

HILS 적용을 위한 해양환경 시뮬레이션 개발

임채옥(부산대학교), 배정훈(부산대학교), 정현기(부산대학교), 신성철(부산대학교), 이상범(한국국제대학교)

Development of marine environment simulation for application of HILS

Chae-og Lim (Pusan National University), Jeong-hoon Bae (Pusan National University), Hyeon-Ki Jeong (Pusan National University), Sung-chul Shin (Pusan National University), Sang-beom Lee (International University of Korea)

요 약

크기에 있어 대형이고 고가의 특성을 갖는 조선 및 해양플랜트와 관련된 시스템의 경우 설계 후 검증, 시험평가를 수행하는데, 이 단계에서 시스템의 결함이나 오류가 발견되면 추가비용 발생 및 납기 지연으로 인한 손실이 막대하게 된다. 이러한 손실을 막기 위해 제품의 실 생산에 앞서 제품의 성능검증 및 시험평가를 할 수 있도록 하는 HILS (Hardware In the Loop Simulation)라는 시뮬레이션 기반의 기술이 각광받고 있다. 본 연구에서는 HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation)의 적용을 위한 해양환경 시뮬레이션 개발에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 해양환경 시뮬레이션 구현을 위한 해양환경 요소들을 분석하였으며, 그 중 선박 및 해양플랜트 시스템의 운동에 가장 영향을 크게 미치는 '파랑'에 의한 운동특성을 분석하기 위해 ANSYS AQWA를 사용하였다. 도출된 파랑에 의한 시스템의 운동특성 데이터를 바탕으로 실제 파랑을 포함한 해양환경에서 대상 시스템의 거동을 표현할 수 있는 시뮬레이션을 개발하여 HILS 적용의 기반을 마련하였다. 본 연구를 통하여 제시되는 해양환경 시뮬레이션은 HILS 개발 시, 해양환경 요소들 중 가장 영향이 큰 '파랑' 요소의 고려를 가능하게 하였다.

Keywords : HILS(하드웨어 인 더 루프 시뮬레이션), Marine Environment(해양환경), Simulation(시뮬레이션)

1. 서 론

최근, 자원고갈에 따른 고유가 현상에 의해 지상이나 연안, 해안에서 안정적으로 이루어지던 석유시추 및 정제와 관련된 작업들이 고압의 환경인 심해저 또는 극저온 지역인 북극해에서도 이루어지면서, 효율적이고 안정적인 작업수행을 위한 다양한 시스템이 추가적으로 필요하게 되었다. 이에 따라 작업의 효율적 관리, 위험 저감, 안정적 수행 등을 위해 시스템의 통합운영 개념이 도입되고 있으며, 시스템은 더욱 복잡해지고 있다. 극한 해양환경을 위한 해양플랜트에는 안정적이고 지속적인 작업 수행을 위해 고가의 장비와 시스템들이 요구되는 경우가 많다. 이러한 시스템에는 PMS (Power Management System), DP (Dynamic Positioning), ESD (Emergency ShutDown), VMS (Vessel Management System), BOP (Blow-Out Preventer) 등이 있다 (Marine Cybernetics, 2014).

조선 및 해양플랜트의 건조 특성 상, 이들 시스템에 설치되는 기기 및 장치는 성능검증과 시험평가를 포함하여 계약 기한 내에

정확하게 납품되어야 한다. 그러므로 시스템 개발과정 중 마지막 단계인 검증, 시험평가 단계의 중요도는 매우 높다. 또한 기본적으로 매우 복잡한 시스템들의 집합체이므로, 개별 기기의 성능뿐만 아니라 전체 시스템 환경에서의 정상적인 작동 여부의 확인이 필수적이다. 이를 위해 주로 설계와 제작이 완료된 후 검증, 시험평가를 수행하게 되는데, 이 단계에서 시스템의 결함이나 오류가 발견되면 추가비용 발생 및 납기 지연으로 인한 손실이 막대하게 된다. 이러한 손실을 막기 위해 자동차나 항공 산업에서는 제품의 실 생산에 앞서 제품의 성능검증 및 시험평가를 할 수 있도록 하는 방법을 탐색해 오고 있으며, 설계, 초기 개발 단계부터 완성단계까지의 여러 문제점을 극복하기 위해 HILS (Hardware In the Loop Simulation)라는 시뮬레이션 기반의 기술이 모색되어 왔다(Ryu, J.H., et al., 2004).

HILS는 설계 초기단계나 제작 또는 운용 중 시스템의 설계 오류나 오작동 등을 미리 진단하고 검증 할 수 있도록 실제 작동환경을 가상으로 시뮬레이션 하여 검증 및 시험평가를 수행하는 방법이다(Lee, S.H., et al., 2006). HILS에는 HILS 대상 하드웨어(제어시스템)가 동작하는 전체 시스템 및 주변환경(이하 실제환

경)을 가상으로 모사한 시뮬레이터와 HILS 대상 하드웨어, 그리고 신호처리 및 전달을 위한 I/O 인터페이스 장비가 포함된다. HILS는 앞의 3가지 항목이 페루프를 이루어 구성되며, HILS 대상 실제 하드웨어를 검증 및 시험평가 할 수 있는 가상의 환경을 제공한다. HILS가 제공하는 가상환경은 수학적 모델링을 통해 구현되며, 가상환경이 HILS 대상 하드웨어가 동작하는 실제환경을 얼마나 잘 모사하였는가가 HILS의 질을 결정하는 요소 중 하나이다. 이런 HILS의 장점은 HILS 대상 하드웨어의 개발, 검증 및 시험평가기 실제환경이 아닌 가상환경에서 대상 하드웨어를 운용하기 때문에 비용의 절감 효과가 크고, 극한 시험환경과 같이 안전의 문제로 실제환경에서 수행하지 못하는 경우 가상환경에서 안전하게 수행할 수 있으며, 컴퓨터 기반의 시뮬레이션이기 때문에 신뢰성 있는 반복시험이 가능하다(Park, H.R., et al., 2013).

기존의 HILS 기술은 주로 항공, 자동차 분야를 중심으로 적용되어 왔으며, 최근 전력전자 분야로 빠르게 확산되고 있다. 국외에서 HILS를 적용한 예로는 The National University of Singapore(2008)에서 직접 제작한 UAV 헬리콥터의 테스트를 위해 HILS/SILS 프레임워크를 구현하였고, US Army(2011)에서는 서로 지리적으로 떨어져 있는 차량의 엔진과 운전 시뮬레이터를 연동하는 HILS/SILS시스템을 구축한 예가 있다.. 국내로는 항공 우주연구원(KARI, 2008)에서 개발된 Tilt rotor UAV의 FCC(Flight Control Computer)에 포함된 오류 진단 기능을 평가하고 테스트 하기위하여 HILS/SILS 시스템을 구성한 예가 있으며, 동차부품연구원(2011)에서 전기 자동차와 같은 친환경 자동차의 배터리를 테스트 하기위한 HILS/SILS 시스템을 구축한 예가 있다.

본 연구에서는 선박 및 해양플랜트의 제어시스템 검증 및 시험평가 HILS 적용을 위한 해양환경 시뮬레이션 개발에 관한 연구를 진행하였다. 먼저 파 스펙트럼을 이용하여 불규칙 파랑을 모사할 수 있도록 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링 하였고, 선박운동 계산 시뮬레이터를 구성하여 불규칙 파랑에 대한 선박운동 계산을 수행하였다.

2. 해양환경 모델링

해양환경 모델링을 위해 해양환경 변수 파랑 (Wave), 해류 (Current), 바람 (Wind) 중 선박의 자세에 가장 영향을 많이 주는 해양환경 변수인 파랑의 영향에 대해 모델링을 진행하였다. 규칙 파랑에 대해서 식 (1)과 같이 정의하며, Fig. 1은 식 (1)에 대한 파랑의 정의이다.

$$\zeta(x,y,t) =$$

$$\zeta \sin [\omega t + \epsilon - kx \cos(\chi) - ky \sin(\chi)]$$

where

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ (rad/s): Wave frequency}$$

$$k = \frac{\omega^2}{g} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (rad/m): Wave number} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \text{ (m): Wave length}$$

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{\lambda}{T} \text{ (m/sec): Phase velocity}$$

$$h > \frac{\lambda}{2} \text{ (h: water depth(m))}$$

$$\epsilon \text{ (rad/s): Phase of wave}$$

$$\chi \text{ (rad): Direction of wave}$$

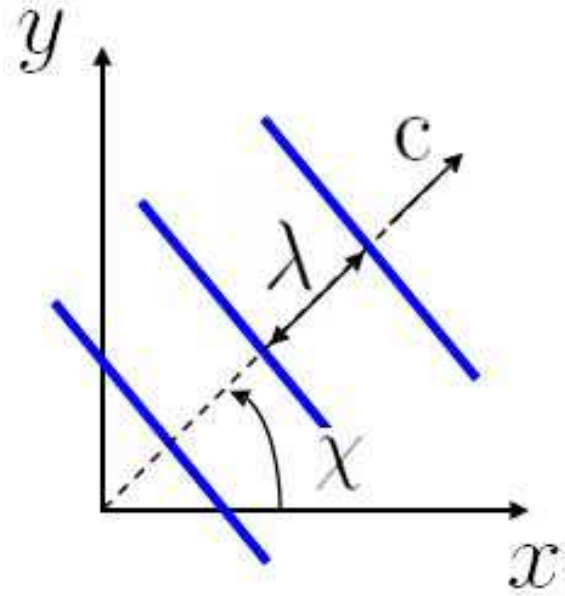


Fig. 1 Wave definition

아래의 식 (2)는 불규칙 파랑에 대해서 정의하며, n개의 규칙 파랑의 푸리에 급수 해석으로 나타내며, 규칙 파랑은 서로 다른 진폭, 주파수, 위상, 파수, 진행방향을 가지고 있다. 이들이 서로 중첩되어 실제 해양환경과 같은 불규칙 파랑을 나타낸다.

$$\zeta(x,y,t) = \sum_{i=1}^n \zeta(i) \sin(\omega(i)t + \epsilon(i) - k(i)(x \cos(\chi(i)) + y \sin(\chi(i)))) \quad (2)$$

(n: The number of the harmonic wave components)

Fig. 2와 같이 규칙 파랑성분들의 중첩으로 불규칙 파랑을 표현하며, Fig. 3은 Fig. 2의 불규칙 파랑에 의해 생성된 해양상태를 나타내고 있다.

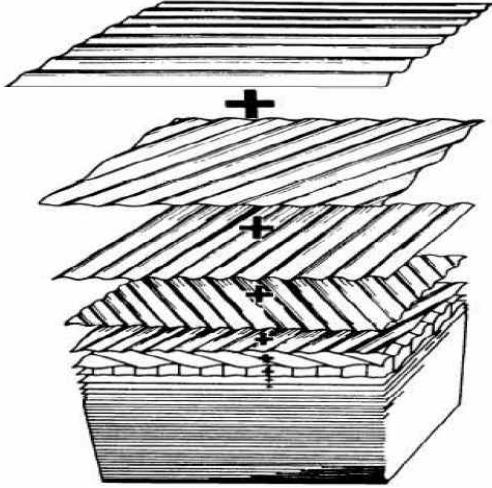


Fig. 2 Superposition of regular wave for irregular wave

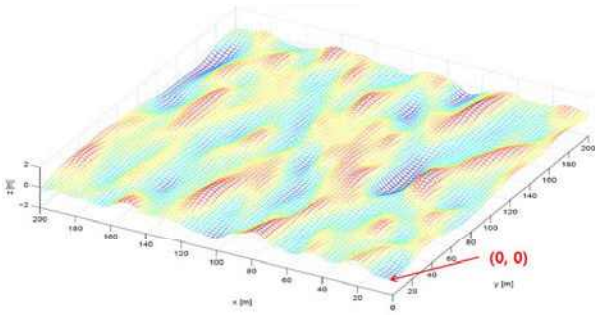


Fig. 3 Irregular wave sea state

Fig. 4은 Fig. 3의 불규칙 파랑으로 모사된 해양환경의 한 점 (0, 0)에서 시간변화에 대한 파면의 변위를 나타낸다. 불규칙한 파면 변위는 규칙 파랑의 시간영역에 대한 푸리에 급수 해석으로 표현되며, 각 규칙 파랑성분들의 위상은 무작위한 성격을 가지고 있다.

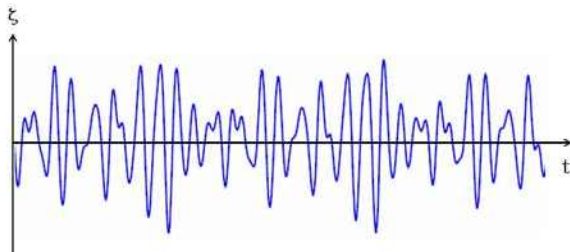


Fig. 4 Elevation of the sea surface

전 세계 해양환경은 기상의 변화에 따라서 지역적으로 시간적으로 변화하며, 그에 따라서 파 스펙트럼도 지속적으로 변화한

다. 또한, 파에 포함되어 있는 에너지의 총량이 같더라도, 즉 유의파의 크기가 같더라도 주파수에 따른 에너지의 분포가 매우 달라서 파 주기 면에서 매우 다른 해양환경이 발생할 수도 있다.

이러한 다양성에도 불구하고 연구자들은 적절한 가정 하에 해양파에 대한 표준 파 스펙트럼들을 제안하여 사용하고 있으며, 본 연구에서도 불규칙 파랑 생성을 위해 표준 파 스펙트럼을 이용하였다(Yeom, D.J., 2012).

식 (3)과 식 (4)는 각각 ITTC(A.R.M.J. Lloyd, 1998), JONSWAP(Sensen, A.J., 2005) 스펙트럼을 나타낸다. 식의 ω_p 는 파 스펙트럼 최대값에 해당하는 주파수를 나타내며, T_p 그 주파수의 주기이다. 파랑 생성시 사용자가 선택한 파 스펙트럼을 이용하여 불규칙 파랑 생성에 필요한 규칙 Wave Parameter들을 도출한다. 이 Parameter들에는 진폭, 주파수, 위상, 파수, 방향이 있다.

$$S(\omega) = \frac{173 \cdot H_{1/3}^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left\{\frac{-692}{T_1^4} \omega^{-4}\right\}$$

where

$$T_1 = 1.086 \cdot T_2 = 0.772 \cdot T_p \quad (3)$$

$$0.921 \cdot T_1 = T_2 = 0.711 \cdot T_p$$

$$1.296 \cdot T_1 = 1.407 \cdot T_2 = T_p$$

$$T_1 : \text{Average wave period}$$

$$T_2 : \text{Zero-crossing wave period}$$

$$T_p : \text{Peak frequency period}$$

$$H_{1/3} : \text{Significant wave height}$$

$$S(\omega) = \frac{320 \cdot H_{1/3}^2}{T_p^4} \omega^{-5} \exp\left\{\frac{-1950}{T_p^4} \omega^{-4}\right\} \gamma^A$$

where

$$\gamma = 3.3 (\text{Peakedness factor}) \quad (4)$$

$$A = \exp\left\{-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sigma \sqrt{2}}\right)^2\right\}$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} (\text{Peak frequency})$$

$$\sigma = \begin{cases} \text{if } \omega < \omega_p \text{ then } \sigma = 0.07 \\ \text{if } \omega > \omega_p \text{ then } \sigma = 0.09 \end{cases}$$

ω_p 는 식 (5)를 사용하여 계산되며, ω_p 에 의해서 파 스펙트럼의 모양이 결정되므로 불규칙 파랑의 데이터에 직접적인 영향을 주는 주요 요소이다.

$$\omega_p = \frac{2\pi}{4.883 + 2.68H_{1/3}^{0.54}} \text{ (rad/s)} \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 불규칙 파랑 모델은 ITTC, JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 계산된다. 그리고 규칙 파랑에 대한 계산도 가능하다. Fig. 5는 Fig. 3과 같이 불규칙 파랑 생성을 위한 모델이며, Matlab/simulink를 이용하여 모델링 하였다. Wave Block의 출력은 크게 2가지로 나뉜다. 첫 번째는 불규칙 파랑의 파면 변위 생성을 위한 규칙 파랑의 주파수, 방향, 진폭, 파수, 위상이다. 이는 Wave Block의 입력과 파 스펙트럼을 이용하여 계산된다. 두 번째는 불규칙 파랑의 진행 방향이다. 이는 첫 번째 출력에서 사용했던 파 스펙트럼에 방향 분포 함수를 곱한 값을 이용하여 계산된다.

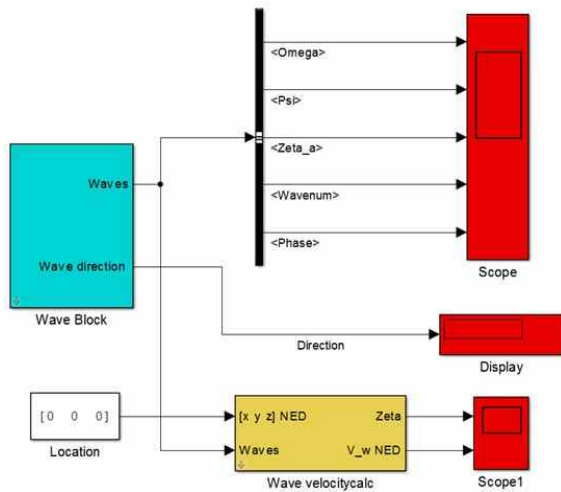


Fig. 5 Wave Block model

해양환경에서 실제 선박 및 해양플랜트의 운동을 계산하기 위해 Fig. 6와 같이 Ship Motion Simulator를 MSS (NTNU open tool)을 활용하여 구성하였고(NTNU MARINE SYSTEM SIMULATOR, 2015), Wave Block의 출력과 운동 계산 대상 선박의 Ship Data (Added mass, Damping, Motion RAOs, Force RAOs, Drift data, Body matrix and output)가 Simulator의 입력 값으로 사용 된다. 운동 계산 대상 선박의 Ship Data는 AQWA를 이용하여 계산 하였으며, 계산된 Ship Data는 Ship Motion Simulator에 사용가능한 변수 형태로 변형시키기 위해 Matlab M-file 코딩을 수행하였다.

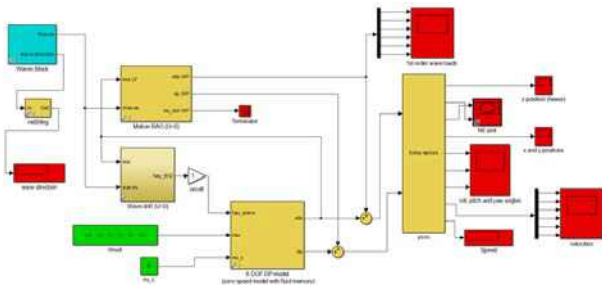


Fig. 6 Ship Motion Simulator

Ship Motion Simulator의 입력 값은 Wave Block의 주파수 영역 결과 값이며, 출력 값은 Wave Block으로 모사된 해양환경에서 운동하는 대상 선박의 6-DOF 운동계산 결과 값이다.

Table 1은 운동 계산 대상 선박에 대한 주요 정보를 나타내고 있으며, Fig. 7은 선박 선형 모양과 격자 정보를 나타내고 있다.

Table 1 Target ship information

Dimensions	Ship
Lpp	197.241m
Breadth	36.25m
Draft	8m
Depth	16.25m
Displacement	43962.920m ³
LGC	109.022m
KG	8.5m
Kxx	13.6m
Kyy	50m
Kzz	52m

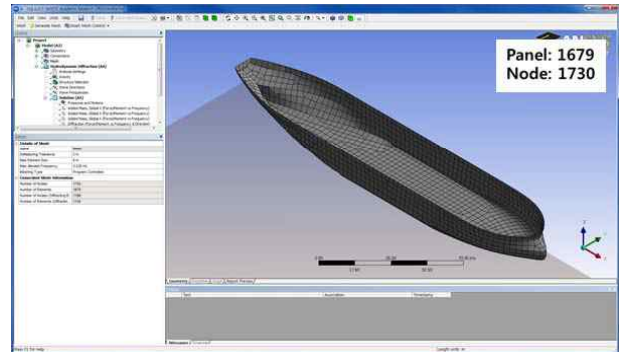


Fig. 7 Mesh information of ship

3. 해양환경 시뮬레이션 결과

Ship Motion Simulator를 이용해 대상 선박의 해양환경 시뮬레이션을 수행하였고, 시뮬레이션에 사용된 Wave Block의 입력 값은 ITTC, $H_{1/3} = 5\text{m}$, $\omega_p = 0.56 \text{ rad/s}$, mean direction : 30° , water depth = infinite, Number of frequency = 20, Number of direction = 10 이다. JONSWAP, Peakedness factor = 3.3 이며, 나머지 조건은 이전의 ITTC와 동일하게 하여 시뮬레이션을 수행 하였고, 시뮬레이션 시간은 200초이며 step size는 0.05초로 하였다.

ITTC의 시뮬레이션의 결과는 Fig. 8, 10, 13, 15 이며, JONSWAP의 결과는 Fig. 9, 11, 14, 16이다. ITTC, JONSWAP 스펙트럼에 의한 각 결과들이 서로 비슷한 경향을 보였으며, 불규칙 파랑의 변위가 큰 부분에서는 선박의 운동의 결과 값도 큰

진폭을 가지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 해상상태의 결과이며, Fig. 9는 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 해상상태의 결과이다.

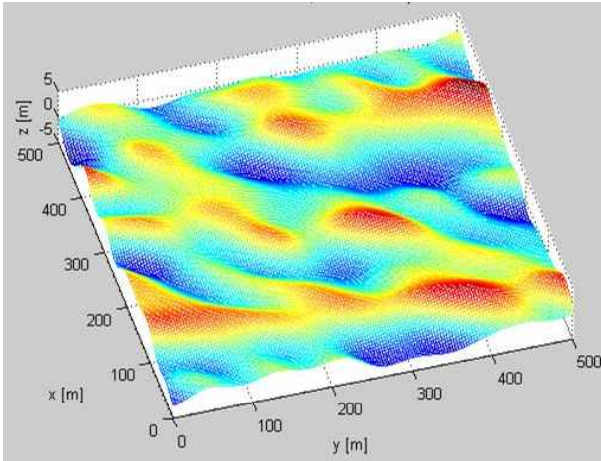


Fig. 8 Irregular wave sea state (ITTC)

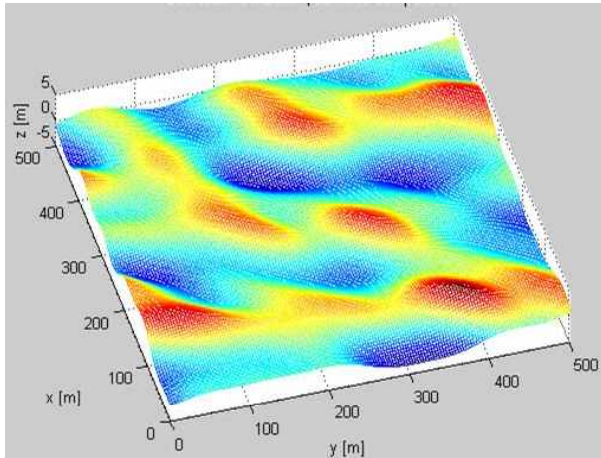


Fig. 9 Irregular wave sea state (JONSWAP)

Fig. 10은 ITTC로 계산된 불규칙 파랑의 변위이며, Fig. 11은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑의 변위이다.

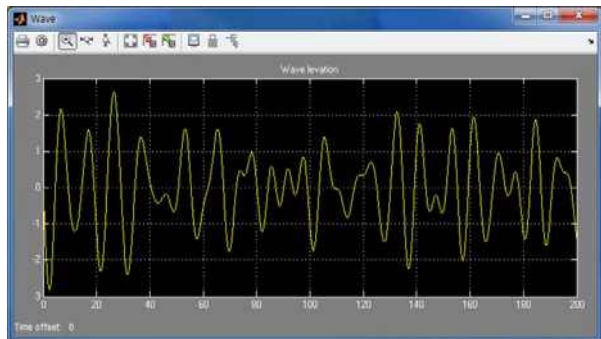


Fig. 10 Elevation of irregular wave (ITTC)

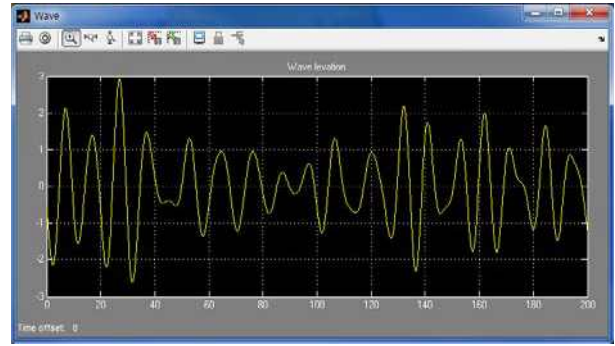


Fig. 11 Elevation of irregular wave (JONSWAP)

Fig. 12는 해상상태에서 선박의 6-DOF 운동을 설명한 그림이다.

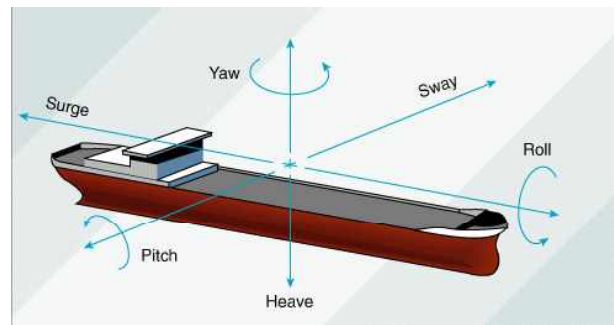


Fig. 12 Ship 6-DOF Motion(Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)

Fig. 13은 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Surge, Sway, Heave결과이며, Fig. 14는 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Surge, Sway, Heave결과이다.

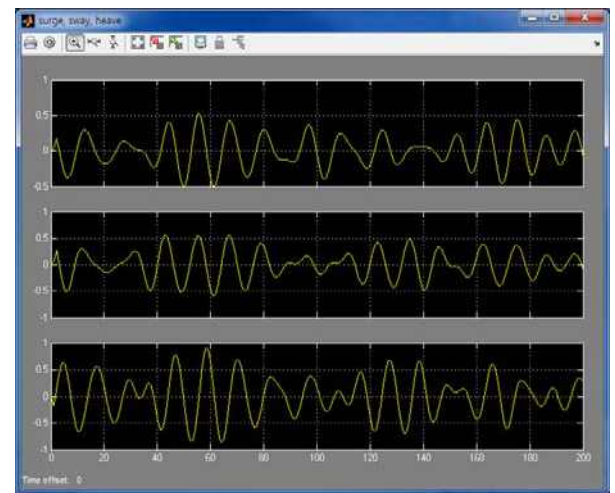


Fig. 13 Surge, Sway, Heave (ITTC)

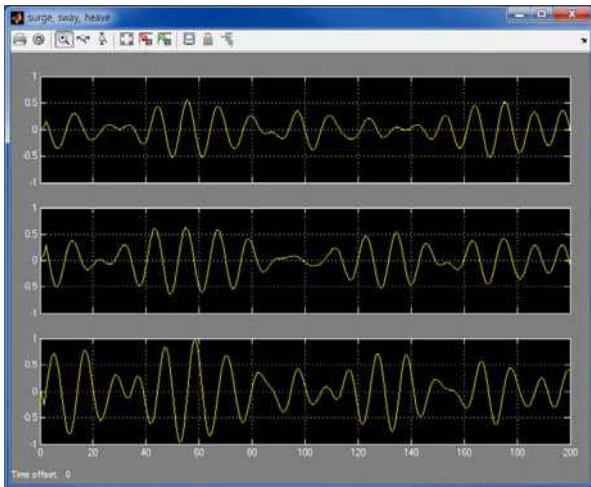


Fig. 14 Surge, Sway, Heave (JONSWAP)

Fig. 15는 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Roll, Pitch, Yaw이며, Fig. 16은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Roll, Pitch, Yaw결과이다.

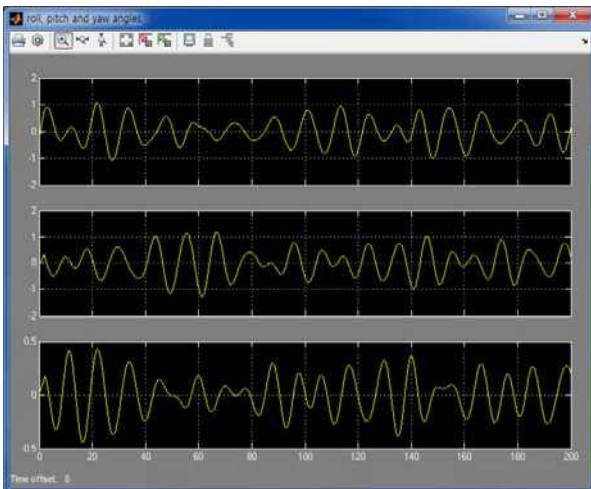


Fig. 15 Roll, Pitch, Yaw (ITTC)

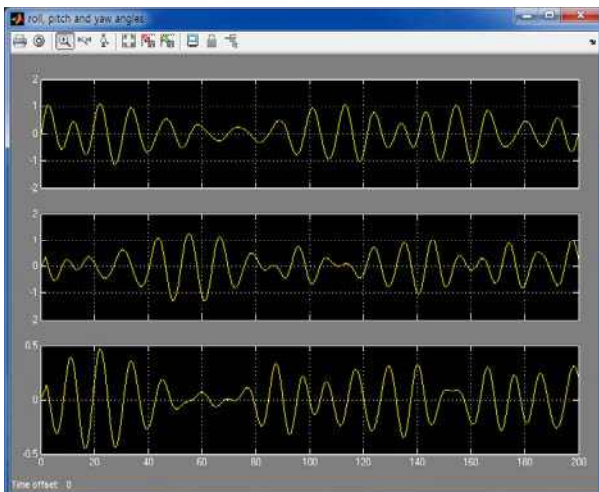


Fig. 16 Roll, Pitch, Yaw (JONSWAP)

4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 운동 계산을 위해 파 스펙트럼을 이용하여 불규칙 파랑의 모사를 통해 실제에 가까운 해양상태 모사가 가능함을 알 수 있었다.
- 개발된 해양환경 시뮬레이터를 통해 실제 해양환경에서 대상 선박의 6-DOF 운동 특성을 확인하였다.

본 연구를 통해 선박 통합 제어시스템용 HILS에 해양환경 시뮬레이션을 적용하여 실제 해양환경에 의한 제어시스템의 응답 특성 검증 및 시험평가에 활용 될 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 '해류', '바람' 등의 요소들을 추가적으로 고려하여 한다면, 보다 정도 높은 HILS 개발이 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 2014년도 정보통신산업진흥원의 재원으로 SW융합 기술고도화사업의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- A.R.M.J LLOYD, 1998. Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather, Chester:A.R.M.J LLOYD Gosport UK., ISBN 0-9532634-01.
- Lee, S.H., Kim, S.S., Jeong, W.H., 2006. HILS Environment Application of Real time Multibody Vehicle Dynamics model. Korea Society of Automotive Engineers, 782-787
- Marine Cybernetics, 2014. <http://www.marinecontrol.org/>, Solutions & Services.
- NTNU MARINE SYSTEMS SIMULATOR, 2014. <http://www.marinecybernetics.com/solutions-services>.
- Park, H.R., Jeon I.S., Song, C.J., 2013. A Design Method of the Simulation Program for HILS. Korea Institute of Military Science and Technology. 16(4), pp.435-440.
- 2) Ryu, J.H., Yoon, M.R., Sunwoo, M.H., 2004. Validation of a traction control algorithm and performance evaluation using HILS. Korea Society of Automotive Engineers, Republic of Korea, 641-646
- Sensen, A.J., 2005. Marine Cybernetics: Modelling and Control Lecture Notes for TMR4241 Marine Control Systems, NTNU.