격자구조모델을 이용한 선체 PE블록의 반목 반력 해석 시스템 개발

류철호* · 김성찬* · 김동근**

*인하공업전문대학 조선해양과

**대우조선해양(주)

Three-Dimensional Grillage Analysis of Reaction Forces on Supports of Pre-Erection Block

Cheolho Ryu*, Sungchan Kim* and Dong Geun Kim**

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea

**Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering Co., LTD., Geoje, Gyungsangnam-do, Korea

KEY WORDS: Pre-erection block PE블록, Support reaction 반목반력, Grillage analysis 격자구조해석, Weight distribution 중량분포

ABSTRACT: Many PE (pre-erection) blocks are supported by wooden, concrete, or steel supports when they are stocked in the outdoor areas of a shipyard. Their positions and numbers are planned on the basis of the workers' experience. Recently, many shipyards have been making PE blocks with various shapes and weight distributions because of the variety of ships and building technologies. Therefore, it is now necessary to deal with blocks that they have no experience with. We propose a method to conveniently and quickly evaluate the structural safety of PE block supports, without the need for special knowledge and technology related to structural analysis. This method can reduce the large number of man hours (MH) normally needed for the analysis. The three-dimensional grillage analysis is performed for a simplified grillage model of a PE block. For efficiency, the grillage model of the PE block is automatically built from its three-dimensional CAD model, and its weight is also automatically distributed on the grillage model. The integrated system has been comprehensively implemented to perform the grillage analysis for the reaction forces on block supports. This paper describes how to make a grillage model of a PE block and estimate the weight distribution of the block on this grillage model. These steps are verified by comparing the supports reaction forces to those of the 3D finite element analysis for the PE blocks that are provided by a shipyard.

1. 서 론

선박의 건조 시 야드에는 수많은 선행탑재(Pre-erection, PE) 블록이 산재해 있고 그 블록들은 Fig. 1과 같이 각종 반목(Support)에 의해 지지되어 진다. PE블록 반목 계획에서 주요 결정 인자는 지지 반목의 개수와 위치로 생산지원부 담당자의 경험을 토대로 판단되고 결정되어 왔다. 도크에 탑재되는 블록의 중량과 구조는 매우 다양하기 때문에 지지 반목의 위치나 조건 등은 그것에 따라 다르게 결정되어야 한다. 조선소가 다양한 선종의 수주를 늘림에 따라 처리되는 블록의 중량과 구조는 더욱 더 다양성이 증가하고 있다고 할 수 있다. 그리고 최근 선박의 대형화 추세와 조선소의 경쟁력 및 생산성 향상을 위한 공법 개발 노력으로 메가블록(Mega block), 테라블록(Tera block)과 같이 점진적으로 블록이 대형화됨에 따라 지금까지 경험해 보지 못한

Fig. 1 A figure of supporting mega blocks

Received 13 May 2013, revised 24 June 2013, accepted 12 August 2013

Corresponding author Cheolho Ryu: +82-32-870-2173, cheolho_ryu@inhac.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is translated and revised edition based on proceedings of OMAE 2013 in Nante, France.

블록이 발생하게 되었다. 이러한 선박 건조 환경에서 블록 반목의 합리적인 배치에 대한 평가에 더욱 많은 MH(Man-Hours)가 소요되고 있다. 이러한 상황을 극복하기 위하여 보다 합리적이고 간편한 방법으로 반목에 작용하는 반력을 구하여 PE블록에 충분한 안전성을 확보하고자 하는 요구가 빈번히 발생하고 있다. 그리고 산업현장의 안전에 관한 요구가 보다 강화되고 있기 때문에 블록의 반목 배치에 대한 구조 안정성 평가는 반드시 필요한 과정이라고 할 수 있다.

3차원 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)은 PE블록 반목 배치계획의 구조 안정성을 평가하기 위한 강력한 방법이 될 수 있다. 선박의 구조 성능을 평가하기 위해 구조 설계 단계에서 전선에 대한 3차원 FEA는 널리 사용되고 있기 때문에 블록 반목 배치 해석을 위한 대상 블록의 유한요소 모델을 용이하게 확보할 수도 있다. 그러나 구조설계로부터 지원을 받지 못하는 경우, 블록의 유한 요소 모델을 만들기 위해 상당한 시수가 소요되기 때문에 신속한 반목 배치 계획을 수립할 수 없다. 모든 블록의 반목에서 반력 계산을 위해 FEA를 수행하게 되면 많은 비용이 발생하게 될 것이다. 또한 FEA에 대한 전문 지식과 기술이 필요하기 때문에 외부 전문가의 지원이 필요하게 된다. 생산지원부에서 반목 배치 전에 해당 반목 배치 계획의 구조 안정성 검증을 위해 쉽고 빠르게 적용하고자 하는 목적에는 부합되지 않는다.

PE블록의 반목 배치와 관련한 연구 사례는 찾기가 쉽지 않다. 그러나 선박의 도크 반목에 관한 연구로부터 그 실마리를 찾을 수 있다. 도킹 시 구조부재의 안전성과 반목배치의 타당성을 검증하기 위해서 국내 조선사들은 이미 3차원 전선해석 모델을 이용한 도킹(Docking) 해석 시스템을 구축하여 사용하고 있다(Choi et al., 2002; Chun et al., 2006; Chun and Seo, 2007). 또한 도킹 해석에서 앞서 언급한 3차원 유한요소해석을 이용하였을 때의 문제점을 극복하기 위해 격자구조모델을 이용한 간이 해석 방법을 개발하여 현업에서 쉽고 빠르게 선박의 도킹 반목 배치 계획을 수립하는데 활용하고 있다. Kim et al.(2008)은 도크 반목 반력 계산을 위한 연구에서 3차원 유한요소해석을 통해 반목해석의 신뢰성을 높일 수 있지만, 격자구조(Grillage) 모델을 활용한 간이 해석만으로도 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있음을 밝히고 있다. 그들은 3차원 유한요소해석과 격자구조해석(Grillage analysis)으로 구한 도크 반목 반력을 비교함으로써 신뢰성을 검증하였다. 반목 배치의 구조 안정성은 반목에서 반력을 검토하는 것으로 충분한 평가가 이루어질 수 있으며, 선체 구조 부재에 대한 추가 검토가 필요한 경우 해당 반력에 대한 상세 구조해석을 실시하는 것이 효과적임을 제안하였다.

본 논문에서는 도크반목해석시스템 개발의 경험을 바탕으로 PE블록의 격자구조모델을 이용한 간이해석(Grillage analysis) 방법과 그 시스템의 개발에 관하여 연구를 수행하였다. PE블록 반목 해석은 도크 반목해석과 유사한 절차를 가지고 있으나 선박 전체를 다루는 것이 아니기 때문에 PE블록의 설계 정보를 직접 다룰 수 있고 이에 따라 중량분포를 계산하는 방법에 차이가 있다. 본 연구는 구조강도해석을 전문적으로 다루지 않는 실무자가 간단한 작업을 통하여 PE블록 반목의 배치를 유연하게 수행하면서 강도평가를 수행할 수 있도록 전용 해석시스템을 구축하는데 목적을 두고 있다. 간이 해석을 이용한 PE블록 반목 해석 절

차에 대해서 정의하고 PE블록의 3차원 설계 데이터로부터 격자 구조를 생성하는 방법, PE블록의 무게를 추정하고 그 격자 구조에 무게를 분포시키는 방법에 대한 연구가 수행되었다. 그리고 블록 반목의 간이 해석 결과를 3차원 FEA 결과와 비교를 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 격자 모델의 생성, 하중 분포 계산, 간이 구조해석, 해석 결과 조회 및 분석을 일관적으로 수행할 수 있는 통합 시스템을 개발하여 현업 실무자가 쉽고 빠르게 PE블록의 반목 배치의 구조 안정성을 평가할 수 있도록 하였다.

2. PE블록 반목 해석 절차 제안

PE블록의 반목에서 반력을 계산하는 과정은 Fig. 2와 같이 제안된다. 본 장에서는 그 절차 및 방법을 간단히 기술하고 이후 상세히 설명을 하도록 하겠다.

설계 시스템의 발달로 대부분의 조선소에서는 블록의 3차원 CAD 데이터를 어렵지 않게 확보할 수 있다. 확보된 CAD 데이터로부터 3차원 격자구조모델(Grillage model)이 자동으로 생성이 된다. 만약, CAD 데이터의 확보가 어렵다면, 선체에서 하중 및 자중을 전달하는 주요 구조부재인 웹플로어(Web floor), 거더(Girder), 종방향 및 횡방향 격벽(Bulkhead), 선체 외판(Side shell) 등의 위치를 직접 입력하여 격자구조모델을 수동으로 생성하게 된다.

격자구조모델이 완성된 후, PE블록의 자중 분포를 격자구조 모델에 분포시켜야 한다. 본 논문에서는 PE블록의 자중 분포를 계산할 수 있는 경우를 3가지로 정의하였다. 첫번째는 PE블록의 설계 데이터로부터 각 부재들의 중량 및 형상 정보를 충분히 확보할 수 있는 경우이다. 두번째는 해당 호선의 전선 구조해

Fig. 2 Procedures of PE block support analysis

석 모델이 존재하는 경우 그 전선모델로부터 대상 PE블록 부분을 분리하여 사용하는 경우이다. 전선 구조해석 모델은 다른 목적을 위해 이미 선박의 무게분포를 재료 특성값으로 포함하고 있기 때문에 사용이 가능하다. 마지막으로, PE블록의 3차원 설계데이터와 구조해석 모델의 확보에 어려움이 있는 경우를 위해 블록의 전체 중량과 무게중심으로부터 최적 중량분포를 격자구조의 절점에서 집중하중으로 추정한다.

격자구조 모델과 중량 분포의 추정이 완료되었으면, 격자구조 모델의 계획된 위치에 블록 반목을 배치하고 격자구조해석을 수행한다. 격자구조해석에서 구해지는 결과는 반목에서 반력과 격자 구조의 처짐량으로, 이 2개의 변수를 검토하여 생산지원 담당자가 현재 반목 배치의 안정성을 평가하게 된다. 조선소 내부 기준을 초과하는 반력 위치와 처짐량이 과대한 지점에 추가적인 반목을 배치하여 계획을 수정하게 될 것이다.

마지막 단계로 제안한 최적 반목 자동 배치는 사용자의 사용성 증대를 위해 반목 배치의 초기 안을 제시할 필요가 있음을 의미한 것으로, 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 배치 알고리즘을 구현하였고(Kim et al., 2013) 현재 추가 성능 개선이 필요하여 수정 중에 있다. 본 논문은 PE블록 반목 반력 계산 시스템의 개발에 초점을 맞추고 있고, 최적 자동 배치 알고리즘이 구현 중에 있기 때문에 본 논문에서는 제외를 하였다.

3. 블록의 격자 구조 모델 생성

격자구조해석을 이용하여 선박의 구조해석을 수행을 하는 경우, 그 격자구조모델은 웹플로어, 거더, 종방향 및 횡방향 격벽, 선체 외판 등을 참조하여 해당 위치에 보요소(Beam element)를 생성하여 만들어진(Lloyd's Register, 1983; Rigo and Rizzuto, 2003). 이 부재들은 선체의 무게와 외부 하중들이 선체를 따라서 전달되는 주요 경로에 해당되기 때문에 격자 구조 모델에서 반드시 고려되어야 하는 것들이다. Fig. 3은 선체 블록으로부터 격자구조 모델이 생성되는 과정을 보여 주고 있다.

PE블록 반목 반력 계산을 위한 격자구조모델을 생성하기 위해서는 PE블록 모델로부터 중간 Wireframe 모델을 생성하게 되는데 이 중간 Wireframe 모델을 'Construction 모델'이라고 한다. Fig. 3-2가 Construction 모델의 예이다. Construction 모델을 구성하는 Wireframe들의 교차점 계산하고 교차점을 절점(Node)으로, 이웃한 교차점을 연결하는 선분을 보요소(Beam element)로

Fig. 3 Grillage model generation process

정의하여 Fig. 3-3과 같은 격자구조모델을 생성하게 된다.

Construction 모델은 블록의 중량을 반목에 전달하는 주요 부재들로 만들어지는데, 거더, 웹플로어, 종격벽, 횡격벽, 선체 외판 등이 이에 포함된다. 초기 Construction 모델은 주요 하중 전달 부재들을 블록의 CAD 모델(Fig. 3-1)에서 탐색하여 Wireframe으로 재정의함으로써 자동으로 생성된다. 초기 Construction 모델의 요소들은 CAD모델로부터 정의할 때 중복으로 정의될 수 있는데 이 경우 중복 정의된 요소를 찾아 삭제해주어야 한다. 누락된 요소가 있는 경우 사용자가 직접 정의하여 생성할 수 있다. Construction모델이 완성되면, Construction 요소의 단면특성치(Section properties)를 입력한다. 입력된 단면 특성치는 Construction 모델로부터 격자구조모델을 생성할 때 보요소(Beam element)의 단면특성치로 활용된다. 입력되어야 할 단면 특성치는 단면적(Sectional area), 요소좌표계(x, y, z axis)에 대한 면적 2차 관성모멘트(Moment of inertia, I), 면적에 대한 2차 비틀림 관성모멘트(Torsional moment of inertia, J)이다. 이 값들은 블록 무게와 외부 하중이 복잡한 블록 구조를 통해서 블록 반목에 잘 전달될 수 있도록 결정되어야 한다. 로이드 선급에서는 단면 특성치의 초기값들을 계산하는 절차를 제안하였고 특히 원유유반선에 대한 단면특성치 계산 과정을 상세히 제안하였는데(Lloyd's Register, 1983), 해당 구조 부재의 단면과 주변 부재들과의 연결 관계를 고려하여 계산될 수 있음을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 Kim et al.(2008)이 도킹 해석 시에 사용하였던 단면 특성치를 이용하였다. Kim et al.(2008)은 도킹 해석 시에 구조 부재를 6개의 그룹으로 분류하였고, 선종별로 선수부, 선체중앙부, 선미부에 위치한 각 그룹에 속하는 부재들의 단면특성치를 선체 중앙단면의 면적과 2차 관성모멘트에 대한 비례함수로 Table 1에 보여진 사례와 같이 정의하였다. 선체중앙단면의 면적(A_c)과 2차 관성모멘트(I_c, J_c)가 주어지면 Table 1과 같이 주어진 비율을 그

Table 1 A sample sectional properties at parallel middle body of a containership

Structural member	Sectional area ratio (A_m)	Torsional inertia ratio (J_m)	Inertia ratio (I_m)	Sectional area (A, m^2)	Torsional inertia (J, m^4)	Inertia (I, m^4)
Centerline girder	0.2 ~ 0.4	0.01~0.03	0.005~0.01	0.0172	0.00241	0.043
Side shell	7~9	0.5~1.0	25	0.459	0.121	71.641
Side firder	0.4~0.8	0.02~0.05	0.01~0.02	0.0344	0.00563	0.086
Web floor	0.4~0.8	0.02~0.05	0.01~0.02	0.0344	0.00563	0.086
Trans. bulkhead	7~9	0.5~1.0	25	0.459	0.121	143.281
Longi. bulkhead	7~9	0.5~1.0	25	0.459	0.121	143.281

(Remark: Each ratio is a percentage (%) for a midship section properties, A_c , J_c and I_c)

Table 2 Principal dimensions of the containership

Item	Values
Length (m)	317.2
Breadth (m)	43.2
Depth (m)	24.5
Draft (m)	13.0
CB	0.8
A_c (m ²)	5.741
I_c (m ⁴)	573.127
J_c (m ⁴)	16.098

값에 곱하여 Construction 요소의 단면 특성치(A , J , I)를 구하게 된다. 추가로 Table 2에 대상 선박의 주요요목을 제시하였다.

Construction 모델 생성 작업이 완료되었으면 Construction 모델에 포함된 Wireframe들 간의 교차점을 계산하여 절점(Node)과 보(Beam) 요소를 계산하여 격자구조모델을 생성하게 되는데, 자동 생성 기능과 불필요한 요소의 제거 및 요소의 추가 작업 등이 요구될 수 있다. Fig. 4와 5는 주어진 실제 PE블록 모델로부터 생성된 격자구조모델 사례를 보여 주고 있다.

4. 블록 무게 분포의 추정

PE블록 반목 해석에서 고려될 수 있는 하중은 블록 자체의 무게와 바람에 의한 풍압으로, 이중에서 반목의 반력에 영향을 미치는 주요 하중인자는 블록의 무게이다. 블록의 전복 위험성을 평가하기 위해서는 풍압도 당연히 고려되어야 하지만, 본 논문에서는 풍압의 영향을 고려하지 않았다.

3장에서 사용한 블록의 3차원 CAD 데이터가 완벽한 솔리드 모델의 형태라면, 주어진 데이터로부터 블록을 구성하는 부재들의 무게, 무게중심 등의 정보를 계산할 수 있다. 모델이 완벽하

지 않은 경우 주어진 블록의 CAD 모델로부터 원하는 값을 얻지 못하게 된다. 조선소에서 사용되는 CAD 시스템의 종류에 따라서 그 완성도는 달라지게 되며, 심지어는 3차원 설계를 하지 않는 경우도 발생한다. 즉, 모든 조선소에서, 모든 블록에서, 모든 구조부재들에 대한 무게와 무게 중심을 설계 데이터로부터 획득하지 못할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 PE블록 반목의 안전성 평가를 위해서는 다양한 방법으로 블록 중량을 격자구조 모델에 분포를 시킬 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

선박의 일반적인 설계 과정과 산출물을 고려하여, 격자구조모델에 블록의 무게를 분포시킬 수 있는 방법으로 3가지 정도를 제안한다. 첫째는 CAD 데이터를 사용하여 블록의 중량 분포를 구하는 것이고, 둘째는 구조해석용 전선 유한요소모델에서 대상 PE블록 부분을 분리하여 유한요소 모델에 입력된 중량정보를 사용하는 방법이고, 셋째는 최적화 기법을 이용하여 최소 정보인 블록의 전체 중량과 무게중심으로부터 격자구조 전체에 중량을 분포시키는 방법이다. 전선구조해석이 선박 설계 시에 실시된다면 전선구조해석모델의 획득이 가능하고 블록의 전체 중량과 무게 중심 계산은 선박 설계 시 반드시 수행되어야 하는 것이기 때문에 항상 획득이 가능한 정보라고 할 수 있으므로 CAD데이터의 부재 시 중량분포를 계산할 수 있는 대안이 될 수 있다. 전선구조해석의 경우, 선종에 따라서 실시하지 않는 경우가 있기 때문에 구조해석모델의 획득이 불가능할 수도 있다.

첫 번째 방법으로, 3차원 블록 모델로부터 모든 내부 부재들의 부피, 무게 중심 등의 정보를 계산하고 밀도를 곱하여 중량을 계산한다. 3차원 CAD 모델과 격자구조모델을 서로 맵핑하여 모든 구조 부재에 대해 근처 격자구조의 절점에 그 중량을 균일하게 분포시킨다. 각 절점에 분포된 모든 무게를 합하면 격자구조의 절점에서 최종 중량 분포를 얻게 된다. Fig. 6(a)은 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 있는 샘플 블록의 설계 데이터로부터 구해진 중량 분포를 보여주고 있다.

두 번째 방법으로, 전선 유한요소 모델로부터 대상 블록 영역을 추출하여 중량분포를 계산하는 것이다. 선박 설계 과정에서 구조 해석뿐만 아니라 진동, 피로 해석을 위해 선박의 전선 유한요소 모델은 만들어지게 된다. 앞서도 언급했듯이 선종에 따라 상세 전선구조해석을 실시하지 않는 경우, 진동해석모델을 획득하여 사용할 수 있으나 모델의 상세 수준에 있어서 일반 구조해석 모델과 차이를 보이고 있다. 그러나 해석모델에 중량분포가 제대로 반영되어 있다면 PE블록 반목에 작용하는 반력의 계산에는 적용이 가능할 것이다.

이러한 모델은 상세 구조설계 및 연구부서로부터 확보가 가능할 것으로 예상되지만, 생산 지원부에서 직접 다루기에는 전문 지식이 필요하기 때문에 전선 모델로부터 대상 블록 영역을 추출하고 수정 모델을 만들기에는 어려움이 따를 것으로 예상된다. Fig. 7의 유한요소 모델은 각각 Fig. 4와 5에 있는 블록을 해당 호선의 전선 구조해석 모델로부터 추출한 것이고 각각 Fig. 6(b)는 유한요소 모델로부터 추정된 중량분포를 함께 표시하였다. 첫 번째 방법과 마찬가지로, Fig. 7에 보이는 요소 근처에 위치한 격자구조의 절점에 그 무게를 균일하게 분포시키고 각 절점에 분포된 모든 무게를 합하면 격자구조의 절점에서 최종 중량 분포를 얻게 된다.

Fig. 4 Sample 1 of grillage model generation **Fig. 5** Sample 2 of grillage model generation

Fig. 6 Weight distribution by optimization of Sample 1 and Sample 2

Fig. 7 FE model of Sample 1 and Sample 2

세 번째 방법으로, 블록에 대해 최소한의 정보인 전체 중량과 무게중심으로부터 격자구조의 절점에서 중량 분포를 추정하는 것이다. 격자구조의 절점에서 하중(중량)의 합이 블록의 총중량 (W_T)과 같고 그 하중(중량)으로부터 계산된 무게중심이 주어진 블록의 무게중심(COX , COY)과 차이가 최소가 되도록 격자구조 모델에서 중량분포를 구한다. 이것은 다음과 같이 정식화가 가능하다.

$$Find: W_i \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

$$\text{Such that: Minimize } F = (COX - C_x)^2 + (COY - C_y)^2 \quad (1)$$

$$\text{Subject to: } G_i = W_i - 0.1W_m \geq 0, \sum_{i=1}^N W_i = W_T$$

여기서 N 은 격자구조 모델의 절점 개수이고, W_i 는 최적화 문제에서 설계 변수로 격자구조의 절점에서 중량분포값이고, COX 와 COY 는 PE블록의 주어진 무게중심 좌표값이다. C_x 와 C_y 는 반복 계산 중에 추정된 중량분포로부터 계산된 무게중심의 좌표값이다. G_i 는 각 절점에서 하중이 평균하중 W_m 의 10% 이상은 분포되도록 W_i 를 추정한다는 제약조건이다. 본 논문에서 최적화 기법으로는 직접탐색법인 Hook & Jeeves 기법을 이용하였다(Hooke and Jeeves, 1961; Gottfried and Weisman, 1973).

이 중량분포 최적화 방법을 이용하여 PE블록의 격자구조 모델에서 중량 분포를 추정할 때 정확도의 향상을 위해 PE블록을 구성하는 대블록 단위로 중량분포 최적화를 적용하고 그 결과를 합하여 격자구조 모델의 절점에서의 최종 중량 분포를 계산하였다. PE블록의 구조는 매우 복잡하지만 그 대블록들은 좀더 단순한 형태를 가지기 때문에 중량분포 최적화 방법으로부터 양호한 결과를 얻을 수 있다. Fig. 4의 Sample 1 블록은 6개의 대블록이 조립된 것이고 Fig. 5의 Sample 2 블록은 3개의 대블록이 조립된 것이다. Fig. 8은 Fig. 4의 Sample 1을 구성하고 있는 대블록을 분리하여 보여주고 있다. 그리고 Fig. 6-(c)는 PE블록의 최적화 방법을 이용한 추정 중량 분포를 보여 주고 있다. Sample 1의 경우 CAD 데이터로부터 추정한 각 절점에서 중량분포와 최대 14.847 (Ton), 평균 1.595(Ton)의 차이를 보여주고 있으며, Sample 2의 경우는 최대 3.339(Ton), 평균 0.708(Ton)의 차이를 보여주었다.

반목의 반력 측면에서 살펴보면, 절대적인 값보다 블록 전체에 걸친 중량분포가 중요한 의미를 가진다. Fig. 4과 5의 CAD 데이터로부터 계산된 중량 분포와 비교하여 보면, Sample1의 경우는 비교적 양호하게 유사 분포를 추정하고 있지만, Sample2의 경우는 그 분포에 있어서 차이를 보이고 있다. 이것은 블록의

Fig. 8 Sub-blocks included in Sample 1

Table 3 Comparisons of three weight distributions

		Sample 1	Sample 2
Weight	FE model	1392.00 (ton)	813.00 (ton)
	CAD	1392.98 (ton)	813.98 (ton)
	Optimization	1393.00 (ton)	813.40 (ton)
Center of gravity (COG) X	FE model	138.90 (m)	55.03 (m)
	CAD	137.78 (m)	54.36 (m)
	Optimization	137.78 (m)	55.03 (m)
Center of gravity (COG) Y	FE model	0.00 (m)	0.05 (m)
	CAD	0.08 (m)	0.08 (m)
	Optimization	0.08 (m)	0.05 (m)

중량 분포가 선박의 Centerline에 집중되어 있는 경우와 좌우현에 분포되어 있는 경우, Centerline에 대해 중량분포가 대칭이라면 무게중심은 Centerline 상에서 동일한 값을 주기 때문에 실제 분포를 반영하고 있지 못하기 때문이다. 이러한 케이스들을 고려할 수 있도록 격자구조의 절점에서 중량에 대한 가중치(Weight factor)를 적용하는 방법을 제안할 수 있다. 무게가 많이 나가는 선체 부재들이나 중량물이 분포하고 있는 영역을 설정하고 그 영역에 포함된 절점과 영역 밖에 위치한 절점에 서로 다른 가중치를 입력한 후 최적화 방법을 적용한다면 설계 데이터에 근접한 중량분포가 추정될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 아직 구현이 되어 있지 않았으며, 계속 개발이 진행되어야 할 부분이다.

Table 3는 3개의 중량분포 추정방법의 블록의 최종 무게와 무게중심의 계산 결과를 비교하여 보여주고 있다. FE(Finite element) 모델로부터 가져온 블록 모델의 중량과 무게중심이 CAD 데이터로부터 계산한 중량과 무게중심과 약간의 차이를 보이는 것을 볼 수 있다. 이것은 유한요소 모델과 PE블록의 경계가 정확히 일치하지 않아서 발생한 문제일 수 있으며, 유한요소에 재료의 밀도와 질량을 입력하여 선박의 중량을 맞추게 되는데 이 때 각 요소에 입력하는 밀도값에 따라 약간의 차이를 보일 수 있다. 2가지 중량분포 추정에 대해 주어진 무게와 무게중심에 매우 잘 일치하는 것으로 평가할 수 있다.

5. 격자 구조 해석과 검증

본 논문에서 제안한 격자구조 모델과 중량분포 추정 방법을 구현한 PE블록의 반목 반력 계산 시스템을 검증하기 위해 3차원 유한요소해석과 결과를 비교하여 보았다. 실제로 반목에 걸리는 반력을 측정할 수 없기 때문에 3차원 유한요소해석 결과와 간접 비교를 통해 그 타당성을 검토해 보고자 한다. 본 계산에서는 3차원 FEA모델과 비교되기 때문에 격자모델에서 중량 분포는 PE블록의 유한요소 모델로부터 추정된 중량 분포를 사용하였고 직접 개발한 3차원 격자구조 해석 프로그램을 사용하여 반력 계산을 수행하였다.

반목을 포함한 Sample 1과 Sample 2의 PE블록 격자구조 모델과 하중 분포는 Fig. 9에 보이는 바와 같다. Fig. 9에서 z-방향으로 놓여진 보요소가 반목에 해당하는 것이다. Sample 1과 Sample 2의 유한요소 모델은 Fig. 7에 이미 주어져 있다. Sample의 3차원 유한 요소 모델에 반목을 배치할 때, 격자 구조에서와 동일한 위치에 배치할 수 없는 경우 가능한 유사한 위치에 배치를 하도록 하였다.

(a) For Sample 1

(b) For Sample 2

Fig. 9 Positions of PE block support and weight distribution for Sample 1 and Sample 2

Fig. 10 Comparison between 3D FEA (FE) and grillage model (SGA) for Sample 1 and Sample 2

Table 4 Difference of reaction forces between 3D FEA (FE) and grillage model (SGA) for Sample 1 and Sample 2

Difference	Sample 1	Sample 2
Max.	25.32 (ton)	26.77 (ton)
Min	0.57 (ton)	0.71 (ton)
Average	11.36 (ton)	9.52 (ton)
Standard deviation	7.15 (ton)	6.62 (ton)

Fig. 10은 반목이 배치된 위치에서 반력을 비교한 것으로, 몇몇 반목에서는 차이를 보여주고 있지만 그 경향은 매우 유사하다고 평가할 수 있다. Fig. 10에서 가로축은 반목의 번호이고 세로축은 각 반목에서 반력(Ton)이다. 반목의 위치는 반목의 번호 순서대로 Fig. 9에서 (1)과 (2) 방향으로 배치되어 있다. Sample 1과 Sample 2의 반목 반력 차이를 최대값, 최소값, 평균, 표준편차로 Table 4에 나타내었다. 실제로 반목의 배치를 적용하여 반력을 측정할 수 없는 상황에서 정량적인 평가가 이루어지기는 힘들지만, 3차원 FEA를 통한 반력 계산 결과와 비교했을 때 중량 분포 추정의 정확도를 향상하고 블록 구조를 정확히 반영한 격자구조 모델의 생성을 통해 그 차이는 분명히 줄일 수 있을 것이라고 판단된다.

6. PE블록 반목 해석 시스템 개발

본 연구에서는 PE블록 반목 배치계획을 지원할 수 있도록 통합 반목해석 프로그램을 Fig. 11와 같이 개발하였다. 본 시스템은 C#으로 개발 되었으며, 사용된 CAD 커널로는 공개용 라이브러리인 Open cascade 6.3.0을 사용하였다. 개발된 프로그램은 3차원 CAD데이터로부터 격자구조모형을 생성하는 기능, 생성된 격자구조에 요소의 추가 및 삭제, 분할 등의 수정 작업을 할 수 있

Fig. 11 Integrated PE block support analysis system

는 기능, 요소에 단면특성치를 부여하는 기능, 블록 반목을 정의하는 기능, 격자구조해석을 수행하고 그 결과를 조회하여 분석할 수 있는 기능을 가지고 있다. 작업자의 경험과 지식을 통해 결정되는 PE블록 반목 배치계획에 대한 쉽고 빠른 안정성 평가를 통해 신뢰도가 높은 계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

7. 결 론

본 논문에서는 구조강도해석을 전문적으로 다루지 않는 실무자가 간단한 작업을 통하여 PE 블록 반목의 배치를 유연하게 수행하면서 강도평가를 수행할 수 있도록 전용 해석 시스템의 구축을 목표로 PE블록의 격자구조 모델을 이용한 간이해석(Grillage analysis) 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 통합 구현한 PE 블록 반목 해석 시스템은 PE블록의 중량 분포 추정, 설계정보를 활용한 간이 해석용 Grillage 모델 생성, 3차원 Grillage 해석 및 결과의 조회 등의 기능을 갖추고 있다. 본 연구를 통해 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 3차원 설계데이터로부터 직접 주요 구조부재들을 탐색하

여 격자구조 모델을 자동으로 생성할 수 있었다.

(2) 3차원 설계데이터로부터 격자구조의 절점에 블록의 중량을 분포하는 방법과 해당 정보의 부재 시 블록의 중량과 무게중심과 같은 최소한 정보로 중량 분포를 추정할 수 있음을 확인하였다.

(3) 선체 폭방향에 대해 좌우 대칭 분포를 가지는 블록의 경우, 블록의 무게와 무게중심으로부터 최적 중량 분포가 설계데이터로부터 추정한 결과와 상이하였다. 이러한 경우를 처리할 수 있도록 절점 가중치법을 제안하였으며 추가 연구 및 개발이 필요하다.

(4) 컨테이너선의 PE블록에 대한 3차원 유한요소해석 결과와 비교 검토를 통해 타당성을 확인하였고 격자구조 모델을 이용한 간이 해석이 반목의 반력을 계산하는데 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

향후에 연구에서는 적용 범위를 여러 선종으로 확대하여 그 타당성을 검토할 예정이며, 블록 반목의 최적 배치에 관한 연구가 추가적으로 진행될 것이다. 또한 격자구조 모델에서 요소의 단면 특성치로 도킹해석에서 제안된 값을 사용하였기 때문에 이에 대한 추가적인 파라메트릭 연구가 이루어져야 하고, 다양한 블록 구조에 대해 중량분포 최적화 알고리즘의 정확도를 향상시킬 수 있는 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 (주)대우조선해양의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Choi, J.H., Oh, S.H., Hang, C.H., Jun, M.J., 2002. Development of Docking Analysis System. Proceeding of the Annual Autumn Meeting, SNAK, Busan, 437-442.
- Chun, M.S. and Seo, Y.S. Heo, K.S., Chung, S.W., Park, S.M., Cho, H.G., 2006. A Study on Structural Safety Assessment for Docking Condition. Special issue of the Society of Naval Architects of Korea, 89-96.
- Chun, M.S., Seo, Y.S., 2007. Development of Hull Safety Assessment Method in Docking. Virtual Product Development Conference 2007. MSC Software Korea, Seoul.
- Hooke, R., Jeeves, T.A., 1961. Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. Journal of the Association for Computing Machinery, 8(2), 212-229.
- Kim, S.C., Ryu, C., Kim, Y.H., Han, C.B., Kim, D.G., 2013. A Study on the Optimal Arrangement of Pre-erection Block Supports. Proceeding of The Joint Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies 2013, Jeju, 494-499.
- Kim, S.C., Ryu, C., Lee, J.H., Lee, K.S., Baek, K.D., Sohn, S.Y., Choi, J.H., 2008. On the Docking Analysis of Global Ship Structure Using Simplified Grillage Model. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(6), 710-718.
- Lloyd's Register, 1983. Lloyd's Register's Plan Appraisal Systems for Ships-ship Type Procedural Documents for Oil Tankers. STPD.
- Rigo, P., Rizzuto, E., 2003. Analysis and Design of Ship Structure. In T. Lamb (ed), Ship Design and Construction, Vol. 1, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, (2003), 18-1~76.