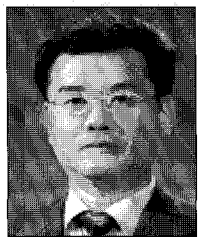
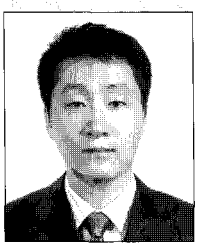
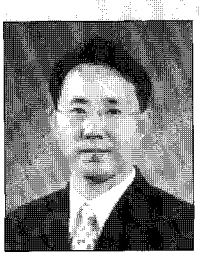
선박 도킹 시 간이화된 격자 모델을 사용한 효과적인 CAE 시스템 개발 사례

Introduction to a CAE Development Based on Simplified Grillage Model for Ship Docking Analysis

김 성 찬* 유 철 호* 이 장 현** 이 경 석***

*인하공업전문대학 선박해양시스템과 교수
**인하대학교 선박해양공학과 교수
***대우조선해양(주) 구조설계팀 부장

1. 개발 배경

선박의 신조 또는 운항 중인 선박이 정기검사를 위해 Re-Docking되는 경우, 선체 하부 공사를 위해 도크 내부에 1.8m이상의 반목을 설치하고 그 위에 선박이 놓이게 되는데 이 때 반목의 설치에 따라 선체에 국부적인 응력집중이 발생한다. 신조시 도크 바닥에 반목을 설치할 경우 아주 특별한 선종이 아니면 표준화된 배치로 선박을 건조하고 있다(Fig. 1). 특이한 중량분포 및 돌발적인 Docking 상황 하에서 간혹 구조부재의 손상이 발생한 경우가 보고 되고 있는데, Tanker과 B/C 및 FPSO 등은 중량이 커 국부적인 집중하중이 발생하는 경우도 있고, Containership 및 LNG/LPG선과 같이 선수/선미에서 선형이 홀쭉하여 반목 설치위치가 제한적인 경우 하중이 한 점에 집중하여 발생하는 경우도 있다.

표준화되지 않은 반목 배치를 계획할 때 반목과 선저 구조부재의 안전성을 검증하기 위해 국내 조선사들은 이미 3차원 전선해석 모델을 이용한 Docking 해석 시스템을 구축하여 사용하고 있다(최중효 등 2002, 전민성 등 2006, 전민성과

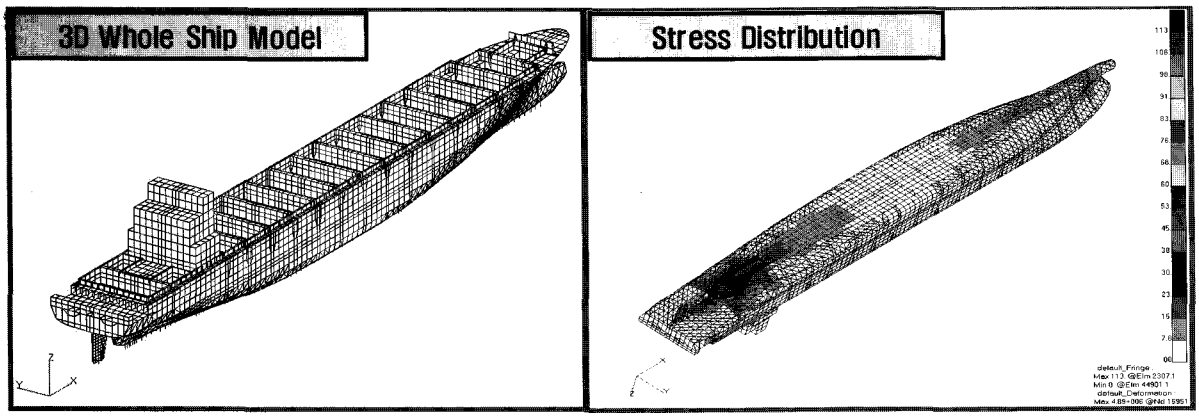


Fig. 1 A sample of 3D docking analysis

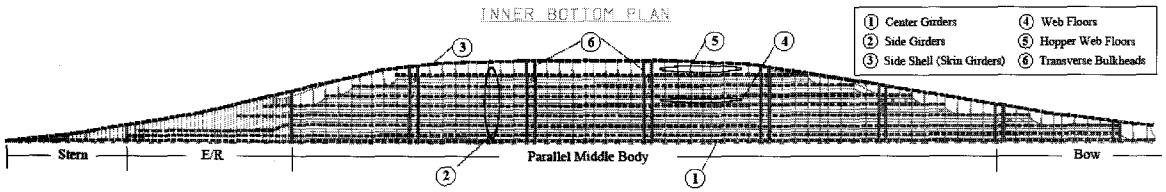


Fig. 2 Structural elements in tank top plan

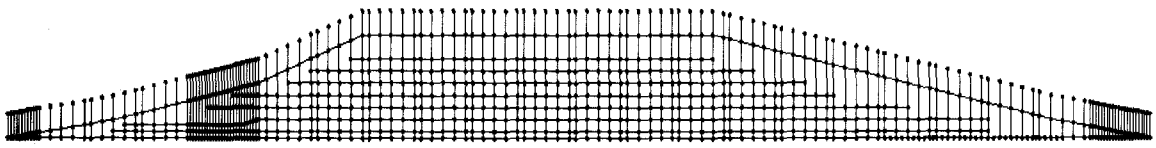


Fig. 3 Grillage model of a ship from tank top plan

서용석 2007). 그러나 도킹은 선박의 운항 상태에서 발생하는 것이 아니므로 선급 규정이 아닌 선주의 요구에 의해 수행되는 경우가 대부분이고 더구나 최근 늘어나는 건조 물량으로 가중되는 설계 및 해석 업무량 때문에 빠른 시간 내에 해석이 가능하고 시수를 절감할 수 있는 방법들을 요구하고 있다. 그리고 전선해석 모델을 사용하여 유한요소해석을 수행하는 경우, 중량분포 및 하중분포 등을 유연하게 구현하는 것이 가능하고, 반목설치 등의 표현이 용이한 장점이 있으나, 해석모델은 구조도가 작성된 이후 가능하므로 초기설계시 구조보강 등의 조치가 늦어질 수 있고 3차원 전선 해석 모델을 완성하는데 상당한 시간이 걸리는 문제가 있다.

선박 구조는 판과 보강재로 이루어진 격자구조(Grillage)가 주종을 이루고 있으며, 선저 구조 또한 주부재인 거더(Girder)와 프레임(Frame) 및 보강재의 조합으로 이루어진 전형적인 격자 구조이다(Fig. 2). 이러한 선박 구조의 특성에 착안하여 격자 구조(Grillage) 해석 모델을 이용한 도킹 해석은 초기 설계시 최소한의 정보를 활용하여 용이하게 반목을 배치하고 그에 따른 선저 구조부재의 안전성을 빠른 시간 내에 파악할 수 있는 대안으로 고려될 수 있다. 정확성과 효율성을 동시에 갖춘 격자 구조를 이용한 간이 도킹 해석을 위해서는 선체 하중 전달 메커니즘을 정확하게 구현한 선저의 격자 구조 모델링 및 하중 산정 기법이 개발되어야 하고 쉽게 해석 모델을 생성할 수 있는 시스템의 개발이 수반되어야 한다. 격자구조 모델링과 도킹해석 기능을 갖춘 이 시스템은 설계 초기단계에서 선주 요구에 대응이 용이하고 도킹 해석 시수의 절감을 가져올 것이다.

2. 격자 구조 모델링 및 하중 산정 기법

기존의 3차원 전선 모델을 이용한 도킹 해석을 대신할 수 있는 간이 도킹해석 시스템의 개발에서 주요 관심사는 격자 구조 모델링과 선체 자중(Lightweight) 및 발라스트수(Ballast water)에 의한 하중 분포의 계산, 그리고 현실에 가까운 반목의 배치 정의이다. 격자 구조 모델링 및 하중 산정 기법은 이미 저자들의 다른 문헌(김성찬 등 2008)을 통해서 보고된 바 있다.

2.1 격자 구조 모델링

앞서 언급했듯이 선저는 전형적인 격자구조 형식을 취하고 있으며 Fig. 2에 보이는 바와 같이 Tank Top Plan에 표시된 특설늑골(Web floor) 및 횡격벽(Transverse Bulkhead) 등의 횡방향 부재와 거더(Girder)와 종격벽(Longirudinal Bulkhead), 선측 외판(Side shell) 등의 종방향 부재를 보 요소(Beam element)로 치환하여 최종적으로 Fig. 3과 같이 격자 모델이 만들어 진다. 각 요소들은 해당 구조 부재 및 선체의 주요 구조 특성치를 고려한 단면 속성을 가지게 된다.

개발된 간이도킹해석 시스템은 주어진 선체 도면으로부터 사용자가 각 구조부재들의 위치와 관련한 최소한의 정보를 입력하여 격자 구조를 자동으로 생성할 수 있도록 하여야 한다. 특히 이 때 주의하여야 하는 것은 선측 외판(Side shell)과 격벽(Bulkhead)에 대응하는 요소들의 단면적 및 2차 모멘트(Moment of Inertia)와 같은 단면 특성치의 계산이다.

Lloyd 선급에서는 선체 구조 해석에서 격자 구조를 이용할 경우 각 위치에 따른 요소들의 단면 속성값을 정의하여 제시하였는데 도킹해석에서도 그 방법을 이용할 수 있다(Lloyd STPD 1983). 그러나 개발 과정에서 테스트한 결과로는 그 수치를 그대로 이용하면 선수미에서 3차원 해석 결과와 반력 분포가 상이하여 선수미에 위치한 요소에 대한 단면 특성치에 대해 보정이 필요함을 인지하였다. 다행히 선종별로 그 보정값이 유사함을 보여주어 지속적인 데이터의 축적을 통해 선종별 보정값을 추론할 수 있을 것으로 생각한다.

선체 상세 구조도가 확정되기 이전에는 구조부재들의 정확한 치수를 정의할 수 없기 때문에 앞서 언급한 방법을 이용할 수가 없게 된다. 이 문제를 극복하기 위해 선체의 주요 요목 및 선체 중앙 단면의 특성치, 즉 선체 중앙 단면적, Moment of inertia와 Torsional moment of inertia를 이용한 선형 경험식을 정의하는 방법을 제안하였다. 선체 구조 해석에 대한 많은 경험을 통해서 선체 하중 전달 메카니즘에 지배적인 영향을 주는 구조부재, 즉 격벽과 선측 외판 등의 요소에 선체 중앙 단면의 특성치에 일정 비율을 통해 매우 큰 단면 특성치를 부여하고 그 외 보강재에는 작은 값을 부여하게 되는데, 이때 각 비율 등은 많은 테스트와 실선 적용을 통해 데이터가 축적이 되면 선종별로 정확한 비율의 추정이 가능하게 된다.

2.2 선체 하중 산정 기법

선체 도킹해석에 고려하는 하중은 선체와 발라스트수의 중량 분포이다. 이것은 선체에 작용하는 모든 구조물 및 도킹 시에 탑재되는 모든 중량물을 고려한 것으로, 이 도킹 조건은 선박 설계에서 필수 항목인 Trim & Stability(T&S) 계산에서 요구되는 하중 분포 중 하나이기 때문에 별도의 추가 작업 없이 그 분포를 획득하여 그대로 사용할 수가 있다.

그러나 선체 및 부가 중량물들의 자중 분포는 하중 종방향 분포구간(Aft End, Fore End), 무게(Weight), 종방향 무게중심(Longi. Center of Gravity, LCG), 모멘트(Moment)로 주어진다. 이것을 각 보요소에 분포시키도록 이산화하는 단계가 필요하며, 본 시스템에서는 하중 분포 구간 내의 각 프레임에서 주어진 하중을 이산화시키고, 이 계산된 하중을 해당 프레임, 즉 특설 늑골과 횡격벽에 횡방향으로 균일하게 분포시켰다. 즉, 선체 종방향에 대해 집중하중으로 이산화 한 후 계산된 집중하중을 황방향에 대해 균일하게 분포시킨다(Fig. 4).

주어진 하중 분포를 구간 내 프레임에서 이산화 시킬 때 단위 길이당 균일 분포 하중으로 계산이 된다면 LCG가 바르게 얻어지지 않는다. 따라서 주어진 LCG와 계산된 하중 분포로부터 얻어진 LCG가 일치하도록 선체 및 부가 중량물의 하중분포를 선형 분포로 가정하고 Fig.4(a)와 같이 계산하게 된다.

격자 구조를 이용한 간이 도킹 해석에서는 예상되는 다른 문제는 횡방향 하중 분포이다. 선체의 횡방향 하중 분포를 선박 설계 단계에서 획득하기 어렵고 격자 구조 모델링 시에도 복잡한 선체 구조로 인해 정의하기 쉽지 않다. 따라서 선체 경하 중량 분포로부터 이산화된 프레임별 하중을 횡방향으로 균일하게 분포하게 되는데(Fig. 4(b)), 이것은

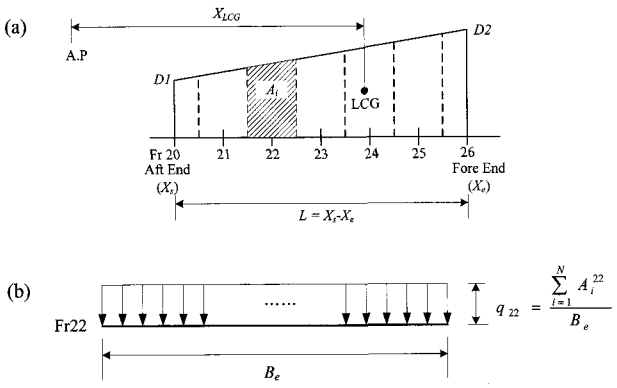


Fig. 4 Longitudinal and transverse load distribution

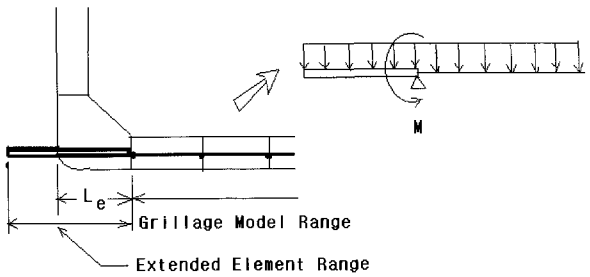


Fig. 5 Improvement of transverse load distribution

선측 및 종격벽 등의 현실적인 하중을 반영하지 못하는 결과를 초래하게 된다.

선박의 중량이 Centerline 및 Mid-Span에서 분포하는 경향보다는 선측 외판 부근 반력에 주목하는 법으로, 선측 외부에 횡방향 요소를 추가로 정의하는 방법을 제안하였다(Fig. 5). 횡방향 하중 분포는 균일 분포로 가정하더라도 선측으로 중량이 편심되는 경향을 자연스럽게 얻을 수 있는 장점이 있다. Hopper Girder 외부 하중은 선체 중앙부에 비해 큰 하중이 전달되는데, 중량 분포를 횡방향 부재에 대해 균일분포하중으로 처리하는 경우 선측 외부에 추가되는 요소 길이에 따라 그 횡방향 분포가 정확히 구현될 수 있다. 횡방향으로의 연장길이가 길수록 Side Shell 부근에서의 반력이 크게 나타난다. 추가되는 요소의 길이는 선종별 또는 크기 그리고 프레임 위치에 따라 연장 길이가 다를 수 있다.

3. 간이 도킹해석 시스템의 개발

전 절들을 통해 기술된 격자 구조 모델링과 하중 분포 계산, 해석 및 결과 분석 등을 지원함으로써 도킹 해석을 용이하게 할 수 있도록 선박 도킹 해석 시스템을 개발하게 되었으며, Fig. 6은 개발된 시스템의 전체적인 기능을 보여주고 있다.

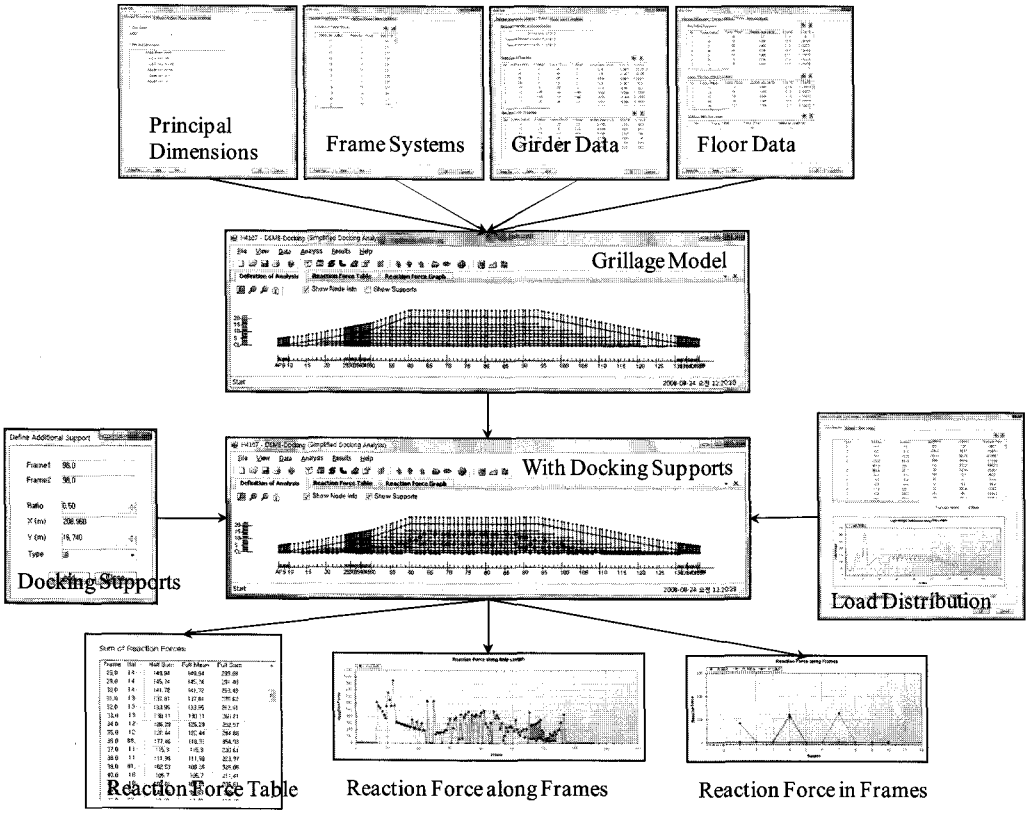


Fig. 6 Functional views of docking analysis system

개발된 프로그램이 갖추고 있는 기능을 상세기능은 다음과 같다.

3.1 격자 모델의 생성 - 프레임, 거더, 플로어의 정의

본 프로그램에서 격자 모델은 선박의 주요 치수 및 프레임과 Tank top plan으로부터 획득이 가능한 거더 및 종격벽 등의 종방향 부재, 플로어 및 횡격벽 등의 횡방향 부재로 정의된다. 자동으로 각 부재들의 교차점들이 계산되어 초기 격자점이 생성이 되고 격자점들 사이에 초기 보 요소가 정의된다.

부재의 단면 특성치는 전 절에 언급한 방법들을 사용하여 계산할 수 있다. 특히 개발 과정에서 테스트된 몇몇 선종에 대해서는 선체 중앙 단면의 면적, 2차 모멘트, 비틀림 강성 등의 특성치에 대한 요소의 구역별 비율을 정의하였기 때문에 그 비율을 사용하여 대상 선박의 선체 중앙단면으로부터 계산이 가능하다. 물론 이 비율들은 추후 축적된 데이터를 통해 정확히 추론되어야 한다. 현재 개발된 시스템에서는 보 요소의 단면 특성치 계산이 자동으로 수행되지 않으며, 구조 부재별로 별도로 계산 후 입력하여야 한다. 향후 보정값 등이 정확히 축적되면 자동 계산을 위한 추가 구현이 이루어질 것이다.

3.2 하중의 입력 - 경하 중량 및 추가 중량물, 발라스트 하중의 정의

도킹해석에서 하중은 선박의 자체 중량, 즉 경하 중량 분포와 발라스트를 위한 발라스트 하중 분포이다. 경하 중량 분포는 설계 시스템으로부터 Light weight summary와 같은 형식으로 입력이 가능하며 또한 summary 파일이 존재하면 바로 불러들여 사용이 가능하도록 하였다. 보통 Light weight summary는 각 중량물의 구간 위치, 총 무게, 무게 중심, 모멘트를 제공하게 된다. 발라스트 하중은 채우게 되는 발라스트 탱크의 위치를 입력하게 된다.

3.3 반목 강성 및 위치

도팅 해석을 위한 초기 격자모델에 반목의 위치를 지정하게 된다. 반목이 스프링 요소로 정의되기 때문에 사용되는 반목의 스프링 상수를 입력한다. 반목의 위치는 초기 격자모델에서 격자점을 선택할 수 있고 격자점 사이의 요소 위 임의 위치에 삽입할 수 있다.

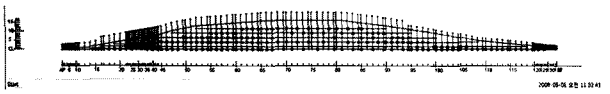
3.4 도킹 해석 및 결과 분석

격자 모델과 하중 모델이 완료되면 2차원 도킹해석을 수

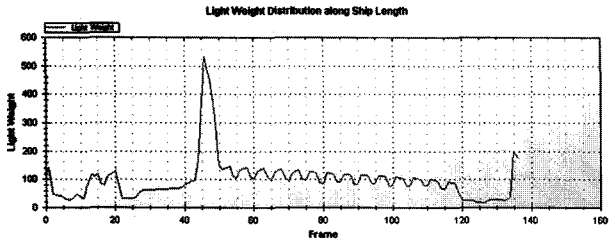
행하고 그 결과를 개발된 프로그램에서 분석할 수 있다. 도킹해석의 결과는 각 반목에서의 반력으로, 각 프레임에 위치하는 반목들의 반력의 총합, 평균, 최대값 등을 테이블과 그래프로 표시할 수 있다. 또한 3차원 해석결과와의 비교를 위해 3차원 해석에 의한 반목에서 반력의 값을 MSC-Patran에서 지원하는 파일로 출력하여 개발된 프로그램에서 불러들일 수 있도록 하였다. 3차원 해석 결과와 2차원 해석 결과를 동시에 표시하여 비교할 수 있다.

개발된 도킹 해석을 시스템을 이용하여 AFRAMAX Tanker 및 Container선에 대한 적용 사례를 살펴보도록 한다. Fig. 7는 Container선의 해석 결과이고, Fig. 8은 Tanker의 해석 결과이다. 추가로 각각 세부 그림들은 다음을 나타내고 있다.

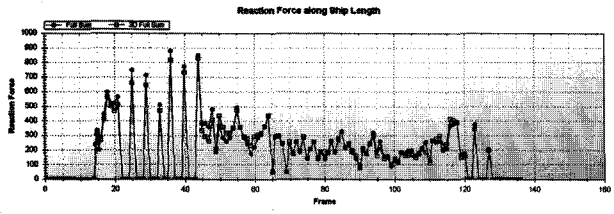
(a) 간이 Grillage 모델 (격자구조 모델)
(b) 총 하중 분포 (경하 중량만 고려)
(c) 프레임별 반력 합의 그래프
(d) 폭방향 반력 분포



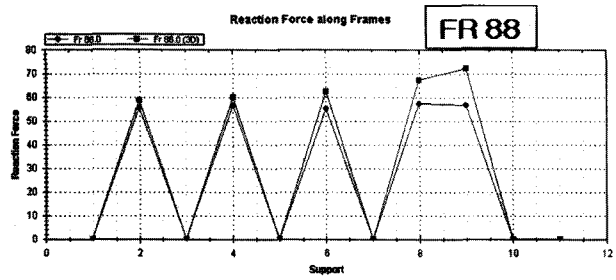
(a) Simplified grillage model



(b) Light weight distribution

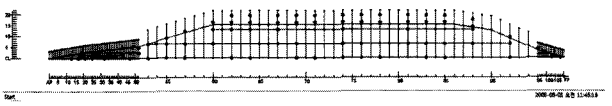


(c) Reaction forces along frames
(Solid Symbol-2D, Blank Symbol-3D)

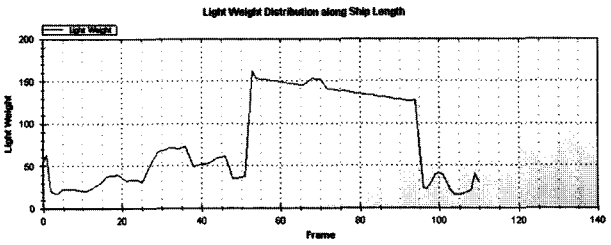


(d) Reaction forces along the breadth

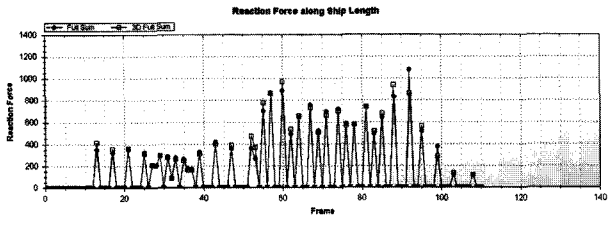
Fig. 7 2D docking analysis for containership



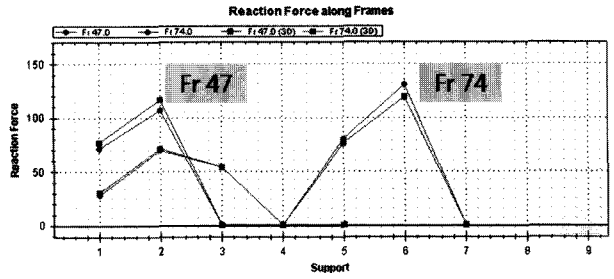
(a) Simplified grillage model



(b) Light weight distribution



(c) Reaction forces along frames
(Solid Symbol-2D, Blank Symbol-3D)



(d) Reaction forces along the breadth

Fig. 8 2D docking analysis for Tanker

Fig. 7와 8의 (c), (d)는 간이화된 도킹해석 시스템이 3D 도킹 해석과 비교해서 타당한 결과를 제시하고 있음을 보여 주고 있다. 개발된 시스템을 통해서 격자 모델의 생성, 반목의 배치, 도킹 해석 실행 및 결과의 확인 등을 용이하게 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 요 약

최근에 선박의 도킹해석은 3차원 전선 구조 해석을 통해 수행되어 왔으나 도킹해석 모델을 구성하는데 많은 시간과 노력이 필요하였다. 전선구조해석 모델을 만들기 위해 필요한 선박구조 도면이 완성되기 전인 초기 설계단계에서 도킹 시 반목배치를 조기에 확정하고, 구조 안정성을 확보하기 위한 노력이 요구되어 왔기 때문에 간이화된 도킹 해석 프로그램을 개발하게 되었다.

2차원 격자구조를 이용한 도킹해석기법을 통해 얻은 반목에서의 지지력이 3차원 전선해석모델을 사용하여 얻은 반목에서의 반력 결과와 비교해 타당한 결과를 보여 주고 있음을 확인하였다. 간이화된 도킹용 해석 프로그램을 개발하였으며, 다음과 같은 기능을 갖추어 사용자가 쉽게 격자 구조 모델을 생성하고 해석을 수행할 수 있도록 구성하였다. 향후 각 요소의 단면 특성치를 자동으로 산정하는 기능이 추가되어야 한다. 그리고 부유식 도크(Floating dock)에서의 도킹해석은 본 개발의 대상이 된 건식 도크(Dry dock)에서의 경우와 다른 고려사항이 추가되어야 하기 때문에 향후 추가적인 연구와 개발을 통해 새로운 기능으로 포함될 것이다.

참 고 문 헌

1. 최중효, 오상헌, 장창환, 전민정, "Docking 해석 시스템 개발", 2002년도 대한조선학회 추계학술 대회 논문집, pp.437-442, 2002
2. 전민성, 서용석, "선박의 docking 시 선체 안전성 평가법 개발", Virtual Product Development Conference 2007, MSC Software Korea, Seoul, 2007
3. 전민성, 서용석, 허기선, 정성욱, 박승문, 조현규, , "선박의 docking 시 반력 계산 및 구조 안전성 평가법에 관한 연구", 대한조선학회 특별논문집, pp.89-96, 2006. 9
4. 김성찬, 유철호, 이장현, 이경석, 백기대, 손상용, 최중효, "간이화된 격자 구조 모델을 사용한 선박의 도킹 해석에 대하여", 대한조선학회논문집, 제45권 제6호, pp.710-718, 2008. 12
5. Lloyd, Lloyd's Register's Plan Appraisal Systems for Ships-ship Type Procedural Documents for Oil Tankers, STPD, 1983

[담당 : 이장현, 편집위원]