 이유는 나무반목 사용 시 반목의 과도한 변형으로 인하여 탑재 단계에서 정도 관리에 어려움을 주는 경우가 종종 발생하는데 steel 반목에 사용되는 테프론은 나무보다 spring 상수가 약 10 배 정도 커서 탑재 시 수축이 작게

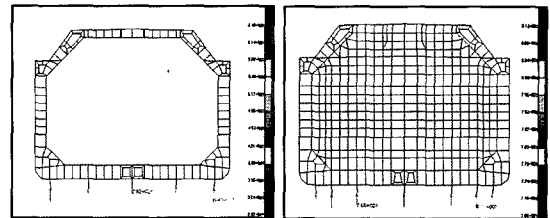
발생하여 블록조립 시 정도 관리에 도움이 되기 때문이다. 그러나 steel 반목의 사용은 나무 반목보다 반력이 크게 발생하는 단점도 가진다. 이는 spring 상수가 큰 재질을 사용함으로 인하여 하중의 집중현상이 더 크게 나타나기 때문이다. 특히 나무반목과 steel 반목을 혼용하여 사용하는 경우, 하중은 spring 강성이 큰 steel 반목에 크게 집중하여 발생하게 된다.

Fig. 4는 docking 해석 시, 나무 반목을 사용할 때와 steel 반목을 사용할 때 반력분포의 차이를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 steel 반목을 사용하면 선측과 중앙의 반력 편차가 커지고 강성이 큰 T.BHD 에서의 반력이 web 보다 커지게 된다. 따라서 docking 시 반력분포를 정도 높게 예측하기 위하여는 사용되는 있는 반목의 물성치에 대한 정확한 정보가 있어야 한다. 반목의 물성치는 그 편차가 커서 각 반목 하나하나에 대한 물성치를 다 고려하는 것은 현실적으로 어렵지만 대표적이라 생각되는 몇 가지 경우에 대하여 수행된 실험결과를 이용 하는 것이 일반적이다. Table 1은 실험으로부터 구해진 나무반목과 steel 반목의 탄성계수와 spring 상수를 보여주고 있다. 이 값들은 하부 콘크리트나 steel 구조는 강체라고 가정하여 계산된 값이며, 나무반목과 테프론 모두 보수적인 관점에서 평가를 하기 위하여 초기 선형구간의 탄성계수를 취하여 spring 상수를 계산하였다. 나무 반목의 경우, 사용 년 수에 따라 그 특성이 달라 질 수 있으나 이를 고려하여 docking 해석을 수행하는 것은 현실적으로 우리가 있으므로 여기서는 고려하지 않았다.

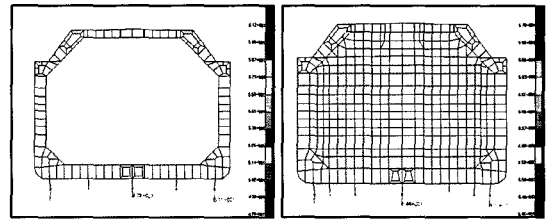
Floating dock 에서 선박을 건조하는 경우는 floating dock 의 구조배치 및 floating dock 의 변형 형상에 따라라도 반력의 분포가 달라 질 수 있다. 즉, dry dock 는 도크 바닥의 강성이 크고 전연적에 걸쳐 강성이 일정하다고 가정 할 수 있으므로 바닥의 조건에 따라 반목에 발생하는 반력의 크기가 변하지 않는다. 그러나 floating dock 는 대부분 횡프레임 또는 종거어더와 종보강재로 구성된 grillage 구조로 되어 있으므로 반목하부의 구조의 배치에 따라 바닥의 강성이 크게 다르다. 그러



(a) Wooden keel block (b) Steel keel block  
Fig. 3 Photo of a wooden keel block and a steel keel block



(a) Steel keel block used



(b) Wooden block used

Fig. 4 Reaction force distribution for wooden keel block and steel keel block

Table 1 Mechanical characteristics of wooden and steel keel block

구분		E <sup>2)</sup> (Mpa)	면적 (cm <sup>2</sup> )	높이 (mm)	K <sup>3)</sup> (kN/mm)
나무반 목	평 <sup>1)</sup>	142.6	4800	120	83.4
	조립 <sup>1)</sup>	64.9	4320	220	
	웨이 <sup>1)</sup>	223.6	5600	300	
테프론	중앙	360.6	2800	100	1,009.7
	선측	360.6	3500	150	841.4

- 주 1) 평=평반목, 조립=조립반목, 웨지=웨지반목
- 2) E = 탄성계수
- 3) K = spring 상수

므로 구조해석 시 반목의 spring 효과 뿐만 아니라 바닥의 spring 효과까지 고려해 주어야 한다. Fig. 5 는 floating dock 바닥의 구조에 따른 반력의 크기를 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 반목 하부에 강성이 큰 종거어더나 횡프레임이 위치하는 경우(Position 1) 반력이 크게 발생하고 횡프레임 사이의 종보강재 상에 위치한(Position 2) 반목에서는 반력이 작게 발생한다. 본 그림의 결과는 반목이 1 차원 spring 요소로 이상화 됨에 따라 결과가 다소 과장되었다고 할 수 있으나 안전측의 설계 관점에서는 합리적인 결과를 준다고 생각할 수 있다.

또한 floating dock의 변형에 의하여 반력 분포가 바뀔 수 있다. 만약 floating dock의 변형이 hogging 이 된다면 상대적으로 강성이 큰 선체는 floating dock 보다 작은 변형을 가지게 되어 결국 선수가 부분의 반력은 줄고 중앙부의 반력은 증가하는 현상이 발생한다. Fig. 6 은 floating dock center line의 변형형상에 따른 최대 반력의 차이를 보여준다.

이 밖에 docking 시 발생하는 반력의 크기에 영향을 미치는 인자로서 온도차이, 반목 외의 지지구조의 영향, 진수 시 trim 에 의한 반력의 증가 등 여러 가지가 있을 수 있으나 상대적으로 그 효과가 크지 않을 것으로 생각되며, 또한 이러한 모든 것을 고려하여 반력을 예측하는 것은 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 이러한 인자들의 효과는 결과 평가 단계에서 안전율에 포함시켜서 처리하도록 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

#### 4. 선체의 내구력 계산 방법

Docking 해석 시 선체구조의 내구력을 평가하기 위하여는 반목이 놓이는 위치의 구조 배치에 따른 손상의 형태를 예측하고 이에 따른 적절한 계산을 통하여 내구력을 계산하여야 한다. 선체의 내구력

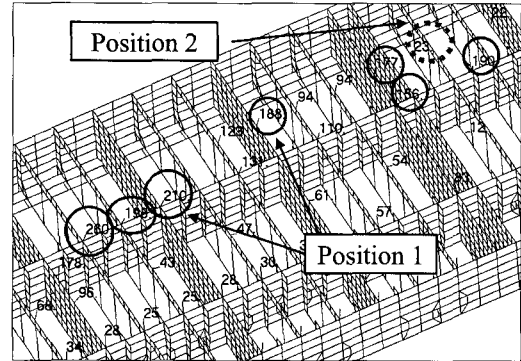


Fig. 5 Reaction force distribution on floating dock

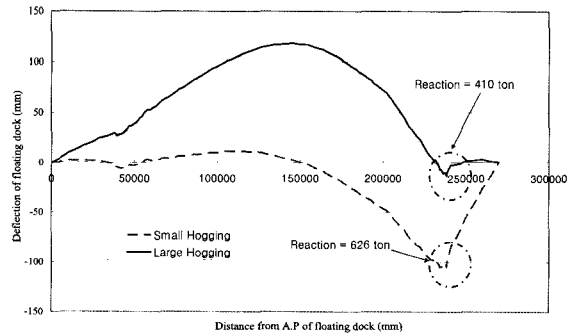


Fig. 6 The maximum reaction force in accordance with deflection of floating dock

을 계산하는 방법에 따라 반목이 놓이는 위치는 Fig. 7 에서 보이는 바와 같이 web 와 종통보강재 연결지점에 반목이 놓이는 경우(Case 1)와 거어더와 web 의 연결 부위에 반목이 놓이는 경우(Case 2)로 대별될 수 있다. 이 두 가지 경우는 구조손상이 발생하는 양상이 서로 다르므로 내구력도 다른 관점에서 평가 되어야 한다. 따라서 여기서는 각각의 경우에 대하여 구조강도를 평가하는 방법을 제시하고 이에 대한 유용성을 검증하였다. 이를 위하여 MSC.NASTRAN 을 이용한 선형탄성좌굴 해석 및 탄소성 대변형 해석을 수행하였다.

#### 4.1 Web 와 종통보강재 연결부의 내구력 평가

Web 와 종통보강재 연결부에 반목이 위치하는

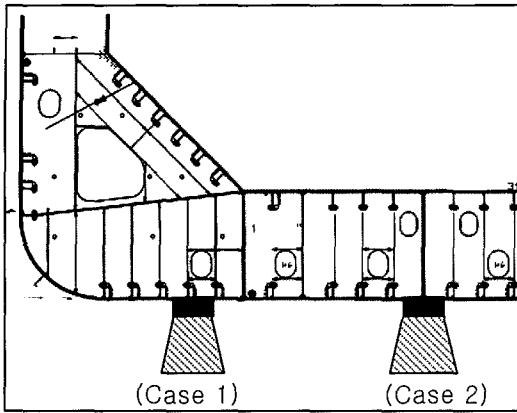


Fig. 7 Typical arrangement keel block and ship structure

경우(case 1)에 예상되는 구조 손상은 web 또는 vertical stiffener 의 좌굴이다. 특히 web 에는 slot hole 을 비롯한 구멍이 존재 하므로 이에 대한 효과를 고려한 좌굴강도 평가를 수행하여야 한다. Web 에 대한 내구력을 평가하기 위하여는 3 차원 모델에 대한 좌굴을 포함한 최종강도 해석을 수행하여야 하나 실용적인 측면에서 2 차원 모델을 이용하여 탄성좌굴 강도를 계산한 후 적절한 소성수정을 통하여 임계좌굴하중을 구하는 방법을 제안한다. 이 때 소성 수정은 아래와 같이 Harada and Fujikubo(2002)가 제안한 방법을 이용하였다.

$$P_{ye} = \left\{ (b - b_{slot}) \times t_w + A_s \right\} \times \sigma_y \quad (1)$$

여기서,  $P_{ye}$  는 반목으로부터 유발되는 하중에 의해 web 의 소성항복 하중이고  $b$  는 반목의 폭이며  $b_{slot}$  은 slot hole 의 폭이다. 또한  $t_w$  는 web 의 두께 이고,  $A_s$  는 vertical stiffener 의 단면적이며,  $\sigma_y$  는 재료 항복응력이다.

식 (1)을 Johnson-Ostenfelt 의 소성 수정식에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$P_{cr} = P_{ye} \times \left( 1 - \frac{P_{ye}}{4 \times P_{Ecr}} \right) \quad (2)$$

여기서  $P_{cr}$  은 임계좌굴하중 이고,  $P_{Ecr}$  은 탄성좌굴 하중으로서 탄성좌굴 해석을 통하여 구할 수 있다. Fig. 8 과 Fig. 9 는 2 차원 모델에 대한 탄성좌굴 강도 계산을 수행한 결과와 3 차원 모델을 이용하여 탄소성 대변형 해석을 수행한 후 최종강도 상태에서의 결과를 보인다. Fig.10 은 소성수정을 한 후의 임계좌굴하중과 탄소성 해석으로부터 나온 하중과 변형의 관계를 보여 준다. 2-D 해석을 통하여 구해진 반목하중에 대한 web 의 임계좌굴강도는 최종강도의 약 50~60% 정도가 되며, 이러한 차이는 식 (2)에서 제시하고 있는 소성수정 식이 좌굴강도를 다소 과소평가 함으로서 발생하는

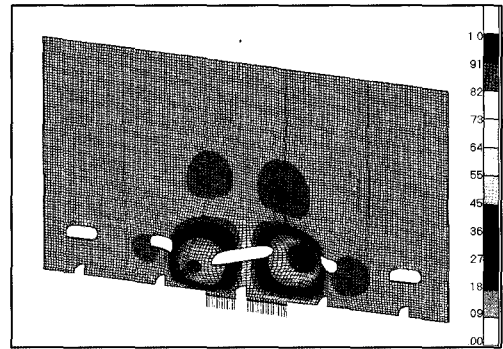


Fig. 8 A Result of linear elastic buckling analysis for 2-dimensional F.E model ( $P_{ye} =427$ )

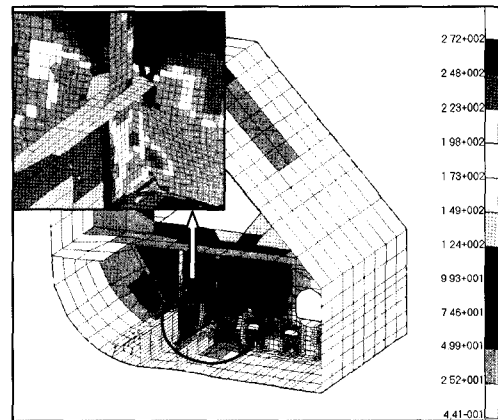


Fig. 9 von-Mises stress distribution at ultimate strength load step of web plate (N/mm<sup>2</sup>)

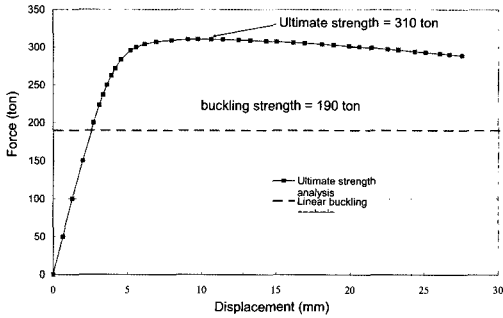


Fig. 10 Comparison for ultimate strength of 3-D model and critical buckling strength of 2-D model

것으로 판단되나 하중의 불확실성을 고려하여, 안전 측의 관점에서 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 Web 와 종거어더 연결부의 내구력 평가

Fig.7 의 case 2 와 같이 web 와 종거어더의 연결부에 반목이 설치되는 경우는 좌골 보다 반목 주변의 국부적인 소성이 더 큰 문제가 될 수 있다. 따라서 이런 경우에 대한 허용하중을 평가하기 위하여 Fig. 11 과 같이 반목의 방향에 따라 web 와 girder 의 두께를 바꾸면서 최종강도 해석을 수행하였다.

Fig. 12 는 최종강도 해석에 사용된 모델의 형상과 최종강도 상태에서의 전형적인 변형 및 응력 분포를 보여준다. Table 2 는 최종강도 해석결과를

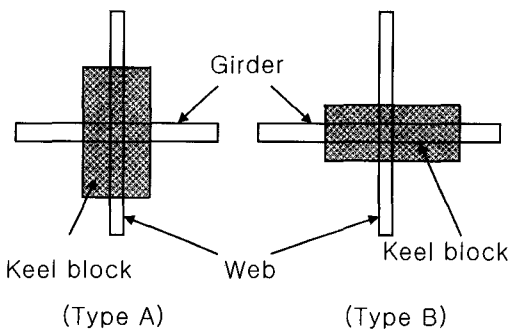


Fig. 11 Typical arrangement of keel block at intersection of girder and web

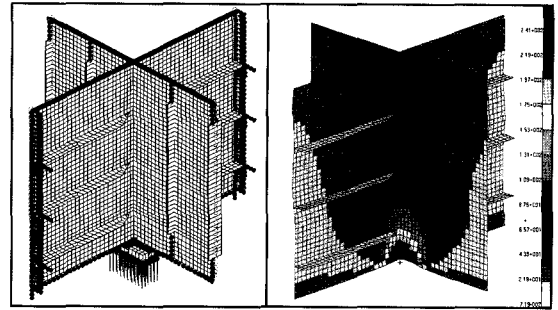


Fig. 12 The model used in elasto-plastic large deflection analysis of double bottom structure

Table 2 Result of elasto-plastic large deflection analysis for case 2

$t_w$ (mm)	$t_g$ (mm)	$P_y$ (ton)	Type	$P_u$ (ton)
13	15	353	A	388
13	15	371	B	410
13	17	370	A	396
13	17	406	B	464
13	19	387	A	400
13	19	441	B	518
15	17	405	A	465
15	17	423	B	483
17	17	440	A	530
17	17	440	B	499

정리하여 보여준다.

여기서, 반목의 길이는 730mm, 반목의 폭은 350mm 이며,  $t_w$  는 web 의 두께,  $t_g$  는 종거어더의 두께,  $P_u$  는 최종강도이다. 이 때 항복응력은 모두  $235 \text{ N/mm}^2$  이고,  $P_y$  는 전단면 소성강도로서 다음과 같이 정의 된다.

$$P_y = \sigma_y \times (t_w \times l + t_g \times b) \quad \text{for Type A}$$

$$P_y = \sigma_y \times (t_g \times l + t_w \times b) \quad \text{for Type B}$$

Table 2 에 따르면 최종강도는 전단면 소성강도

보다 약 5~15% 정도 크게 나타난다. 따라서 하중의 불확실성을 고려해 전단면 소성강도의 70%을 허용하중으로 한다면 실용적으로 사용할 수 있는 값이라 사료된다. 따라서 이 경우에 대한 허용 하중은 아래와 같이 근사적으로 계산될 수 있다.

$$P_{allowabl} = \sigma_y \times (t_g \times l + t_w \times b) \times 0.7 \quad (3)$$

5. 결론

본 연구에서는 선박의 docking 시 반력에 발생하는 반력의 분포 특성을 분석하고 반력의 위치와 선체구조의 형상에 따라 선체의 내구력을 평가하는 방법을 제시하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) Docking 시 반목에 발생하는 반력의 분포를 평가하기 위해서는 하중 분포에 대한 정확한 정보가 필요하다. 특히 grillage 모델을 이용하여 해석을 한다면 종방향 뿐 아니라 횡방향의 하중분포도 알아야 한다.

2) 반목의 종류에 따라 반력의 크기는 크게 달라질 수 있다. 특히 steel 반목과 나무반목을 혼용하여 사용하면 steel 반목에 하중이 집중되어 구조손상의 위험이 더 커진다.

3) Floating dock 에 docking 을 하는 경우에 대하여는 선체와 같이 floating dock 도 탄성체로 모델링을 하여야 하며, floating dock 의 구조배치와 변형량에 대한 고려를 하여 반력 계산을 수행하여야 한다.

4) 선체의 내구력 계산 시 선체에 발생하는 응력의 크기뿐만 아니라 안전성을 평가할 수 없다. 즉 반목이 놓이는 곳의 선체 구조 배치에 따라 계산 방법이 달라야 한다. 본 연구에서는 반목이 놓이는 위치에 해당하는 선체의 구조 배치에 따라 두 가지의 손상 패턴을 가정하여 이에 대한 허용 반력을 계산하는 방법을 제안하였다.

5) 본 연구에서 제안하는 방법에 따라 계산하는 경우 허용 반력의 크기는 최종강도 대비 50~65% 정도의 수준이며, 이는 외력에 대한 불확실성을 감안하여 설계에서 실용적으로 적용할 수 있는 방법이라 생각된다.

참 고 문 헌

- 최종효, 오상현, 장창환, 전민정, 2002, " Docking 해석 시스템 개발," Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Busan, November, pp. 437-442.
- Minoru Harada and Mashiko Fujikubo, 2002, " Estimation of Buckling and Ultimate Strength of Rectangular Plate with Cutout," Proceeding of The Twelfth, International Offshore and Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japan, May 26-31.
- Lloyd, 1983, " Lloyd' s Register' s Plan Appraisal Systems for Ships-ship Type Procedural Documents for Oil Tankers, STPD"



< 전민성 >



< 서용석 >



< 허기선 >



< 정성욱 >



< 박승문 >



< 조현규 >