

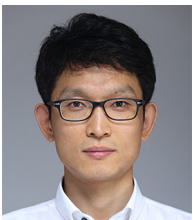
Tdyn-CFD 및 Tdyn-SeaFEM을 이용한 자유수면 및 파랑 모사

Simulation of Free Surface and Sea Wave using Tdyn Package CAE Software

1. 서론

최근 화석 연료의 고갈 및 연료 연소시 발생하는 환경 오염 문제와 원자력 에너지의 위험성 대두로 인해 신재생 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 그 중 파력 발전 및 조류 발전 등의 자연에 상존하는 해상 환경 하중으로부터 에너지를 추출하는 방법들이 관심을 받고 있는 상황이다. 뿐만 아니라 또 다른 신재생 에너지인 태양광 발전은 정부적인 지원 하에 민간 설치까지 확대되고 있다. 태양광 패널 지상 설치가 발생시키는 여러 가지 환경적인 문제로 인해 최근에는 수상 설치로 이동해 가는 추세이며, 특히 해상에 설치하는 방법이 최근 큰 관심을 받고 있다. 실제로 새만금에 대규모 수상 태양광 사업이 정부 차원에서 추진되고 있어 관련 분야 기술 및 표준화에 대한 관심도 증가하고 있다. 해상에 태양광 설비를 설치하게 되면, 염분이 포함된 해수로 인한 구조물의 부식문제를 기술적으로 고려해야 하는 문제점 외에도 시설물이 해상에 부유하게 되면서 발생하게 되는 바람, 파도, 조류의 영향력을 고려할 수 있는 기술적인 문제를 해결해야 하므로 반드시 복잡한 다중 물리 현상에 대한 이론적 배경을 바탕으로 부유체 운동 성능 평가가 수반되어야 한다.

본 기사에서는 해상에 설치되는 고정 및 부유 구조물에 대한 하중 해석을 위해 다중 물리현상 해석 프로그램인 Tdyn package를 활용한 자유수면 모사 및 부유체 운동 성능 해석의 사례를 살펴봄으로서 Tdyn package의 해상 토목 구조물 및 부유체의 안정성 해석 도구로서의 활용 가능성을 살펴보고자 한다.



최 춘 범

에이블맥스(주) CAE사업부



류 용 옥

전남대학교 토목공학과

2. Tdyn 소프트웨어 소개

스페인의 compass(Compass Ingeniería y Sistemas)사와 CIMNE(International Center for Numerical Methods in Engineering)가 공동 개발한 Tdyn 프로그램은 다음과 같이 3개의 솔버로 구성된 다중 물리해석 소프트웨어이다.

- (a) Tdyn CFD-HT : 유체 및 열전달 해석
- (b) Tdyn RamSeries : 구조해석
- (c) Tdyn SeaFEM : 내항성(seakeeping) 해석

Table 1 Tdyn Package's Capabilities Chart

Package	Capabilities
common	<ul style="list-style-type: none"> • Scripting programming interface based on the scripting language Tcl-Tk
CFD+HT	<ul style="list-style-type: none"> • 3D, 2D and axi-symmetry FIC-FEM Reynolds equations solvers • Fluid models: fully incompressible, slightly compressible, barotropic, incompressible ideal gas, ideal gas • Advanced structured and unstructured meshers, including boundary layer mesh generation • Different RANS, ILES (Implicit Large Eddy Simulation) and DES (Detached Eddy Simulation) turbulence models • Convection-conduction (fluids) and conduction (solids) heat transfer solver • Coupled fluid-solid heat transfer (conjugate heat transfer technology) • Free surface (ODDLS and transpiration) solvers • Space varying, transient and advanced boundary conditions • Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) solver for moving meshes • Mesh updating: prescribed / free bodies movement, explicit and combinations of these strategies • Generic user-defined PDE solver • Advection/diffusion of mass/species in fluids and solids • Cutting-edge GPU accelerated and parallel CPU-SMP iterative solvers
RamSeries	<ul style="list-style-type: none"> • Line models: 3D beams and cables • Shell element models: 4-8 nodes quads, 6 nodes triangles, DKT, 3 nodes triangles with drilling rotation, and stiffened shells • 3D solid element models: 4-10 nodes tetras and 8-20 nodes hexas • Advanced structured and unstructured meshers • Linear statics calculation • Dynamic, modal and direct time integration, analysis • Element to element contact-impact algorithm, including contact elements and automatic beam-shell contacts • Nonlinear tools: large displacements, plasticity and NL constraints • P-Delta buckling-analysis method • Composite laminated shells and beams • Fatigue assessment (DNV-RP-C203, API RP 2A-WSD) • One-way and two-way implicit fluid-structure interaction solvers • One-way and two-way implicit seakeeping-structure coupled solvers (SeaFEM package required) • Thermo-mechanical solver (CFD+HT package required) • Tools for automatic generation of parametric models (based on XML technology) • Cutting-edge parallel CPU-SMP direct/iterative sparse-matrix solvers
SeaFEM	<ul style="list-style-type: none"> • 3D Time domain FEM multi-body wave diffraction and radiation • Forward speed with stream-line and SUPG integration • Seakeeping, towing, maneuvering, extinction tests and RAOs • Nonlinear hydrodynamics, drift effects and transom stern flows • Linear and second order radiation-diffraction solver • Regular and irregular (spectral) waves, including user defined spectrum • Bathymetry: infinite depth, constant depth and irregular seabed • External forces and connections between bodies • Build-in multi-segment mooring models including dynamic FEM cable, spring and quasi-static catenary • Cutting-edge direct sparse and deflated CG solvers. CUDA GPU acceleration available

특히 다양한 솔버가 탑재되어 그들 간의 연성 해석이 수월한 장점이 있어 Tdyn CFD와 RamSeries를 이용한 유

체구조 연성해석(Fluid-Structure Interaction), SeaFEM과 RamSeries를 이용한 유탄성해석(Hydro-elastic)을 단일한

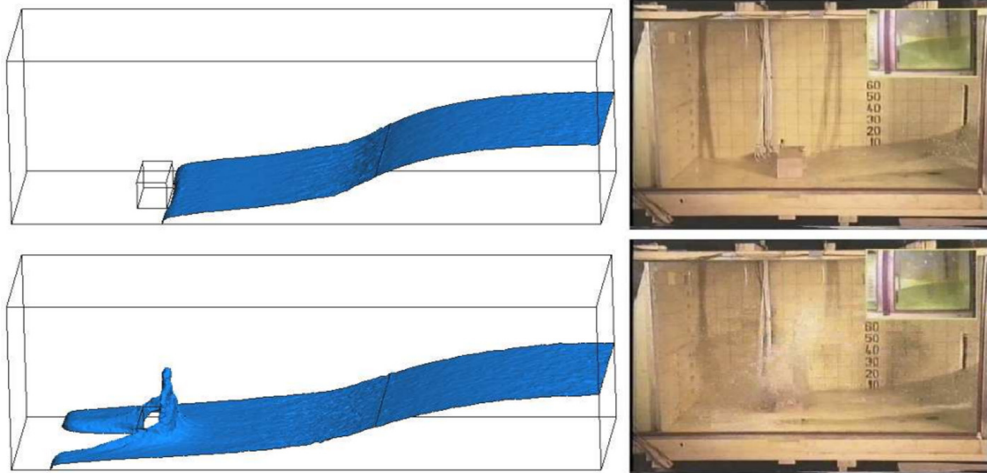


Fig 1 Zero level set surface of dam break case at $t = 0.425$ s (upper) and $t = 0.575$ s (lower)

작업환경에서 수작업에 의한 데이터 전달없이도 직접 수행하는 것이 가능하다. 각각의 package가 제공하는 세부 기능에 대한 소개는 Table 1에 소개되어 있다.

3. Tdyn-CFD를 이용한 자유수면 모사

Tdyn-CFD 솔버는 기본적으로 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 해석한다. 난류 모델은 LES모델 및 2-equation RANS 모델을 제공한다. 특히 자유 표면 모사를 위해 “계산 영역 분해(domain decomposition)” 기법이 적용되었다. 이는 2개의 유체 경계면에서의 지배방정식 해상도를 높여줄 뿐만 아니라 자유수면 추정 정확성도 향상시켜 준다. 자유수면 추정은 레벨셋 방정식에 기초하며 자유수면에서의 경계조건은 점프(jump) 조건이 사용된다.

3.1 댐 붕괴 모사

Fig. 1은 Tdyn CFD를 이용해 댐 붕괴를 모사하고 실험 결과와 비교한 그림이다. 우측의 그림은 Kleefsmann 등[1]에 의해 2005년 수행된 실험 결과이며 좌측에 나타난 Tdyn CFD로 해석한 자유수면 위치와 유사한 것을 확인할 수 있다.

3.2 파랑 중 선박 주행

Fig. 2는 Tdyn CFD를 이용해 파랑 중 선박의 내항성

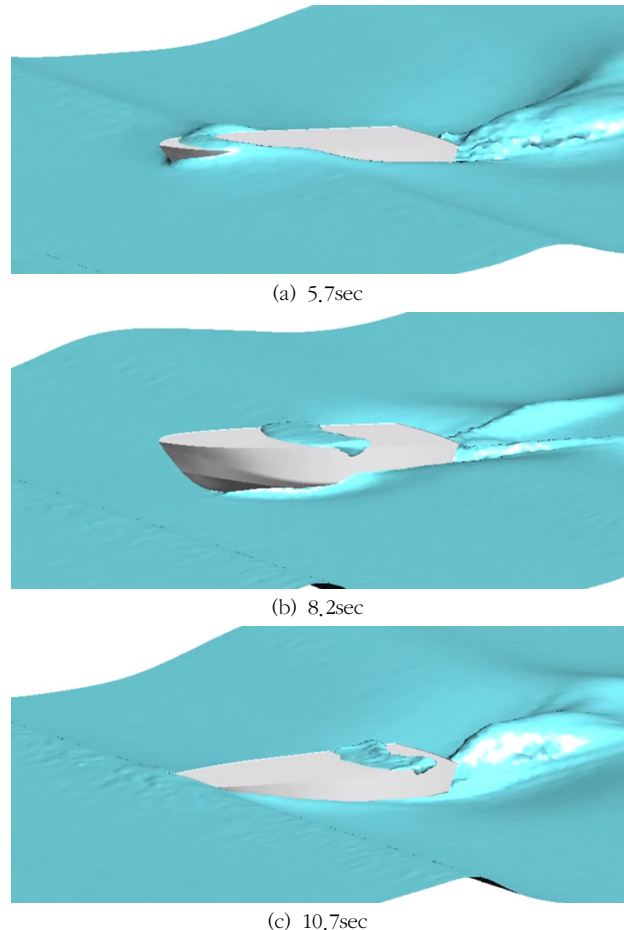


Fig. 2 Analysis of the seakeeping in head waves of a planning craft using Tdyn CFD

분석을 수행한 결과이다. Fig. 2(a)는 시간 경과 5.7초에서의 자유수면과 선박의 위치를 보여주고 있으며 Fig. 2(b)

는 8.2초 후, Fig. 2(c)는 10.7초 후의 자유수면을 보여주고 있다. 선박 상부로 유입되는 청파(green water)의 존재를 확인할 수 있으며, transom 선미에 발생하는 와류 형태도 확인할 수 있다.

4. Tdyn-SeaFEM을 이용한 해상 부유체 거동 모사

앞서 3.2절에서 소개한 바와 같은 CFD를 이용한 해상 부유체 운동 해석은 실험 연구를 대체할 수 있는 가장 정확한 수치해석 기법이다. 그러나 부유체 거동을 위한 상세 해석을 위해서는 현재까지의 컴퓨터 계산 성능으로도 꽤 많은 계산 시간이 필요한 것이 현실이다. 따라서 부유체 운동 해석에서 실질적인 영향이 적은 것으로 알려진 ‘점성’ 효과를 무시한 비점성, 비회전 유동 해석 방법은 오랜 기간 동안 조선 및 해양공학 분야에서 폭넓게 활용되어 왔다. 상대적으로 ‘점성’ 효과가 두드러지게 작용하는 것으로 알려진 횡방향 동요의 경우에만 필요에 따라 추가적으로 감쇠계수(Damping coefficients)를 적용한다면, 해수 유동에 대해서 포텐셜 유동(Potential flow) 방정식을 기반으로 좀 더 신속한 해석 결과를 확인하는 것이 가능하다. Tdyn-SeaFEM은 이에 최적화된 솔버이며 주파수 영역 해석(Frequency Domain Analysis) 뿐만 아니라 3차원 유한요소해석을 통한 시간영역 해석(Time Domain Analysis)도 제공한다. 특히 3차원 시간영역 해석에서는 주파수영역 해석 후 데이터 변환을 통해 시간영역 해석을 진행하는 번거로운 작업이 필요치 않으며, 한 번의 해석만으로 비선형 물리 현상까지도 해상할 수 있는 강력한 기능을 제공한다.

4.1 2개의 부유체 해석(주파수영역 해석)

SeaFEM은 기본적으로 주파수영역 해석이 가능하다. 대부분의 내항성 해석 프로그램들에서 그러하듯 해수에 잠긴 표면만 모델링한 후 파랑에 대한 경계조건을 부여하는 것만으로 전처리 과정은 충분하다. 본 예제에서는 2개의 부유체에 대한 2015년 Watai 등[2]의 연구 논문과의 비교를 수행하였다. 수로 내에서 고정된 바지선 측면에 상하동요와 피칭만 허용된 선박이 위치한 채로 이동시키는 실험 조건에 상응하는 모델 형상을 Fig. 3에 도시하였

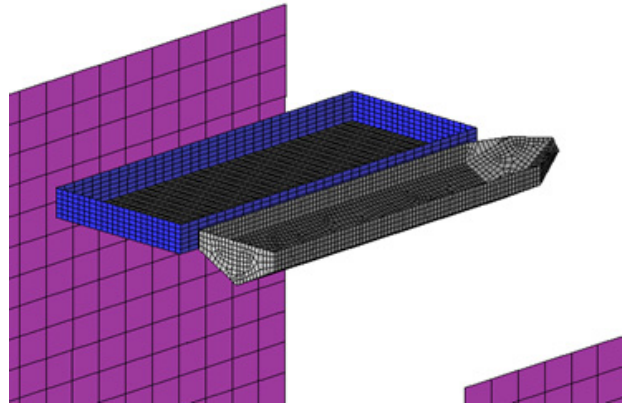


Fig 3 Models positions in relation to the frequency domain analysis in SeaFEM

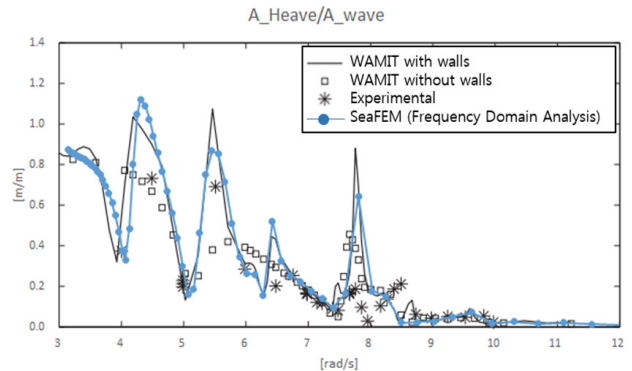


Fig 4 Comparison between SeaFEM numerical data and experimental values in terms of heave RAOs

으며, 실험결과와 SeaFEM의 결과를 Fig.4에 비교 도시하였다. Fig. 4의 별표(*)로 표시한 실험 결과와 파란색 원형 표식 및 실선으로 표시한 SeaFEM의 주파수영역 해석 결과는 거의 일치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 다만 실험에서 발생하는 선박 사이의 점성 효과로 인한 상하동요의 감쇠 효과는 주파수영역 해석에서는 발현되지 못해서 일부 주파수 구간에서는 실험 결과에 비해 과도한 상하동요값이 계산된 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

4.2 선박 내항성 해석(시간영역 해석)

SeaFEM은 3차원 유한요소 격자를 이용한 시간영역 내항성 해석 기능을 제공한다. 주파수영역의 결과를 시간영역으로 변환하는 번거로움도 필요가 없으며 비선형 효과 및 2차 정확도의 파랑 회절 및 방사 효과까지 반영할

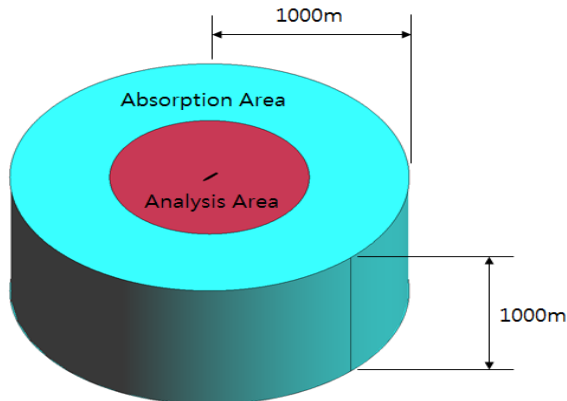


Fig. 5 Computational Domain for time domain seakeeping analysis in SeaFEM

수 있다. 본 예제에서는 정박된 컨테이너선 주위 파랑 조건에서의 시간영역 해석 결과를 소개하고자 한다.

선박의 전장(LOA)은 약 99m이며 전폭(extreme breadth)은 14m이다. 선박의 깊이는 약 7m이며 흘수는 5.35m로 가정되어 계산이 수행되었다. Fig. 5에서는 사용된 계산 영역을 보여주고 있으며, 전체 계산 영역의 반경은 1000m, 계산영역의 깊이는 1000m가 사용되었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 계산영역은 해석영역(Absorption Area, 갈색)과 흡수영역(Analysis Area, 시안색)으로 구분되어 있으며, 흡수영역은 계산영역 가장자리에서 반사된 파동이 선박 주위 유동에 영향을 끼치는 현상을 방지하기 위해 파동을 감쇄시켜주는 흡수 경계 조건이 적용되는 영역이다.

입사파는 국립해양조사원[3]에서 제공하는 이어도 해상에서의 2018년 파랑 정보를 기반으로 가장 빈도가 높은 상태인 유의파고 0.5m, 영점통과주기 5초가 적용된 JONSWAP 스펙트럼이 사용되었다. 또한 최대 파고 12m가 측정된 시점의 유의 파고 7m, 영점통과주기 9.3초의 JONSWAP 스펙트럼 조건도 추가로 계산을 수행하였다. 이에 앞서 주파수영역 해석을 선행하여 선박 측면에서 파도가 입사되는 정횡파 파향 조건에서 선박의 응답성이 가장 두드러진다는 사실을 확인하였으므로, 시간영역 해석은 정횡파를 가정하였다.

Fig. 6은 유의파고 0.5m, 영점통과주기 5초가 적용된 JONSWAP 스펙트럼 조건에서의 선박의 횡동요각이 최대인 시점에서의 선박 및 수면 높이를 시각화하고 있다. 수면의 높이는 최대 0.69468m(빨간색)에서 최소 -0.91951m(파란색)까지 색상 처리되었다. 최대 횡동요각은 -4.07°가 계산된 것을 정성적으로 확인할 수 있다.

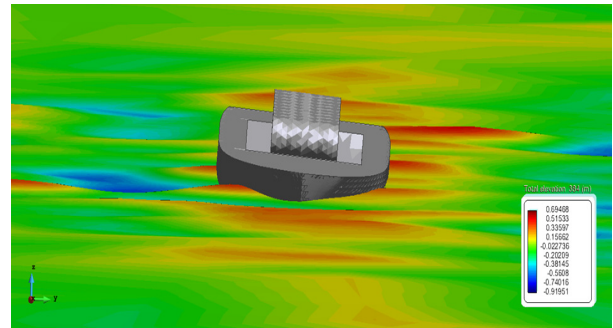
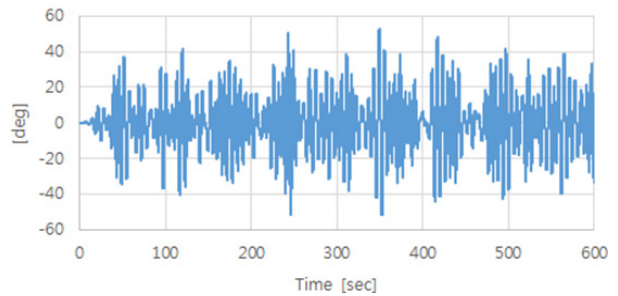
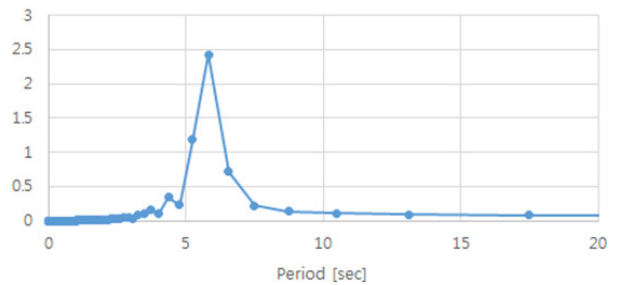


Fig. 6 Position of ship and wave elevation of time domain seakeeping analysis using SeaFEM; significant wave height is 0.5m, zero-crossing wave period is 5sec



(a) time history



(b) FFT of time history

Fig. 7 Roll result of time domain seakeeping analysis using SeaFEM ; significant wave height is 0.5m, zero-crossing wave period is 5sec

Fig. 7은 유의파고 0.5m, 영점통과주기 5초가 적용된 JONSWAP 스펙트럼 조건에서의 선박의 횡동요각 변화를 도시한 그림이며 Fig. 7(a)에는 600초까지의 시간에 따른 횡동요값을 도시하였으며, Fig. 7(b)에는 이를 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 주기(period) 기준으로 도시한 그림이다. 약 6초 주기의 진동 성분이 가장 지배적으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 입사파 자체가 영점통과주기 5초의 특성을 내포하고 있으므로 이것과는 미미하게 차이가 있는 6초의 응답 스펙트럼이 두드러진다는 것을 확인해 볼 수 있다.

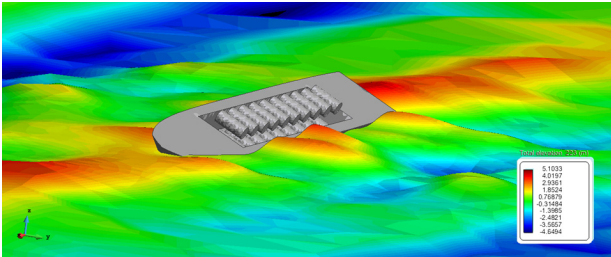
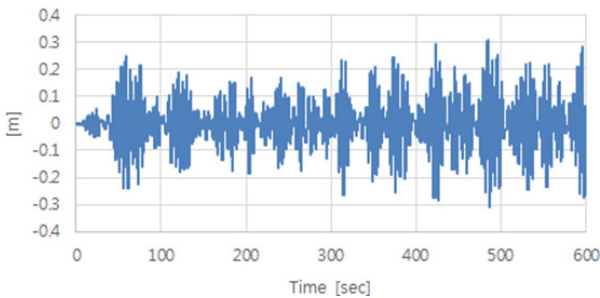


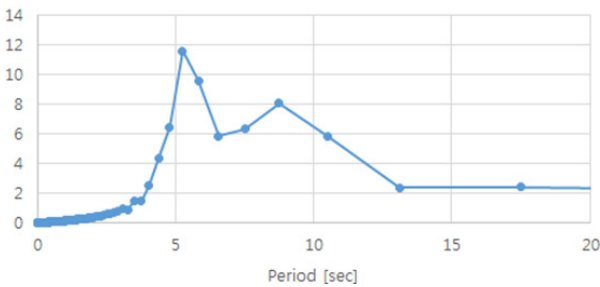
Fig. 8 Position of ship and wave elevation of time domain seakeeping analysis using SeaFEM ; significant wave height is 7m, zero-crossing wave period is 9.3sec

Fig. 8은 유의파고 7m, 영점통과주기 9.3초가 적용된 JONSWAP 스펙트럼 조건에서의 시간 영역 해석 결과 중 해석 시작 후 384초 경과 시점에서의 선박 및 수면 높이를 시각화하고 있다. 이 시점에서의 선박의 횡동요각은 -24.8°에 해당한다. 수면의 높이는 최대 5.1033m(빨간색)에서 최소 -4.6494m(파란색)까지 색상 처리되었다. 계산된 최대 횡동요각은 52.5°이었으며 이 정도의 횡동요각은 해당 선박이 해당 파랑 조건에서 안정성을 확보하지 못한 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 9는 유의파고 7m, 영점통과주기 9.3초가 적용된 JONSWAP 스펙트럼 조건에서의 선박의 횡동요각의 변



(a) time history



(b) FFT of time history

Fig. 9 Heave result of time domain seakeeping analysis using SeaFEM ; significant wave height is 7m, zero-crossing wave period is 9.3sec

화를 도시한 그림이며 Fig. 9(a)는 600초까지의 시간에 따른 횡동요값을 도시하였으며 Fig. 9(b)는 이를 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 주기(period) 기준으로 도시한 그림이다. 특히 Fig. 9(b)에서는 입사파의 영점통과주기인 9.3초 외에 약 5초 주기에서 지배적인 진동성분이 관찰되고 있다.

5. Tdyn-SeaFEM과 Tdyn-RamSeries를 이용한 유탄성 해석

Tdyn 패키지에 포함된 구조해석 솔버인 RamSeries와 SeaFEM을 연계해서 유체-구조 연성(FSI)해석이 가능하다. 1-way 방식의 연성(coupling)만 가능하며 파랑에 의한 선박 내외부 구조물의 응력 및 변위 등에 대한 해석을 단일한 작업 환경에서 동시에 진행할 수 있는 편의성을 제공하는 것이 특징이다. 대형 선박의 경우, 선박 전장거리의 유사한 파랑이 선수파 혹은 선미파로 입사하는 경우, 이른바 호깅 및 새깅 현상(hogging-sagging)이라고 하는 선체가 길이방향으로 과도하게 휘는 현상이 발생하게 되며 극단적인 경우에는 선체가 두 동강 나는 현상도 보고되고 있다. 이와 같은 유체와 탄성 구조체 간의 연성 해석은 조선해양 분야에서는 유탄성(Hydro-elastic) 해석이라는 명칭으로 불리며 다각도로 분석이 시도되어 왔다.

Fig. 10은 SeaFEM+RamSeries를 이용한 유탄성 해석에서 선박 구조체 격자를 보여주고 있다. 노드는 25,009개, 요소는 52,771개가 사용되었다. 선박의 수선간 거리는 26m이며 선박 폭은 6m이다. 이외에도 유체 영역 및 격자

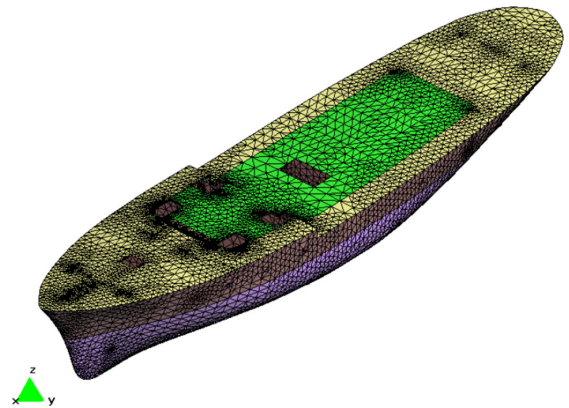


Fig. 10 An unstructured and triangular mesh of ship structure in RamSeries

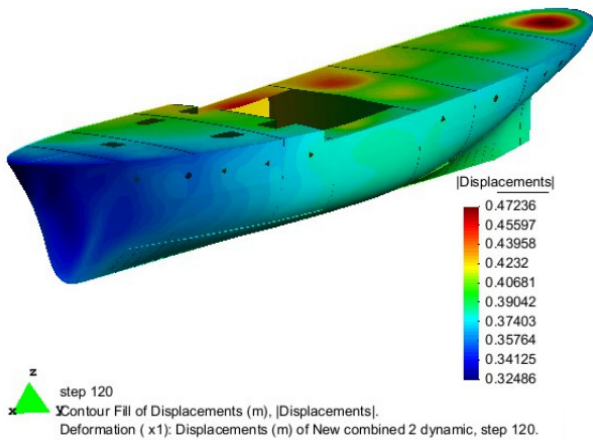


Fig. 11 Displacement contours of shell components composing of ship structure on step 120

구성도 함께 필요하게 된다. 수심은 50m로 가정되었으며 파동 간섭 효과를 제거하기 위한 흡수영역은 선박으로부터 반경 180m부터 적용되었다. 파랑 스펙트럼은 Pierson Moskowitz 스펙트럼이 사용되었으며 평균 파 주기는 6초로 설정하였다. 유의파고는 3m가 적용되었으며 최소 주기 2초부터 최대 11초까지 적용되었다. 파향은 최소 -15도에서 최대 15도까지 5개의 파향이 적용되었다.

Fig. 11은 유탄성 해석의 탄성 구조체의 변위를 색상으로 표시하고 있다. 시간 스텝이 120 진행된 시점의 최대 변위는 약 0.47m가 계산되었다. 선미부분보다 선수부분의 상승된 상태임을 확인할 수 있으며, 갑판 중앙 부위와 선수 부분에서 국부적인 변형이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

해상 부유체의 운동 성능을 평가하는 것은 시설물 자체의 안정성 확보뿐만 아니라 그 위에서 작업하는 작업자의 안전 및 작업 능률과 직결되므로 부유체 설계 단계에서 필수적으로 수행되어야 하는 공학기술임에 틀림없다. 자유 수면의 움직임과 유체의 흐름을 정확히 해석하기 위해 3차원 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 방법 및 비점성, 비회전성이 가정된 Potential 유동을 해석하는 방법을 모두 제공하고 있는 Tdyn 패키지 소프트웨어의 기능을 살펴 보았으며 그 활용 예제들을 통해 조선해양 분야 및 토목 분야에서의 Tdyn package 해석 프로그램의 높은 활용성을

확인할 수 있었다. 본문에 소개되진 않았으나 SeaFEM 프로그램에서 제공하는 계류선(mooring line) 기능은 파랑 환경에서 해상 부유체를 고정할 수 있는 필수적인 설비이며 특히 계류선에 적용되는 유한요소모델 기능은 계류선의 동적 거동까지 해석할 수 있어 그 활용도 및 정확도를 배가시키는 기능이라고 할 수 있다.

참고문헌

1. Kleefsmann, K. M. T., Fekken, G., Veldman, A. E. P., Iwanowski, B., Buchner, B. (2005) A Volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems, *J. Comp. Phys.* 206:363-393, 2005.
2. Watai R.A., Dinoi P., Ruggeri F., Souto-Iglesias A., Simos A.N. (2015) Rankine time-domain method with application to side-by-side gap flow modeling, *Applied Ocean Research* 50, 69-90.
3. http://www.khoa.go.kr/koofs/kor/observation/obs_real.do 