

1. 서론

크기에 있어 대형이고 고가의 특성을 갖는 조선 및 해양플랜트와 관련된 시스템의 경우 설계 후 검증, 시험평가를 수행하는데 이 단계에서 시스템의 결함이나 오류가 발견되면 추가 비용 발생 및 납기 지연으로 인한 손실이 막대하다. 이러한 손실을 막기 위해 제품의 실 생산에 앞서 개별 기기의 성능뿐만 아니라 전체 시스템 환경에서의 정상적인 작동 여부의 확인 및 검증을 가능케 하는 HILS (Hardware In the Loop Simulation)라는 시뮬레이션 기반의 기술이 각광받고 있다.

HILS란 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. HILS에는 HILS 대상 하드웨어(제어시스템)가 동작하는 전체 시스템 및 주변 환경(이하 실제 환경)을 가상으로 모사한 시뮬레이터와 HILS 대상 하드웨어, 그리고 신호처리 및 전달을 위한 I/O 인터페이스 장비가 포함된다. HILS는 앞의 세 가지 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 실제 환경을 얼마나 잘 모사하였는가가 HILS의 질을 결정하는 요소 중 하나이다. 이런 HILS의 장점은 HILS 대상 하드웨어의 개발, 검증 및 시험 평가 시 실제 환경이 아닌 가상환경에서 대상 하드웨어를 운용하기 때문에 비용의 절감 효과가 크고, 극한 시험환경과 같이 안전의 문제로 실제 환경에서 수행하지 못하는 경우 가상환경에서 안전하게 수행할 수 있으며, 컴퓨터 기반의 시뮬레이션이기 때문에 신뢰성 있는 반복시험이 가능하다.

PMS (Power Management System)의 경우 선박 및 해양 플랜트에서 사용되는 전력을 생산, 분배 제어하는 역할을 하는 시스템으로 해당 시스템을 실제 선박 및 해양플랜트의 가동을 통해 성능검증, 시험평가를 수행하기에는 시간과 비용, 시험환경에 대한 제한사항과 위험요소 등을 많이 가진다. 이를 해결하기 위해 적용대상의 주변환경(선박의 운동, 전력부하, 고장시나리오 등)을 모사할 수 있는 시뮬레이터를 구성한 후 실제 검증대상 PMS Hardware와 Real Time O/S를 이용

하여 HILS 환경을 구성함으로써 시험 및 검증을 수행 할 수 있다. PMS를 통해 관리되는 다양한 시스템 중, 해양환경에 영향을 받는 관련된 대표적인 시스템으로는 DPC (Dynamic Positioning Control)가 있으며, 해양환경 변화에 따른 선박의 위치 및 움직임을 감지하여 목표 위치를 유지하기위해 각종 추진 장치들을 동작시켜 추력을 발생시키는 역할을 한다. 이 때 PMS HILS 환경에서 해양환경요소인 파랑(Wave), 바람(Wind), 해류(Current)에 의한 선박의 거동을 모사할 수 있게 하는 것이 해양환경 시뮬레이션이며 DPC, PMS와 상호작용을 할 수 있도록 구성되어야 한다.

2. 해양환경 시뮬레이션

PMS HILS를 위한 해양환경 시뮬레이션 모델링을 위해 먼저 파스펙트럼을 이용해 불규칙 파랑을 모사하고, 바람스펙트럼, 평균값, 변동요소 등을 고려하여 바람, 해류를 모사할 수 있도록 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링을 수행하였다. 또한 이를 이용하여 선박운동 계산 시뮬레이터를 구성함으로써 파랑, 해류, 바람의 영향에 의한 선박운동을 계산하였다.

2.1 파랑에 의한 영향

규칙 파랑에 대해서 식 (1)과 같이 정의하며, Fig. 1은 식 (1)에 대한 파랑의 정의이다.

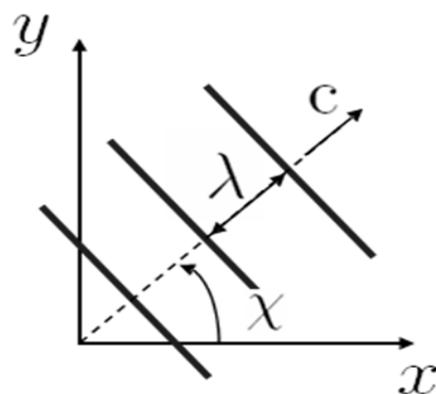


Fig. 1 Wave definition

$$\zeta(x, y, t) = \zeta \sin[\omega t + \epsilon - kx \cos(\chi) - ky \sin(\chi)] \quad (1)$$

where

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

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

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

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

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

ϵ (rad/s) : Phase of wave

χ (rad) : Direction of wave

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 해양 상태를 나타내고 있다.

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

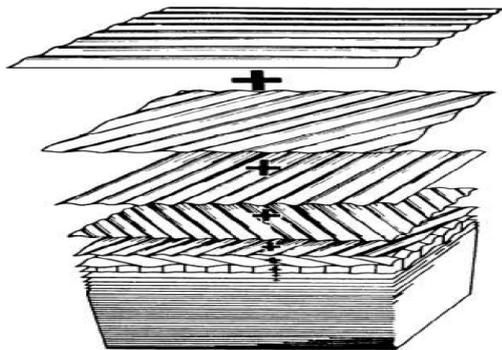


Fig. 2 Superposition of regular wave for irregular wave

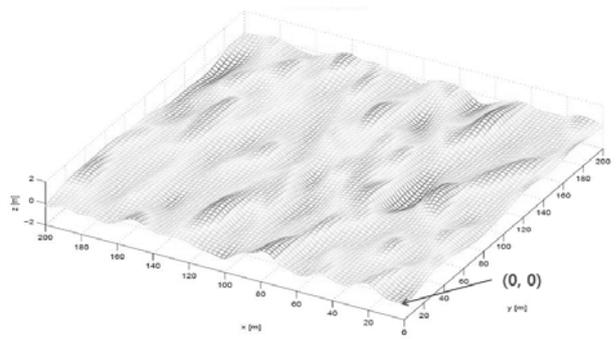


Fig. 3 Irregular wave sea state

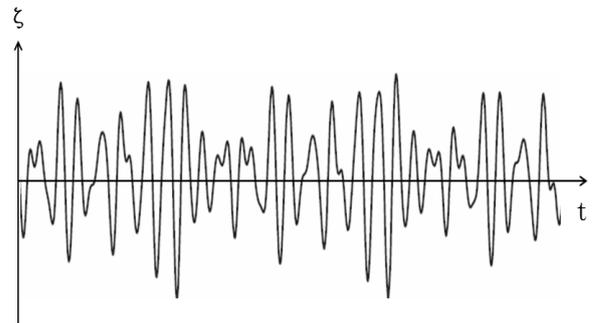


Fig. 4 Elevation of the sea surface

전 세계 해양환경은 기상의 변화에 따라서 지역적으로 시간적으로 변화하며, 그에 따라서 파스펙트럼도 지속적으로 변화한다. 또한, 파에 포함되어 있는 에너지의 총량이 같더라도, 즉 유의파의 크기가 같더라도 주파수에 따른 에너지의 분포가 다르므로 파 주기 면에서 상이한 해양환경이 발생할 수도 있다. 이러한 다양성에도 불구하고 연구자들은 적절한 가정 하에 해양파에 대한 표준 파스펙트럼을 제안하여 사용하고 있으며, 파스펙트럼을 이용해 불규칙한 파랑을 모델링 한다.

식 (3)과 식 (4)는 각각 파스펙트럼인 ITTC, JONSWAP 스펙트럼을 나타낸다. 식의 ω_p 는 파스펙트럼 최대값에 해당하는 주파수를 나타내며, T_p 는 그 주파수의 주기이다. 파랑 생성 시 사용자가 선택한 파스펙트럼을 이용하여 불규칙 파랑 생성에 필요한 규칙 Wave Parameter들을 도출한다. 이 Parameter들에는 진폭, 주파수, 위상, 파수, 방향이 있다.

ω_p 는 식 (5)를 사용하여 계산되며, ω_p 에 의해서 파스펙트럼의 모양이 결정되므로 불규칙 파랑의 데이터에 직접적인 영향을 주는 주요 요소이다. 파스펙트럼으로부터 몇 개의 규칙 파들을 추출하여 불규칙파로 중첩 시킬 것인가에 대한 것도 불규칙 파랑 생성을 위한 파라미터 입력단계에서 결정을 해야 한다. 파스펙트럼은 주파수에 대한 파에너지의 향으로 나타나

므로 어떤 주파수를 가지는 규칙파라들을 사용하는 가에 따라 불규칙 파랑의 모사가 달라지기 때문이다. 일반적으로 불규칙 파랑 생성을 위해선 20개 이상의 규칙파의 중첩이 필요하다.

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

where

$$T_1 = 1.086 \cdot T_2 = 0.772 \cdot T_p$$

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

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

T_1 : Average wave period

T_2 : Zero-crossing wave period

T_p : Peak frequency period

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

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

where

$\gamma = 3.3$ (Peakedness factor)

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

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

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

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

ITTC와 JONSWAP을 바탕으로 Fig. 5와 같이 Simulink에서 파를 생성하기 위한 wave block 모델을 생성하였다.

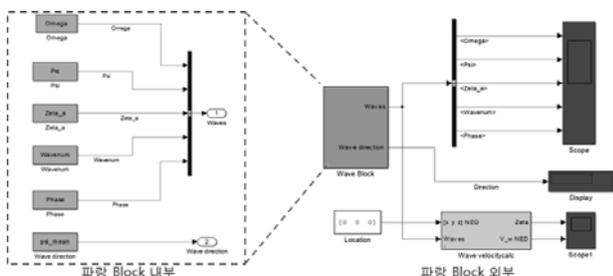


Fig. 5 Wave block model

2.2 바람에 의한 영향

바람의 경우 일반적으로 평균값(Mean value), 변동요소

(Fluctuating component), 돌풍(Gust) 등 세 가지의 요소로 구성된다. 바람에 의한 영향은 2차원(x, y성분) 수평면 성분으로 고려할 수 있다. 바람의 진행방향은 Fig. 1의 파랑의 경우와 다르며 일반적으로 바람이 불어오는 방향을 그 바람의 방향이라고 정의한다. 예를 들어 바람의 방향이 남동쪽이면 바람은 남동쪽에서 불어 들어와 북서쪽으로 나가게 된다. 하지만 파랑, 바람, 해류를 모델링하여 이를 적용시키기 위해선 각 해양환경 모델에 대한 진행 방향과 속도에 대한 정의를 동일하게 하는 것이 보다 편리하다. 바람은 평균방향과 평균속도를 기본으로 하여 방향과 속도가 천천히 변하는 특징을 가지며 변화하는 방향과 속도는 제한된 범위를 가진다. 식 (6)은 Fujiwara가 제안한 바람에 의한 풍하중 식으로, 대상 선박에 입사하는 바람의 방향에 따라서 풍하중계수 C_x , C_y 의 값이 달라진다. 입사 방향의 범위는 0~90, 90~180, 90로 크게 세 부분으로 나뉘며, 각 범위에서 계산에 사용되는 계수 값들이 다르다.

$$X_A = \frac{1}{2} \rho_A C_X(\psi_A) U_A^2 A_T \quad (6)$$

$$Y_A = \frac{1}{2} \rho_A C_Y(\psi_A) U_A^2 A_L$$

ρ_A : Air density

C_X, C_Y : Wind coefficient

ψ_A : Wind direction

U_A : Wind velocity

A_T : Frontal projected area

A_L : Lateral projected area

$$C_X = X_0 + X_1 \cos \psi_A + X_3 \cos 3 \psi_A + X_5 \cos 5 \psi_A$$

$$C_Y = Y_1 \sin \psi_A + Y_3 \sin 3 \psi_A + Y_5 \sin 5 \psi_A$$

Fig. 6은 바람 생성에 대한 Simulink 모델이며, Fig. 6의 우측은 모델의 내부 구성을 나타낸다.

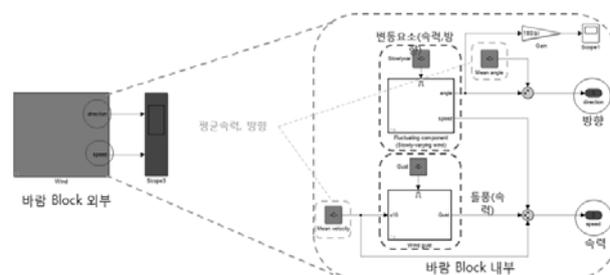


Fig. 6 Wind block model

변동요소는 1st order Gauss-Markov process를 이용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\bar{U}} + \mu \bar{U} = w \quad (7)$$

$$0 \leq \bar{U}_{\min} \leq \bar{U} \leq \bar{U}_{\max}$$

$$\dot{\bar{\psi}} + \mu_2 \bar{\psi} = w_2$$

$$\bar{\psi}_{\min} \leq \bar{\psi} \leq \bar{\psi}_{\max}$$

w : Gaussian white noise
 $\mu \geq 0$ (constant)

돌풍 요소는 식 (8)인 바람 스펙트럼(Harris)을 이용해 나타낼 수 있다.

$$\frac{fS(f)}{u^{*2}} = 583f^* \quad 0 \leq f^* \leq 0.003 \quad (8)$$

$$= \frac{420f_*^{0.70}}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}} \quad 0.003 \leq f^* \leq 0.1$$

$$= \frac{838f_*}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}} \quad f^* \geq 0.1$$

$$f_* = \frac{f_z}{U_z}$$

$$u(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2S_u(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \epsilon_i)$$

(fluctuating component at $z(m)$ high)

$$U_w(t) = U_0 + u(t) \text{ (Total wind speed)}$$

2.3 해류에 의한 영향

해류는 바람의 경우와 달리 평균값만 고려하여 나타내었으며, 해수표면에서의 성분만을 고려하여 2차원 평면에서의 위치를 변화시키는 것으로 모델링하였다. 해류 모델링을 위한 Current Parameters는 방향과 속력이 있으며 이 값들은 모두 변동 없이 일정한 값이다. 해류력에 대한 계산은 풍하중의 계산과 같으며 식 (9)는 해류력을 나타낸다.

$$X_c = \frac{1}{2} \rho_c C_X(\psi_c) U_c^2 A_T \quad (9)$$

$$Y_c = \frac{1}{2} \rho_c C_Y(\psi_c) U_c^2 A_L$$

ρ_c : Water density
 C_X, C_Y : Current coefficient
 U_c : Current velocity
 A_T : Frontal projected area _ water
 A_L : Lateral projected area _ water

Fig. 7은 해류를 생성하는 모델로, 우측은 해류의 내부 구

성을 나타내고 Current block의 출력은 해류의 x, y 성분을 나타내는 벡터와 진행방향, 속력으로 세 가지이다.

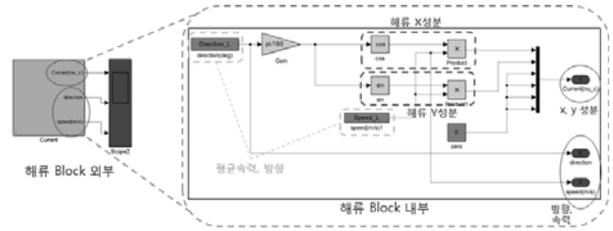


Fig. 7 Current block model

2.4 해양환경 시뮬레이션 모델링

불규칙 파랑은 ITTC, JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 모델링되며, 불규칙 파랑뿐만 아니라 규칙 파랑에 대한 계산도 가능하다. Wave Block의 출력은 크게 2가지로 나뉜다. 첫 번째는 불규칙 파랑의 파면 변위 생성을 위한 규칙 파랑의 주파수, 방향, 진폭, 파수, 위상이며 이는 Wave Block의 입력과 파스펙트럼을 이용하여 계산된다. 두 번째는 불규칙 파랑의 진행 방향으로 첫 번째 출력에서 사용 했던 파스펙트럼에 방향 분포 함수를 곱한 값을 이용하여 계산된다. 바람과 해류모델은 2차원 평면에서의 위치변화에 대한 영향을 고려하고, 각 모델에 대한 출력은 방향과 속도 두 부분으로 나누어 구성된다. 바람의 경우 해류와 달리 x, y성분으로 나뉘어 출력되지 않고 방향과 속도 성분이 같이 출력된다.

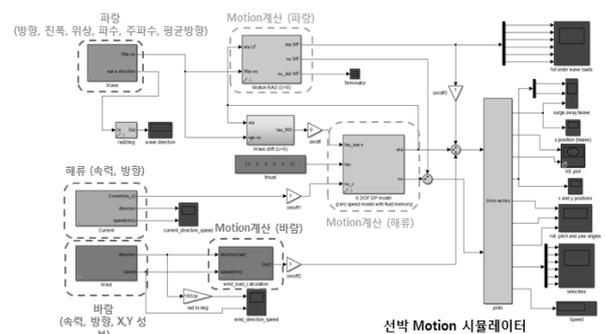


Fig. 8 Ship motion simulator

해양환경 시뮬레이션 모델링을 이용한 선박의 운동을 계산하기 위해 Fig. 8과 같이 선박운동 시뮬레이터를 구성하였고 Wave block, Current block, Wind block의 출력과 대상 선박의 Ship data (Added mass, Damping, Motion RAOs, Force RAOs, Drift data, Body matrix and output)가 시뮬레이터의 입력값으로 사용 된다. 선박의 Ship data는 AQWA를 이용하여

계산 하였으며, 계산된 Ship data는 선박운동 시뮬레이터에 입력값으로 사용되기 위해 Matlab M-file로 변환되는 과정을 거쳤다.

선박운동 시뮬레이터의 입력값은 Wave block의 주파수 영역 결과값, Current block, Wind block의 방향과 속력 값이며, 출력값은 대상 선박의 6-DOF 운동응답에 대한 값이다.

Table 1은 대상 선박에 대한 주요 제원이며, Fig. 9은 선박의 선형 및 격자에 대한 정보를 나타내고 있다.

Table 1 Target ship information	
Dimensions	Ship
Lpp	197,241m
Breadth	36,25m
Draft	8m
Depth	16,25m
Displacement	43,962,920m ³
LCG	109,022m
KG	8,5m
Kxx	13,6m
Kyy	50m
Kzz	52m

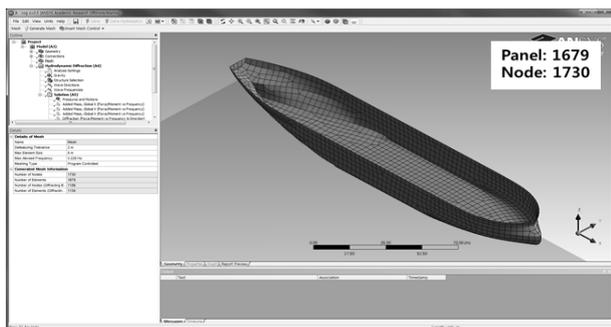


Fig. 9 Mesh information of ship

3. 해양환경 시뮬레이션 결과

선박운동 시뮬레이터를 이용하여 대상 선박의 해양환경 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 Wave block의 입력값은 ITTC 스펙트럼의 경우 $H_{1/3} = 5m$, $\omega_p = 0,56$ rad/s, mean direction : 30° , water depth = infinite, Number of frequency = 20, Number of direction = 10으로

하였으며, JONSWAP스펙트럼의 경우는 Peakedness factor = 3.3을 제외한 나머지 조건은 ITTC와 동일하게 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

ITTC의 시뮬레이션의 결과는 Fig. 10, 12, 15, 17 이며, JONSWAP의 결과는 Fig. 11, 13, 16, 18이다. ITTC 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼에 의한 각 결과들이 서로 비슷한 경향을 보였으며, 불규칙 파랑의 변위가 큰 부분에서는 선박의 운동도 큰 진폭을 가지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 해상상태이며, Fig. 11은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 해상상태이다.

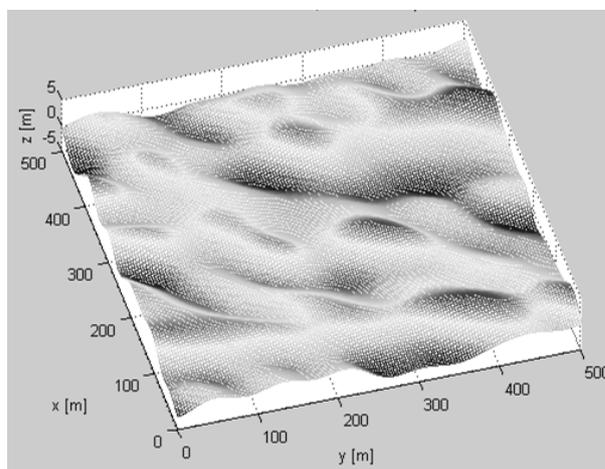


Fig. 10 Irregular wave sea state (ITTC)

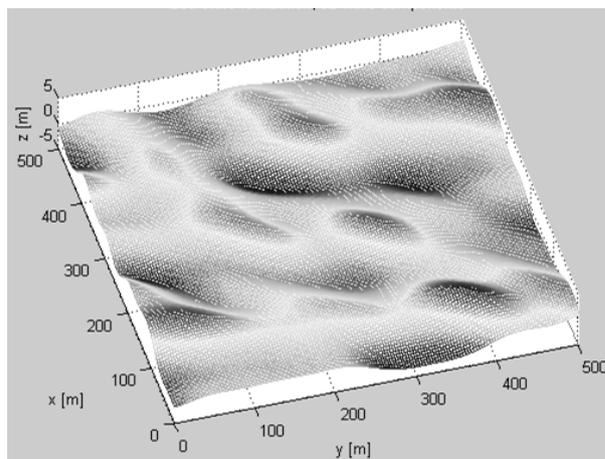


Fig. 11 Irregular wave sea state (JONSWAP)

Fig. 12는 ITTC로 계산된 불규칙 파랑의 변위이며, Fig. 13은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑의 변위이다.

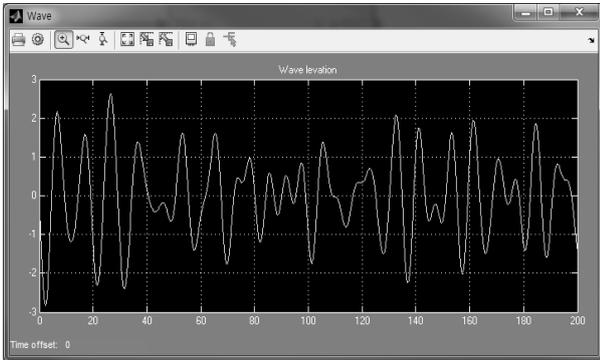


Fig. 12 Elevation of irregular wave (ITTC)

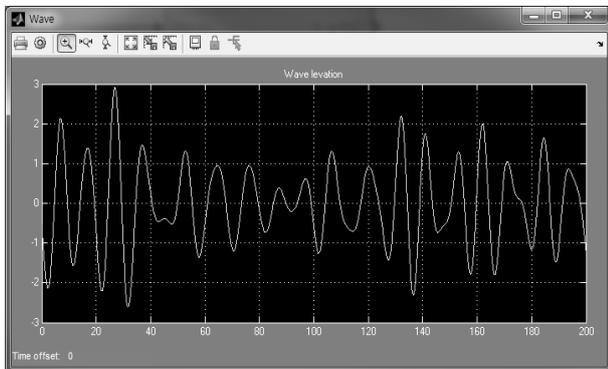


Fig. 13 Elevation of irregular wave (JONSWAP)

Fig. 14는 해상상태에서 선박의 6-DOF 운동을 설명한 그림이다.

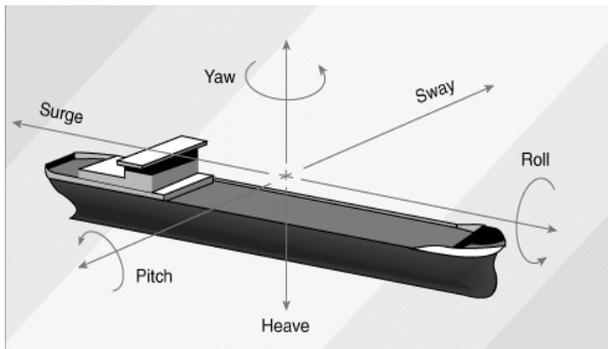


Fig. 14 Ship 6-DOF Motion (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)

Fig. 15는 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Surge, Sway, Heave결과이며, Fig. 16은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Surge, Sway, Heave결과이다.

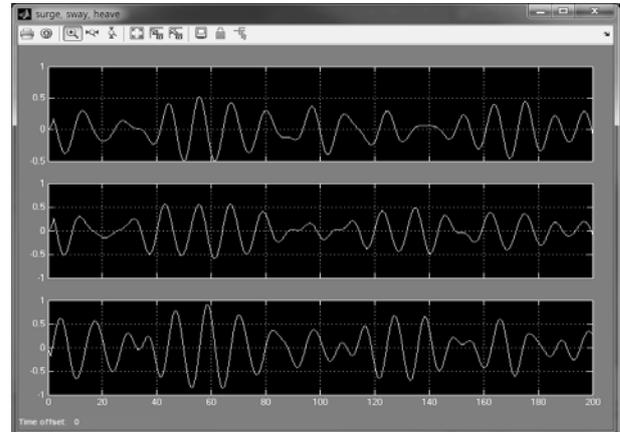


Fig. 15 Surge, Sway, Heave (ITTC)

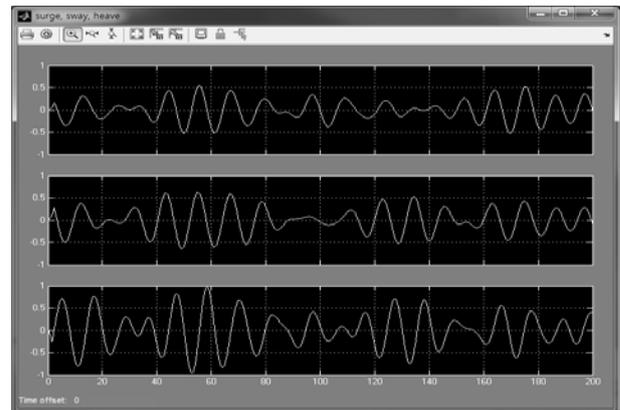


Fig. 16 Surge, Sway, Heave (JONSWAP)

Fig. 17은 ITTC로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Roll, Pitch, Yaw 이며, Fig. 18은 JONSWAP으로 계산된 불규칙 파랑에 의한 Roll, Pitch, Yaw결과이다.



Fig. 17 Roll, Pitch, Yaw (ITTC)



Fig. 18 Roll, Pitch, Yaw (JONSWAP)

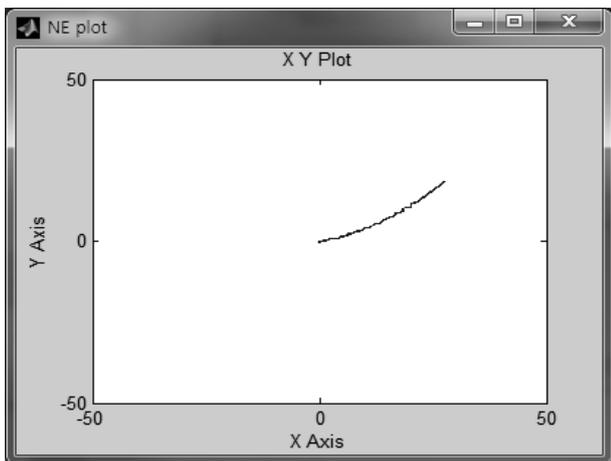


Fig. 19 Ship position with current effect

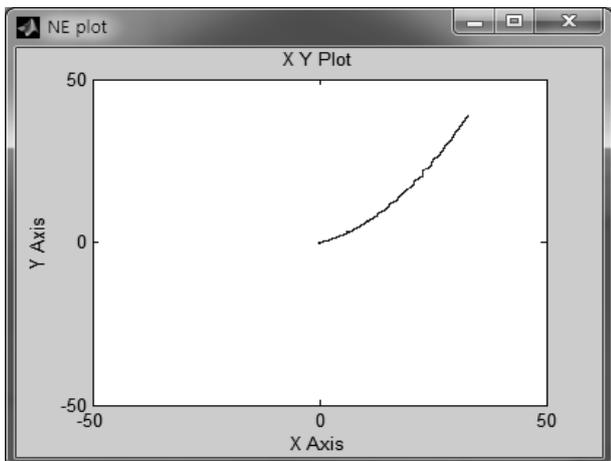


Fig. 20 Ship position with current and wind effect

Fig. 19는 해류 영향을 고려한 선박의 2차원 평면상의 위

치 변화를 나타내며 해류의 방향이 30°, 속력이 0.3m/s으로 입력되었을 경우의 선박의 이동을 보여준다.

Fig. 20은 해류와 바람의 영향을 고려한 선박의 2차원 평면상의 위치 변화를 나타내며 Fig. 19에 비해 선박이 조금 더 멀리 움직인 것을 확인할 수 있다. 이때 해류의 조건은 Fig. 19와 같으며 바람의 방향은 30°, 속력은 3m/s으로 설정하였으며, 돌풍의 영향은 고려하지 않았다.

4. 맺음말

해양환경 시뮬레이션 모델은 선박에 설치되는 PMS에 HILS를 적용하기 위한 하나의 모듈개념으로써 실제 해상에서의 파랑, 바람, 해류에 의한 선박의 운동응답을 시뮬레이션화한 모델이다. 해당 모델은 현재 PMS를 위한 HILS에 바로 적용되기는 어려우며 해양환경에 의한 선박의 위치 및 운동변화에 의해 DP 및 자세제어시스템을 작동시키는데 소모되는 전력부하를 예측하기 위한 입, 출력 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 추후 DP 및 자세제어를 모사한 모델과 해양환경 시뮬레이션 모델을 PMS 모델과 연동시킨다면 해양환경을 고려한 PMS의 HILS 수행이 가능할 것으로 판단된다.

본고에서 언급한 모델을 기반으로 파랑, 바람, 해류간의 상호작용 연계를 고려하여 해양환경 시뮬레이션을 모델링한다면 선박 및 해양플랜트와 관련된 시스템에 대한 HILS 환경 구축 시, 보다 실제에 가까운 해양환경의 모사가 가능할 것으로 사료된다. 앞으로 해양환경에서 대상시스템에 대한 실제적인 HILS를 수행하기 위해서는 해양환경 시뮬레이션의 개선뿐만 아니라 HILS 수행을 위한 제반 장비 확보 및 시설 구축, 관련된 다양한 시스템모델의 체계적인 개발과 HILS와 관련된 경험의 지속적인 축적이 필요하다고 판단된다.



신성철

- 1971년생
- 2003년 부산대학교 조선해양공학과 박사 졸업
- 현 재 : 부산대학교 조선해양공학과 교수
- 관심분야 : 조선해양 설계 최적화, HILS, 시스템 엔지니어링, 위험도/신뢰도 분석
- 연 락 처 : 051-510-2525
- E - mail : scshin@pusan.ac.kr