

대형 컨테이너 선박의 구조 응답에 미치는 휘핑 영향도 분석

김범일^{1,†} · 김민수¹ · 서순기² · 박재홍²
선박해양기술센터, (사)한국선급¹
선체규칙개발팀, (사)한국선급²

A Study on the Whipping Phenomena Effect on the Structural Response of Large Container Ships

Beom-Il Kim^{1,†} · Min-Su Kim¹ · Sun-Kee Seo² · Jae-Hong Park²
Ship & Offshore Technology center, Korean Register, Busan, Korea¹
Hull Rule Development Team, Korean Register, Busan, Korea²

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.

Recently, it has been reported that the whipping response, which is the elastic phenomenon of the ship, may be one of the causes of the ship accident. Unfortunately, the commonly used methodology for evaluating the whipping effect effectively has not been developed yet. In this study, we developed a procedure to estimate the whipping effect of hull in actual design stage. Fluid-structure interaction analysis was performed for a dominant short term sea state to obtain the time series data of vertical wave bending moment including the whipping response by slamming. In order to estimate the whipping effect by using the time series, some signal processing and statistical techniques such as low pass filtering, Weibull fitting and so on, were applied. The hydro-elasticity analysis was performed on container ships of various sizes to evaluate the whipping effect. The parameters that can affect the response of the hull vibration was selected and the effect of these parameters on whipping was analyzed.

Keywords : Large container ship(대형 컨테이너 선박), Whipping effect(휘핑 영향도), Fluid-structure interaction(유체-구조 연성), Dominant short term sea state(주요 단기 해상 상태), Slamming(슬래밍), Hydro-elasticity(유탄성), Hull vibration(선체 진동)

1. 서론

컨테이너 해상 물동량의 증가는 해사 산업계에서 기존의 선박들에 비하여 더욱 크고 빠른 고효율의 컨테이너선에 대한 요구를 크게 하였다. 이에 따른 컨테이너선의 대형화는 선박의 고유주기를 길게 하며, 전진속도의 증가는 선박이 운항 중 경험하는 조우 주파수를 높게 하는 효과를 가져 오면서 선박과 파도와의 공진 발생 가능성을 증가하게 한다. 또한 갑판의 큰 개구부는 넓은 폭의 평평한 선수부의 형상과 더불어 강한 슬래밍(slamming)을 야기하게 되며, 이 충격력에 의한 선체 유탄성 응답은 선체의 최종 강도 및 피로 하중에 큰 영향을 줄 것으로 예측된다. 휘핑(whipping)과 스프링잉(springing)으로 대표되는 선체 유탄성 응답은 파도 유기 진동(vibration induced wave)이라고 불리며, 파

랑 하중(load induced wave)과 달리 선체의 고유 진동수를 갖는 특징이 있다. 대형 컨테이너선과 같이 유탄성 응답이 강하게 발생할 수 있는 선박에 대하여 파도에 의한 구조 진동 현상들을 설계단계에서 고려하지 않으면 예상하지 못한 구조 손상 및 파괴로 이어질 수 있다. 실제로 대형 선박의 선체가 두 개로 부러지는 사고의 원인 중 하나가 유탄성 응답으로 인한 최종강도의 한계치가 넘어 섰을 수 있다고 보고되면서 대형 선박의 설계에 있어서 선박의 유탄성 응답의 관심이 점차 높아지고 있다. 하지만 초대형 컨테이너선(very large container ship), 초대형 광탄 운반선(very large ore carrier) 등 대형 선박의 발주 시 선주의 유탄성 해석 요구들이 급격히 증가하고 있으나 기존의 규정 및 해석 절차로는 한계가 있다. 이에 따라, 국제적으로 공통된 규정 및 지침의 제정 차원에서 국제선급연합회(IACS)의 공통된 규정 중 UR

S11(중강도 규칙) 개정을 위한 프로젝트 팀이 구성되었고, 컨테이너선의 중강도 규정을 추가로 적용하기 위한 UR S11A(컨테이너선 중강도 규칙)가 제정되었다. 기존의 UR S11에 추가적으로 적용되는 이 규칙은 2016년 7월 1일 이후에 건조 계약되는 컨테이너선에 적용되는 규정으로써, 국제선급연합회 공통구조규칙(Common Structural Rules, CSR)의 요건을 상당 부분 준용하고 있다. 길이가 150 m 이상인 대형 선박은 최종강도 평가가 반드시 수행되어야 하며, 특히 선체의 폭이 32.26 m 이상인 배는 각 선급의 절차에 따라 유탄성 응답을 고려한 슬래밍에 의한 휘핑 응답 평가를 수행하고, 이를 고려하여 최종강도를 평가해야 한다.

선박의 유탄성 응답을 수치적으로 해석하기 위하여 선박을 길이 방향에 따라 여러 개의 보 요소들로 이상화하고 오일러(Euler) 보나 티모센코(Timoshenko) 보이론에 기반을 두는 연구가 꾸준히 수행되었다. Bishop et al. (1985)은 개단면 박판 보의 거동을 해석하기 위해 오일러(Euler), 티모센코(Timoshenko), 블라스프(Masov) 등의 보 이론을 적용한 동적 계산을 수행하였으며, 실험 결과와의 비교를 통해 티모센코 및 블라스프의 보 이론이 비교적 좋은 결과를 주는 것을 확인하였다. Wu and Ho (1987)는 개단면을 가지는 선박의 횡굽힘-비틀림 연성 거동을 와핑 변형을 고려한 1차원 보 요소로 모델링하고 파랑하중에 의한 동적 응답을 계산하였다. Wu and Hermundstad (2002), Wu and Moan (2005)은 비선형 유탄성 응답을 동적 응답과 준정적 응답으로 분리하여 동적 응답 해석에 임펄스 응답 함수를 효과적으로 적용하였고, Senjanovic et al. (2008, 2009)은 와핑 변형 및 막내 전단 변형의 효과를 고려한 1차원 보 요소를 개발하였으며 이를 폰트형 바지 및 대형 컨테이너 선박에 대한 유탄성 계산에 적용하였다. Lee et al. (2003, 2006)은 선박의 유탄성 문제를 3차원 요소법을 이용하여 주파수 영역에서 각각 티모센코 및 오일러 보이론을 적용하여 해석을 시도하였으며, Kim et al. (2009, 2012)은 직교좌표계에서 3차원 랭킨 패널법(Rankine panel method)을 블라스프 보 모델과 직접 연성하여 선형 및 비선형 응답 해석법을 개발하였고, 직접 연성을 수행하여 발생하는 수치적인 문제들을 해결하는 새로운 방법을 정립하였다. 위와 같이 유탄성 문제를 해석적으로 풀기 위한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으나 실제 선박의 설계에 적용하는 방법론과 실선 적용에 대한 연구는 미흡한 실정이다. Storhaug et al. (2011)은 모형 실험을 통해 계측된 데이터에서 파도와 진동성분을 분리하여 피로 손상도를 추정하였으며, Svein et al. (2011)은 실선 계측을 바탕으로 각 항해 루트에서 파도 및 진동 성분에 의한 피로 손상도와 항해 중 선박에서 발생된 최대 종 굽힘 모멘트(maximum vertical bending moment)를 추정하였으나 해석적인 방법과는 거리가 멀다고 할 수 있다.

본 연구에서는 대형컨테이너선의 중앙부에서 슬래밍에 의한 휘핑 영향도를 해석적으로 평가하고 실제 설계단계에서 적용하는 것을 목적으로 한다. 따라서 해석 시간의 효율성과 결과의 신뢰성을 고려하여 1차원 보모델을 이용한 휘핑 현상으로 인한 종 굽힘 모멘트의 증가분인 휘핑 영향도를 평가할 수 있는 유탄성 해석 절차를 개발하였다. 시간 영역에서 유체-구조 연성해석을 통하여 슬래밍 하중에 의한 휘핑 응답이 포함된 종 굽힘 모멘트

의 시계열 데이터를 얻고 저역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF), 와이불 피팅(weibull fitting)등의 신호 처리 및 통계 기법을 적용하여 휘핑 영향도를 평가하였다. 다양한 선박에서의 휘핑 영향도를 분석하기 위하여 실제 건조된 6척의 다양한 대형 컨테이너선 모델에 적용하여 각 선박의 휘핑 영향도를 평가해 보았다. 또한, 분석된 휘핑 영향도를 바탕으로, 선체의 진동 응답에 영향을 줄 수 있는 인자들을 선별하여, 휘핑 영향도를 기능해 볼 수 있는 경험식을 구성해 보았다.

2. 평가 방법 및 수치해법

2.1 평가 방법

선박의 휘핑 응답을 평가할 수 있는 방법으로는 Fig. 1과 같이 크게 규칙파(regular wave)를 이용하는 방법과 불규칙파(irregular wave)를 이용하는 방법이 고려될 수 있다. 규칙파를 이용하는 설계 파 접근법(design wave method)은 선박이 설계 수명동안 조우할 수 있는 해상 상태를 모든 가능성이 있는 규칙파의 합성으로 나타낼 수 있다는 가정 하에 시작한다. 규칙파에 대한 구조 응답을 구한 다음 단기간의 해상을 표현 할 수 있는 파랑스펙트럼(wave spectrum)과 장기간의 파랑분포도(wave scatter diagram)에 근거를 두고 단기 및 장기 통계해석(short term and long term stochastic analysis)을 수행함으로써, 파랑 중 종 굽힘 모멘트의 극한치(long term value)를 구한다. 여기서 계산된 파랑 중 굽힘 모멘트가 최대로 유발될 수 있는 규칙파를 이용하여 슬래밍 하중이 고려된 유탄성 응답에서 최대 종 굽힘 모멘트를 계산하고, 강체(rigid body)로 계산된 휘핑이 고려되지 않는 최대 종 굽힘 모멘트와의 비율을 휘핑 영향도(whipping effect)로 추정한다.

이러한 평가 방법은 계산 절차의 간편성이나 해석에 투입되는 시간적인 측면에서는 효율적일 수 있지만 해석에 적용되는 규칙파의 선택에 대한 이론적 한계와 과도하게 큰 파의 진폭으로 인한 슬래밍 하중의 과대평가로 인하여 휘핑 영향도를 적절히 도출해 낼 수 없는 한계가 존재한다.

불규칙파를 이용하는 설계 해상 상태 접근법(design sea state method) 또한 선박의 장단기 해석을 수행하는 과정은 설계 파 접근법과 동일하다. 장단기 해석 후 설계 파 접근법은 극한치를 구하고 이에 해당하는 파의 진폭을 구하는 반면, 설계 해상상태 접근법은 극한치 결정에 가장 큰 기여도를 갖는 파랑분포도내의 주요 해상상태를 결정한다. 모든 해상상태에 대하여 시간해석을 수행하여 설계에 반영하기에 효과적이지 않기 때문에 극한치에 가장 큰 기여를 하는 단기 해상상태의 유의파고(significant wave height, H_s)와 영점교차주기(zero-crossing period, T_z)를 구한 후, Pierson-Moskowitz(PM) 파랑 스펙트럼으로부터 불규칙파를 생성하여 시간 영역에서 유체-구조 연성 문제를 풀어 슬래밍에 의한 휘핑 응답이 포함된 종 굽힘 모멘트의 시계열 데이터를 얻는다. 다음으로 저역필터를 통과한 진동 성분이 제거된 데

이터를 와이블 분포 선형화를 통하여 해당 확률 내에서의 최대 중 굽힘 모멘트들을 예측하여 휘핑에 의한 모멘트 증가분인 휘핑 영향도를 계산하게 된다. 이러한 방법론은 절차가 까다롭고 해석 시간이 오래 걸릴 수 있는 문제가 있지만 불규칙한 해상상태를 직접적으로 고려할 수 있다는 점에서 설계 파 접근법 보다 실제와 더 유사할 수 있다. 여전히 파랑 분포도 내의 모든 해상상태를 고려할 수 없는 문제는 존재하지만 극한치 결정에 큰 영향을 주는 해상상태가 매우 높은 유의파고를 갖는 점은 많은 해상상태를 고려하는 것보다 설계적인 측면에서 보수적인 안전계수를 갖는다고 볼 수 있다. 본 연구에서 휘핑 영향도의 추정은 불규칙한 해상상태를 직접적으로 고려하고, 선박의 크기와 설계에 관련된 인자 별로 휘핑 응답의 영향도를 다각도로 평가하기 위하여 설계 해상상태 접근법을 이용하여 유탄성 해석을 수행하였다. 이 방법론에 대한 자세한 절차와 설명은 4장에서 계속 한다.

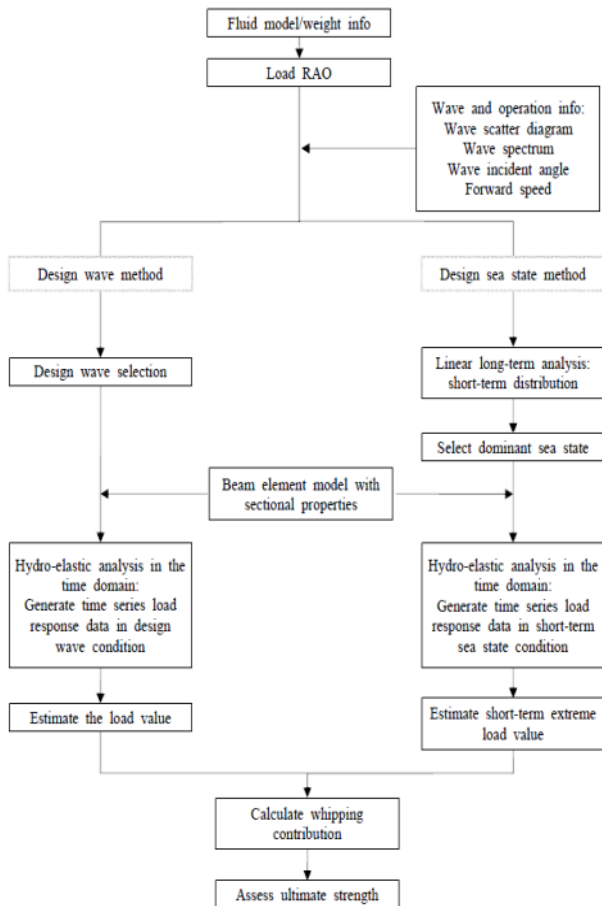


Fig. 1 Evaluation method

2.2 유체-구조 연성 기법

선체의 유탄성 응답을 예측하기 위하여 시간영역에서 유체-구조 연성문제를 정립하여 풀어야 한다. 본 연구에 사용된 프로그램은 WISH-FLEX (SNU, 2011)로써 유체 영역은 3차원 포텐셜 유동을 가정하고 경계 요소법(Boundary Element Method, BEM)

을 적용하여 그 해를 구하고, 유체영역의 경계치 문제는 평균위치에서의 선형화된 경계조건을 이용한다. 비선형성을 고려해 주기 위하여 실 접수면적에 대하여는 Froude-Krylov(F-K) 및 유체 정하중을 고려하는 약 비선형법(weakly-nonlinear method)을 적용하며, 선수 및 선미부의 슬래밍 하중의 계산은 GWM (Generalized Wagner Model)을 적용하였다. 선체의 강체 및 탄성운동을 해석하기 위하여 1차원 보IRON 기반의 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)을 적용하였다. 선체의 운동방정식을 아래의 식 (1),(2) 와 같이 3차원의 직교좌표계에서 유한요소법을 이용하여 정의할 수 있다. M, C, K 는 선체의 질량, 감쇠, 강성행렬이고 t 는 시간 $\vec{u}(t)$ 는 변위벡터, \vec{f} 는 외력 벡터이다.

$$M\ddot{\vec{u}}(t) + C\dot{\vec{u}}(t) + K\vec{u}(t) = \vec{f}(\vec{u}(t), \dot{\vec{u}}(t), \ddot{\vec{u}}(t), t) \quad (1)$$

$$\vec{f} = \vec{f}_{LD} + \vec{f}_{NF} + \vec{f}_{NR} + \vec{f}_{SL} + \vec{f}_{SP} + \vec{f}_{DAM} \quad (2)$$

- \vec{f}_{LD} : 선형 유체 동역학적 힘 (방사 및 회절)
- \vec{f}_{NF} : 비선형 Froude-Krylov 힘
- \vec{f}_{NR} : 비선형 유체 정역학 복원력
- \vec{f}_{SL} : 슬래밍 힘
- \vec{f}_{SP} : 소프트 스프링 복원력(Surge, Sway, Yaw)
- \vec{f}_{DAM} : 횡동요 점성 감쇠력

매 시간 단계에 대하여 식(1)의 좌변과 우변을 만족하도록 계산한다. 그리고 외력은 3차원 랭킨 패널법과 2차원 슬래밍 모델을 통해 계산하며, 선체의 강체 및 탄성체 운동은 1차원의 유한요소법을 통해 계산한다. Fig. 2는 슬래밍 하중을 고려한 유체-구조연성 문제의 흐름도로서 많은 문헌에서 자세한 수치해법을 다루고 있다 (Kim et al., 2011 & 2014).

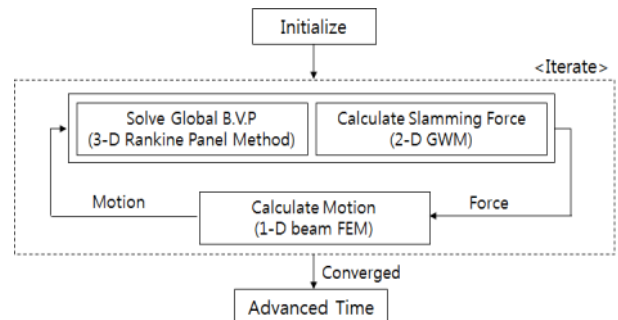


Fig. 2 Flow chart for fluid-structure interaction

2.3 유체 모델

선체 주변의 유동장 해석을 위한 유체 모델은 3차원 포텐셜 유동을 가정하고, 유동장을 이상유체로 가정하기 때문에 속도 포텐셜로 표현할 수 있다. 속도 포텐셜은 라플라스 방정식을 만족

하며, 경계조건을 적용하여 이를 만족하는 해를 구할 수 있다. 또한 거친 해상 상태에서의 높은 파고에 의한 강한 비선형성과 실제 접수 면적에 대한 입사파의 기진력과 유체 정역학적 힘의 변화를 고려하기 위하여 약비선형 접근법(weakly-nonlinear approach)을 적용하였다.

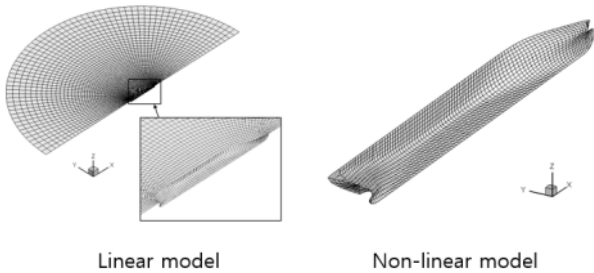


Fig. 3 Linear and nonlinear model

이 방법은 Fig. 3의 선형 모델(linear model)을 이용하여 유체 동역학 힘을 구하고, 비선형 모델(nonlinear model)을 이용하여 선박의 실제 입수면에 대하여 Froude-Krylov 힘과 복원력을 계산하는 방법으로써, 비선형 해석방법(nonlinear approach)에 비해 매우 짧은 해석 시간이 소요되며 선형 모델 보다는 좀 더 선박에 의한 비선형성을 반영할 수 있는 장점이 있어서 실용적인 면에서 많이 사용되는 방법이다. 앞 절의 식 (2)에서 선형 입사파 포텐셜을 이용하여 실제 입수면에 대한 비선형 Froude-Krylov 힘을 계산할 때 수신면 아래에서는 바로 계산할 수 있고, 수신면 위에 대해서는 선형입사파 포텐셜을 파 높이에 대하여 테일러 급수(Taylor series)를 이용하여 계산할 수 있다. 비선형 복원력을 적용하기 위하여 해당 시간 내에서의 초기 정수 중 위치에서의 유체정역학적 힘이 계산되어야 한다. 해당시간에서의 유체 정역학적 힘은 입사파와 선박의 실제 위치에서의 입수면에 대하여 계산되며, 이 둘의 차이를 통하여 비선형 복원력이 계산된다.

2.4 구조 및 슬래밍 모델

본 연구에 적용된 구조모델은 이상화된 보 모델이다. 3차원 구조물인 선체의 형상을 1차원 보 모델로 최대한 이상화하여 치환시키기 위하여 Fig. 4와 같이 3차원 구조 모델링을 수행하였다. 모델링은 MSC사의 Patran 2012.2.2를 이용하여 수행하였으며, 선체에 적용된 경하 질량 분포(light weight distribution)를 제외한 질량분포를 표현하기 위하여 컨테이너, 라싱 브릿지(lashing bridge) 및 해치 커버(hatch cover)의 질량을 RBE(rigid body element)와 절점 질량(point mass)를 이용하여 구현하였다.

여기서, 내부 하중(internal force)이 전달되는 이중저 및 해치 상단이 강체화 되는 것을 방지하기 위하여 이곳의 절점을 독립 절점(independent node)으로 지정하고 각각의 질량 중심을 종속 절점(dependent node)로 지정하였으며, 구속조건을 고려하여 RBE3의 기능을 사용하여 모델링 하였다. 컨테이너선의 하중 상태는 만재 상태에서 정수 중 굽힘모멘트가 최대 호깅 조건

(maximum hogging condition)이 되는 하중 조건이며 1차원 보 모델을 이용한 직접 해석법을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같은 이상화된 보 모델로 치환되었다.

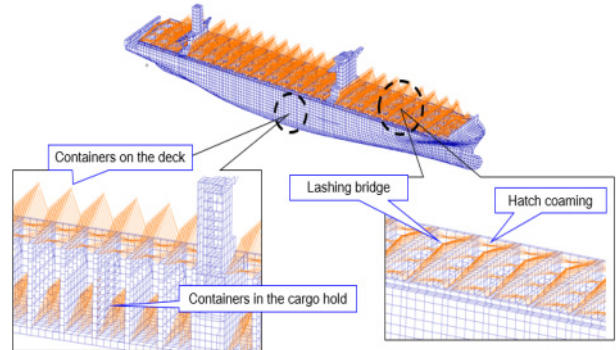


Fig. 4 Structural model(Mass distribution)

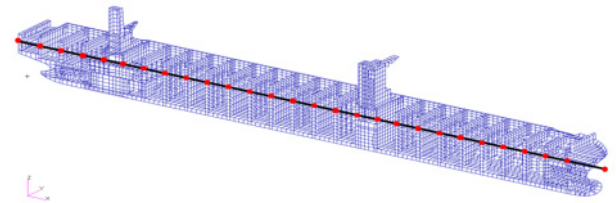


Fig. 5 Idealized beam model

큰 개구부를 갖는 컨테이너선의 경우 비틀림(torsion)에 의한 뒤틀림(warping)까지 고려해야할 필요성이 있으므로 계산에 적용된 1차원 보 모델은 횡굽힘-비틀림을 고려한 블라스프 보이론에 기반하고 있다. 길이방향으로 횡격벽(transverse bulkhead)의 위치에 절점을 설정하고 각 절점 사이에서 대표되는 단면 정보를 추출하였다. 3차원 FE 전선 모델을 1차원 보이론 모델로 치환하여 계산할 때 보 모델에 적용되는 성분은 다음과 같다.

- Area, Shear Area, Second moment of Area
- Torsional Constant, Warping Constant, Shear Constant
- Neutral Axis, Center of Gravity, Mass
- Polar mass moment of Inertia, Second moment of Inertia, Warping Inertia

선체의 구조 진동인 휘핑 현상은 선수부 및 선미부의 강한 슬래밍 하중에 의해 발생된다. 이러한 슬래밍 하중은 접수 면적의 변화에 따른 부기질량의 변화에 의해서 발생하며, 접수면적에 변화가 없다고 가정하는 선형 포텐셜 기반의 경계치 문제로는 해를 구할 수 없다. 이 연구에서는 슬래밍 계산을 위하여 유동장을 이상유체로 가정하고 경계조건을 실제 접수 물체표면과 상승하는 자유표면과 물체가 맞닿는 접점에 위치한 수평선에 적용하여 그 속도 포텐셜을 계산하는 2차원 슬래밍 모델인 GWM을 선수파(head sea)에 대하여 적용하였다. Khabakhpasheva et al. (2014)은 이 모델에 대하여 유체동역학적 압력을 속도의 제곱에

비례하는 슬래밍 압력과 가속도에 비례하는 부가질량 압력으로 구성하여 두항을 서로 독립적으로 표현하여 초기 조건문제의 해를 구하였으며, 평판의 입수문제에 대한 해석적 해와 임의의 형상으로부터의 등각 사상 함수를 통하여 해를 구하는 방법을 적용하였다. 계산에 사용된 슬래밍 모델은 Fig. 6과 같다.

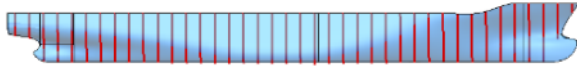


Fig. 6 Slamming model

3. 실선 유탄성 해석

유탄성 해석에 사용될 모델을 컨테이너선의 크기에 따라 총 6척을 선정하였다. 이 중 3척은 선실(deck house)과 연돌(funnel)이 선미에 위치한 선박이며, 다른 3척은 선실이 선수부에 위치하고 연돌은 선미부에 위치하는 선박이다. 두 선박의 일반적인 형상을 Fig. 7에 나타내었고 선박 별 기본 제원은 Table 1과 같다.

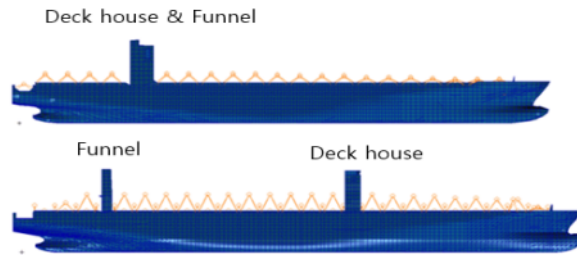


Fig. 7 Container ship type

Table 1 Principle dimension

Type	Ship	Length (m)	Breadth (m)	Draft (m)
Deck house (aft)	A	334	45.6	13
	B	286	48.2	12.5
Funnel (aft)	C	319	42.8	13
Deck house (fore)	D	383	58.6	14.5
	E	347	48.2	14.5
Funnel (aft)	F	350	48.2	14.5

변환된 1차원 보이론 모델과 3차원 전선모델의 동적 특성을 확인하고 모드의 결과 값을 비교하기 위하여 각각 모드해석을 수행하였다. 3차원 전선 모델의 외판이 흡수까지 잠긴 것을 고려하여 해수에 의한 부가질량이 고려되는 접수 조건(wet condition)과 고려되지 않는 비접수 조건(dry condition)에서 계산을 수행하였다. Table 2와 같이 비접수 조건에서 가장 낮은 차수에서 발생

되는 비틀림 모드(T)와 종 굽힘 모드(VB)의 결과가 상당히 일치하는 것을 보아 치환된 1차원 보이론 모델이 3차원 모델의 정보를 잘 반영하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 3차원 모델의 접수 조건에서는 부가질량에 의해 비접수 조건의 결과보다 저주파수의 응답이 나타나는 것을 확인 하였고 이것은 실제 1차원 보모델의 유탄성 시간해석의 결과에서도 확인 할 수 있다.

Table 2 Natural frequency of mode shape

Ship	3D FE model (Dry)		3D FE model (Wetted)		1D beam model (Dry)	
	VB (Hz)	T (Hz)	VB (Hz)	T (Hz)	VB (Hz)	T (Hz)
A	0.627	0.357	0.489	0.335	0.638	0.343
B	0.654	0.390	0.521	0.367	0.677	0.389
C	0.588	0.333	0.462	0.313	0.613	0.326
D	0.595	0.378	0.462	0.351	0.614	0.397
E	0.603	0.386	0.471	0.352	0.614	0.385
F	0.575	0.358	0.413	0.318	0.566	0.359

*VB = vertical bending mode

T = torsional mode

3.1 해석 조건

설계 해상 상태 접근법을 적용하기 위하여 파랑분포도 내의 발현확률이 있는 모든 해상 상태에 대하여 시간해석을 수행하는 것은 현실적으로 어렵다. 휘핑 영향도의 평가 절차에 따라 슬래밍으로 인한 파랑 중 종 굽힘 모멘트의 증가분은 URS 11A의 절차에 따라 계산되는 규정값의 확률 수준에서 추정하게 되는데, 이 규정값은 현존하는 컨테이너 선박들의 장기값의 통계로 수식화 되어있다. 계산에 적용되는 설계 해상은 이 장기값의 결정과 관련이 깊은 해상 상태를 선정하는 것이 합리적이라 할 수 있으며, 여기에서는 장기값의 결정에 기여도가 가장 큰 해상 상태를 선정하여 다른 해상 상태의 응답을 대표하는 설계 해상 상태로 선정하였다. 선박의 장단기 해석을 수행한 후 선박의 설계 수명 동안의 확률 수준에서 장기값을 계산하였고, 그 장기값의 계산에 기여하는 해상 상태의 기여도를 Fig. 8과 같이 나타내었다. 이 선박의 경우 유의파고는 14.5 m, 영점교차주기는 11.5초의 매우 거친 해상상태가 장기값의 약 9.0%의 비율로 가장 큰 기여를 하는 것으로 계산 되었다. 총 6척의 컨테이너 선박에 대하여 장기값의 결정에 기여도가 가장 큰 해상상태의 통계는 매우 유사하여, 파랑분포도내에서 14 m 이상의 매우 높은 유의파고를 갖고, 10초 내외의 영점교차주기를 갖는 거친 해상상태가 설계해상으로 선택되었다. 높은 파고에 의한 슬래밍의 발생 확률 증가와 선체에 가해지는 매우 큰 에너지를 갖는 10초 내외의 파도의 주기를 고려하였을 때 위와 같은 방법으로 설계 해상을 결정하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

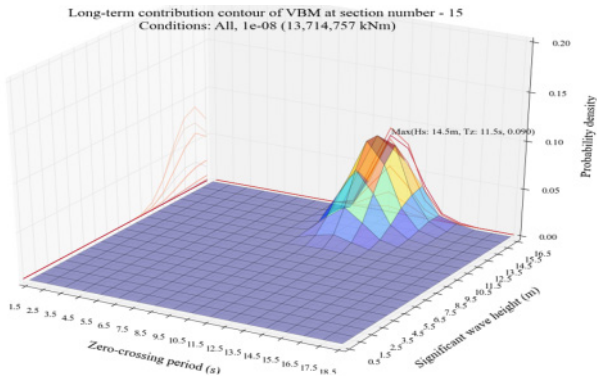


Fig. 8 Example of contribution to Long-term value

시간영역에서의 유탄성 해석을 수행하기 위한 해석 조건은 다음과 같다. 파고가 높은 해상상태를 고려하여 저속인 5노트로 선속을 정하였고, 슬래밍이 발생할 확률이 높은 선수파를 적용하였다. 해석시간은 해상상태의 지속 시간을 고려하여 3시간으로 정하였으며, 슬래밍 하중의 피크값과 종 굽힘모멘트의 진동 성분 등 불규칙한 시계열 데이터를 손실 없이 얻을 수 있도록 0.025초의 충분히 작은 간격으로 시계열 데이터를 출력하였다. 파랑 스펙트럼은 Pierson-Moskowitz(PM) 스펙트럼을 적용하였고 스펙트럼의 주파수 영역은 장파장은 배 길이의 4배, 단파장은 접수상태에서 1차 종 굽힘 모드(2절점 종 굽힘 모드)가 포함되도록 적용하였으며, 주파수 간격은 균등하게 배분하였다. 불규칙파를 구성하는 규칙파의 총점 개수는 해석 시간별 수렴도 테스트를 통하여 150개의 충분히 많은 개수를 조합하였다. 점성 감쇠 계수는 5%, 구조 감쇠 계수는 2%가 적용되었고, 초기 과도응답을 제거하기 위하여 해석시간은 목표시간에 200초를 더하여 수행하였으며, 위상차의 불규칙성을 충분히 고려하여 결과의 수렴성을 얻기 위하여 40회의 반복 해석을 수행하였다.

3.2 유탄성 해석 진행 및 결과

3시간 동안 유탄성 시간해석을 진행하고 나면 선체 중앙부의 종 굽힘 모멘트 시계열 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 9의 유탄성 시계열 결과는 정수 종 굽힘모멘트가 포함되지 않은 것이며, 컨테이너선의 경우 비선형성을 고려하였을 때 선형의 특성상 파랑에 의한 종 굽힘 모멘트는 호깅보다 새깅이 큰 것이 특징이다. 통계적인 특성을 확인하기 위하여 그림 아래에서와 같이 주파수 분석인 FFT(fast Fourier transform)를 수행하여 저주파수 대역인 파랑영역에서의 응답을 확인하였고 고주파수 대역인 0.4 Hz 근처의 구조 진동 응답영역에서 1차 종 굽힘 모드의 응답을 확인 할 수 있다. Table 2의 Type A 선박으로써 접수 상태에서의 고유모드 해석 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다.

휘핑으로 인한 종 굽힘 모멘트 증가분을 계산하기 위하여 휘핑이 고려되지 않은 데이터도 필요하다. 이 데이터를 얻기 위하여 유탄성 해석 결과에서 저역통과필터를 사용하여 고주파수 응답을 제거한 비선형 종 굽힘 모멘트를 추출하였다. 차단 주파수

는 진동성분을 충분히 제거하기 위하여 1차 구조모드의 0.9배를 적용하였다. 종 굽힘 모멘트의 피크 값들을 추출하는 과정은 다음과 같다. Fig. 10과 같이 휘핑으로 인한 진동성분이 포함된 데이터에서 저역필터를 통과한 진동성분을 제거한 데이터를 생성하였다. 저역필터를 통과한 데이터를 기준으로 영점교차주기를 선정할 수 있고 선정된 주기 내에서 변곡점을 파악한 후 절대값이 가장 큰 값을 대표 피크 값으로 선정하였다.

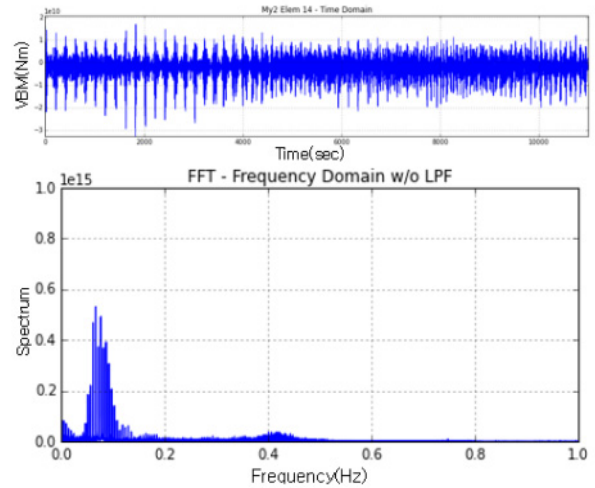


Fig. 9 Time series of vertical bending moment and frequency analysis

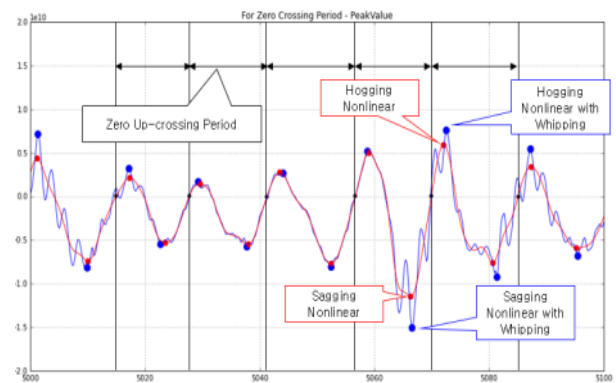


Fig. 10 Calculation of periods and peak values

다음으로 확률분포는 형상 모수(shape parameter)와 척도 모수(scale parameter)로 나타낼 수 있는 2모수 와이블 분포로 가정하였다. 두 모수를 추정하기 위하여 누적확률분포를 이용해 각 축에 로그를 취함으로써 선형화된 분포를 얻을 수 있다. 와이블 분포의 확률 밀도 함수(probability density function)의 형태는 식(3)과 같고, 와이블의 신뢰도 함수와 고장률 함수는 식(4) 및 (5)와 같다. 와이블 분포 근사의 정밀도 향상을 위하여 모수 추정 시 사용되는 선형 분포 값들 중에 상위 추정치와 크게 관계없는 하위 값은 무시하여 추정하는 끝단 가중치 방법(tail weighting method)을 적용하여 와이블 확률 분포가 휘핑 영향도 추정에 적용될 상위 분포의 값들과 거의 유사하게 추정 되게 하였다.

$$\int_0^t f(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

β : Shape factor

η : Scale factor

와이블 분포 초과 확률의 선형화가 완료되면 마지막으로 휘핑 영향도를 추정한다. IACS URS11A의 절차에 따라 선박의 최종강도 평가 시 적용되는 파랑 중 굽힘모멘트는 직접 계산 값이 아닌 규칙에 의해 계산되는 값이기 때문에 휘핑에 의한 모멘트 증가분 또한 이 값의 확률 수준에서 추정하기로 하였다. 따라서 Fig. 11과 같이 진동성분이 제거된 40개의 와이블 분포 데이터에서 각각의 확률 수준에서의 최댓값이 규칙에 의해 계산된 중 굽힘 모멘트와 일치하는 확률 수준을 찾는다. 각각의 확률 내에서 40개 데이터의 분포를 정규 분포(normal distribution)라 가정하고 정규 분포의 평균(μ)에 분산(σ)의 3배를 더한 값으로 그 확률 내에서 기대할 수 있는 최댓값으로 정하였다. 그 다음으로 선택된 확률 수준에서 휘핑이 고려된 데이터의 최댓값을 앞의 방법과 동일하게 계산하여 중 굽힘 모멘트의 증가분을 휘핑의 기여도로 산정하였다.

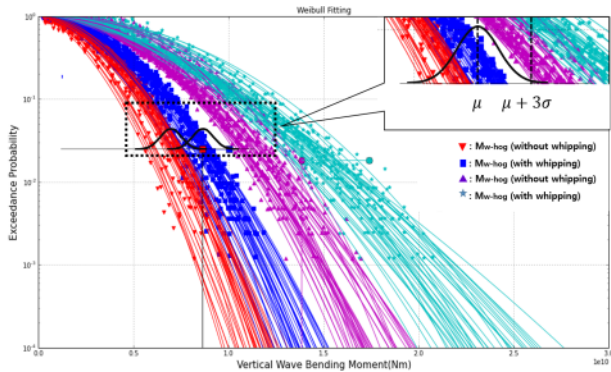


Fig.11 Estimation of whipping effect

4. 휘핑 영향도 분석

앞의 절차에 따라 총 6척에 대한 해석을 수행하였다. 컨테이너 선박은 선박의 특성 상 정수 중 굽힘 모멘트(still water bending moment)가 파랑 중 굽힘 모멘트(vertical wave bending moment)의 값 수준으로 항상 양의 값이기 때문에 휘핑 영향도는 호킹 상태 일 때만 계산하였다.

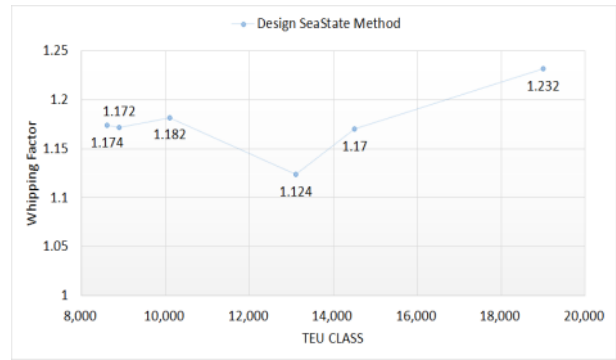


Fig. 12 Whipping effect by ship size

Fig. 12는 호킹 상태에서 컨테이너선의 크기에 따른 휘핑에 의한 중 굽힘 모멘트 증가분을 나타낸다. 10,000 TEU급 이하는 선실과 연돌이 선미에 위치하는 선박으로서, 휘핑에 의한 중 굽힘 모멘트의 증가가 약 17%에서 18%인 것을 확인하였다. 크기에 따라 확인한 차이는 없지만 배 길이가 증가 할수록 휘핑 영향도가 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다. 13,000 TEU급 이상은 선실이 선수에 위치하는 선박으로서 약 12%에서 23%까지 컨테이너선의 크기 변화에 따라 그 변화량이 큰 것을 확인 하였다. 원인을 분석하고자 선수와 조건에서 휘핑에 의한 진동 성분에 밀접한 관련이 있을 것으로 예상 되는 변수 중 1차(2절점) 중 굽힘 모드의 두 절점간의 거리와 선체 길이의 비를 확인하였다. Table 3과 같이 선실과 연돌이 선미에 위치하는 선박들은 선박 길이와 두 절점간 거리의 비율의 차이가 크지 않았고, 선실이 선수에 위치하는 선박은 크기에 따라 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 강성이 큰 구조인 선실과 연돌의 간격의 차이가 영향을 준 것으로 예측되며 휘핑 영향도 결과와 비교하여 유추하였을 때 밀접한 관련이 있을 것으로 예측된다.

Table 3 Distance between 2-nodes on 1st vertical bending mode

Ship type		Distance of 2-nodes / L
Deck house (aft)	A	0.458
	B	0.433
Funnel (aft)	C	0.445
Deck house (fore)	D	0.407
Funnel (aft)	E	0.530
	F	0.437

컨테이너선 6척의 휘핑 영향도 경향을 분석하고 선박의 휘핑 영향도를 설계 초기 단계에 가늠해 볼 수 있도록 계산된 기여도 결과를 바탕으로 경험식을 만들기 위하여, 앞서 살펴본 변수 이외에 선체 중앙부에서 슬래밍에 의한 선박의 구조응답에 큰 영향을 줄 것으로 예측할 수 있는 강성 및 진동과 관련된 변수를 고려하였다. 강성에 직접적인 영향은 주는 변수는 단면 2차 모멘트이고 접수 중 진동과 밀접한 관련 있는 질량과 관련된 변수는

선박의 배수량이 될 것이다. 하지만 선택된 각각의 변수의 크기는 단순히 선박의 크기에 매우 의존적이기 때문에 추정된 휘핑 영향도와 직접적인 비교는 어렵다. 따라서 Table 4와 같이 두 변수의 비율과 휘핑 영향도의 관계를 고려해 보았고, 두 변수의 비율이 증가할수록 추정되는 휘핑 영향도도 함께 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4 Property by ship size

Ship	(1) 2^{nd} moment of inertia ($\times 10^3 m^4$)	(2)displacement ($\times 10^5$ ton)	(1)/(2) ($/10^3$)	Whipping factor
A	0.90	1.61	5.61	1.182
B	0.64	1.43	4.47	1.172
C	0.68	1.35	4.99	1.174
D	1.80	2.13	8.45	1.232
E	1.10	1.68	6.52	1.170
F	1.12	1.84	6.06	1.124

따라서, 이 두 변수의 비율과 앞에서 예측된 1차 중 굽힘 모드의 절점간의 거리의 변수를 독립적으로 구성하여 관계식을 구성하였다. 아래의 식(6)은 강성과 질량의 관계와 중 굽힘 모드의 두 절점 거리 관계에 보정계수를 더하는 방식으로 구성하였다. 식 (6) b(1차 중 굽힘 모드의 절점간 거리/선박의 길이)의 항목에서 선실과 연돌이 선미에 위치하는 선박은 선체 치수에 따른 특이점이 없어 이를 상수화 하였고, 선실이 선수에 위치하는 선박의 경우 두 구조물의 위치에 따라 구조 모드의 절점이 유동적이기 때문에 이를 관계식으로 표현하였다. Table 5는 관계식의 각 항목별 변수를 나타낸다.

$$\text{휘핑 기여도}(\%) = a(\text{단면 } 2\text{차모멘트}/\text{배수량}) + b(1\text{차 중 굽힘 모드의 절점간 거리}/\text{선박의 길이}) + c(\text{Correction factor}) \quad (6)$$

Table 5 Relational formula by ship type

Deck house(fore), Funnel(aft)	
Stiffness term	6.26 x ly
Displacement term	0.7 x ∇ / 1000
VBM mode term	10 x L_node / Lbp
Correction constant	-43
Deck house(aft), Funnel(aft)	
Stiffness term	6.26 x ly
Displacement term	10.0 x ∇ / 1000
VBM mode term	4.46
Correction constant	10.2

5. 결론

본 연구에서는 선박의 유탄성 현상 중 하나인 슬래밍-휘핑을 고려하여 컨테이너선의 강도평가를 수행할 수 있는 절차를 개발하고 평가절차에 따라 기존에 건조 되어 있는 총 6척의 대형컨테이너선에 적용하여 영향도를 평가하였다. 유탄성 해석 시 주파수별 파랑의 랜덤한 위상을 고려하기 위하여 파랑스펙트럼의 조건에 대한 수렴성 확인이 선행되어야 했으며, 계산에 사용된 컨테이너 선박의 경우 3시간의 수렴성을 확인하였다. 개발된 절차 중 불규칙파를 이용하는 설계 해상상태 접근법을 적용하였으며 선택된 해상상태에서 휘핑에 의한 진동 성분이 포함된 중 굽힘 모멘트의 시계열 데이터를 얻었고 이를 이용하여 저역 필터를 통하여 진동성분이 제거된 응답을 얻을 수 있었다. 각각 데이터들에서 피크 값들의 확률분포를 추정하기 위하여 와이بل 분포를 적용하였으며 피팅의 정밀도 향상을 위하여 하위 값들은 제외하고 추정 하는 끝단 가중치 방법 적용하였고 피크값들의 확률 분포를 나타내는 히스토그램 간격의 최적화를 위한 방법도 적용하였다. 위상차의 불규칙성을 충분히 고려하기 위하여 40회의 반복 해석을 수행하였으며 최종강도에 적용되는 규칙에 의해 계산되는 중 굽힘 모멘트의 확률 수준에서 휘핑에 의한 모멘트 증가분을 계산하였다.

크기별 총 6척에 대하여 유탄성 해석을 수행하였고 선실과 연돌이 선미부에 위치한 선박의 경우 호킹 상태에서 20%내의 휘핑에 의한 중 굽힘 모멘트 증가가 예측되었고, 선박의 크기별 휘핑 영향도 차이는 크게 없는 것으로 분석 되었다. 선박의 길이와 1차 중 굽힘 모드의 두 절점의 간격의 비가 거의 유사함이 원인 중 하나로 예측되었다. 컨테이너선이 더욱 대형화 되면서 적용된 선실 선수, 연돌 선미에 위치한 선박의 경우 25%내에서 중 굽힘 모멘트의 증가가 예측되었고 선박의 크기에 따른 차이가 뚜렷하였고 선실과 연돌의 위치에 따른 1차 중 굽힘 모드의 두 절점간의 거리가 영향을 주는 것으로 예측되었다.

마지막으로 설계 초기 단계에서 복잡한 유탄성 해석 절차를 거치지 않고 슬래밍으로 인한 중 굽힘 모멘트의 증가분을 추정할 수 있는 산식 개발의 초기 연구로써, 분석된 휘핑 영향도를 바탕으로 경험식을 구성해 보았다. 경험식은 컨테이너 선박의 타입별로 선박의 진동과 관련이 깊을 것으로 예상되는 면적 2차 모멘트, 배수량, 1차 중 굽힘 모드의 절점 거리 등의 변수를 선택하여 구성하였다. 실제 규칙에 반영될 수 있는 산식의 개발을 위하여 선박의 추가적인 유탄성 계산 후 진동 및 선체 특성의 경향을 파악하고 연관성을 찾는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Bishop, R.E.D., Price, W.G. & Zhang, X.C., 1985. A note on the dynamical behavior of uniform beams having open channel section. *Journal of Sound and Vibration*, 99(2), pp.155-167.

- Choung, J.M. et al., 2012. Study on applicability of frequency domain-based fatigue analysis for wide band gaussian process I : Rayleigh PDF, *Journal of the society of Naval Architects of Korea*, 49(4), pp.350-358.
- Heggelund, S.E., Storhaug, G. & Choi, B.K., 2011. Full scale measurement of fatigue and extreme loading including whipping on 8600TEU post panama container vessel in the Asia to Europe trade. *Proceeding of the ASME 2011 30th international Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, The Netherlands, 19-24 June 2011.
- IACS, 2014, *Common structural rules for bulk carriers and oil tankers*. International Association of Classification Societies: London, UK.
- IACS, 2016, *UR S11A(Longitudinal strength standard for container ships)*, International Association of Classification Societies: London, UK.
- Im, H.I., Nikola, V., Sime, M. & Cho, D.S., 2017. Hydroelastic response of 19,000TEU class ultra large container ship with novel mobile deckhouse for maximizing cargo capacity. *International Journal of the Naval Architects and Ocean Engineering*, 49(4), pp.339-349.
- Khabakhpasheva, T.I., Kim, Y. & Korobkin, A.A., 2014. Generalized wagner model of water impact by numerical conformal mapping. *Applied Ocean Research*, Vol.44, pp.28-50.
- Kim, J.H., Bang, J.S., Kim, Y. & Kim, S.J., 2012. Analysis on the hydroelasticity of whole ship structure by coupling three-dimensional BEM and FEM. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), pp.312-326.
- Kim, Y.H. & Kim, Y.I., 2008. *WISH JIP Phase 1*, Seoul National University Report.
- Kim, Y.H. & Kim, Y.I., 2011. *WISH-FLEX : Development of prediction method for ship structural hydro-elasticity in waves(springing and slamming-whipping)*. Seoul National University Report.
- Kim, Y.I., Kim, K.H. & Kim, Y.H., 2009. Analysis of hydroelasticity of floating ship-like structure in time domain using a fully coupled hybrid BEM-FEM. *Journal of Ship Research*, 53(1), pp.31-47.
- Lee, H.Y., Lim, C.G. & Jung, H.B., 2003. Hydroelastic responses for a ship advancing in waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4), pp.16-21.
- Lee, Y.W. & Spyros E., 2012. Comparison of springing and whipping responses of model tests with predicted nonlinear hydro elastic analyses. *International Journal of offshore and polar engineering*, 22(3), pp.1-8.
- MSC software, 2012. *User manual for Patran 2012.2.2. MSC software*. [Online] Available at: <http://www.mscsoftware.com>.
- Senjanovic, I., Catipovic, I. & Tomaservic, S., 2008. Coupled horizontal and torsional vibrations of a flexible barge. *Engineering Structure*, 30, pp.93-109.
- Senjanovic, I., Tomaservic, S. & Vladmir, N., 2009. An advanced theory of thin-walled girders with application to ship vibrations. *Marine Structure*, 22, pp.387-437.
- Storhaug, S. et al., 2011. First ocean going ships with springing and whipping included in the ship design. *Proceeding of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Rotterdam, The Netherlands, 19-24 June 2011.
- Wu, J.S. & Ho, C.S., 1987. Analysis of wave-induced horizontal and torsional coupled vibrations of a ship hull. *Journal of Ship Research*, 31(4), pp.235-252
- Wu, M.K. & Hermundstad, O.A., 2002. Time-domain simulation of wave-induced nonlinear motions and loads and its applications in ship design. *Marine structure*, 15, pp.461-597.
- Wu, M.K. & Moan, T., 2005. Time calculation of wave-induced ship response considering structural dynamic effects. *Applied Ocean Research*, 27, pp.81-96.

