

해양 환경하중을 고려한 전기추진선박의 소비전력 예측 시뮬레이션

임채옥(부산대학교), 배정훈(부산대학교), 신성철(부산대학교)

Simulation of power consumption with considering marine environmental forces for electric propulsion ship

Chae-og Lim (Pusan National University), Jeong-hoon Bae (Pusan National University),
Sung-chul Shin (Pusan National University)

요약

Power system is main equipment for electric propulsion ship to generate and manage the power. Maximum capacity of power system should be decided as consumption of thruster with considering variation of power consumption for propulsion, because it changes continuously from type of the ship, principal dimensions and marine environment such as wave, current, wind. To design the power system efficiently, accurate prediction of power consumption is required. There aren't a lot of time and cost for test, an empirical formula or similar ship data is used for prediction of power consumption in the early stage of design.

In this paper, model for prediction of power consumption was created with 'ship motion model' and 'prediction of power consumption model'. Thruster is assumed main electrical load for propulsion and we predicted power consumption with marine environmental forces. The model presented from this study can make possible to predict the power consumption of ship with high accuracy for propulsion. And it also support the decision making for set maximum capacity of power system and set the specimen of propulsion motor.

Keywords : Electric propulsion ship(전기추진선박), Marine environmental force(해양환경하중), Modeling(모델링), Power consumption(소비전력)

1. 서론

과거 고유가 시대에 들어서면서 선박의 운항효율과 밀접하게 관련된 연료사용효율에 대한 선주사와 해운사들의 관심이 높아졌으며, 국내외에서 대기오염원인 질소산화물과 황산화물에 대한 위험성을 지각하면서 이에 대한 규제가 강화되고 있다. 또한 선박이 고속, 대형화 되어감에 따라 선속을 향상시키기 위한 프로펠러의 효율개선에만 관심을 가졌던 과거와 달리 선박에 의한 해양 환경의 오염문제에도 관심이 높아졌다. 그 결과로 선박에서 배출하는 대기오염 가스배출의 허용기준이 강화되고 있다. 이러한 종합적인 문제를 해결하기 위해 국내외에서 새로운 기술인 전기추진에 대한 필요성이 강조되어 전기추진선박에 대한 연구와 기술개발이 활발히 진행되고 있으며 상선, 여객선, 군함 등 여러 종류의 선박에 적용되고 있다(Koo, 2009)(Kim, 2007)(Kwak,

2014).

전기추진 방식은 기존의 기계식추진 방식에 비해 10%~15% 연료 절감 효과가 있다. 이러한 전기추진 시스템은 동력원인 주기관으로 부터 추진장치인 프로펠러에 이르는 동안 동력손실이 크다는 단점이 있으나 선박의 전체 운항효율 관점에서는 축전달 효율뿐만 아니라 선체저항, 추진기의 추진효율을 고려해야 하므로 전체 효율은 기계식추진 시스템보다 더 높아질 수 있다는 장점이 있다. 기계식추진 시스템은 선미 형상이 복잡하며 설계와 건조, 진동·소음특성, 구조적 배치에 있어 제한적인 사항이 있지만, 전기추진 시스템은 추진전동기와 발전기가 전력선으로 연결되기 때문에 발전기를 구조적 배치에 제한을 받지 않게 임의의 장소에 위치시킬 수 있어 효율적 구조적 배치가 가능하며, 선미의 기관실공간을 줄여 재화 중량을 증가시킬 수 있고 진동·소음의 저감, 유지보수의 용이성을 가진다(Kim, 2007). 또한 AziPod

의 이용으로 선체에 대한 회전반경이 기계식추진 방식보다 줄어들어 접안 또는 운전시의 요구되는 조종성이 증대되어 보다 안전하고 용이한 기동성을 나타내어 쇄빙선과 같은 특수선에서도 이용되고 있다(Koo, 2009).

전기추진 시스템은 연구개발 과정에서 시스템의 설계, 전력 공급과 제어를 위해서 시뮬레이션 모델이 필요하며, 선박의 다양한 동작 상태에서의 전압 및 전력조류가 허용범위 내인지를 검토하여 시스템의 정적 안정도를 판단하는 것과 시스템의 동적상황에 따라 발전기와 추진전동기의 전압 변동률을 검토하여 시스템의 동적 안정도를 판단하는 것은 매우 중요하다(Won, 2008). 이처럼 전기추진선박에 대한 연구들은 전기추진 시스템을 모델링하여 전력조류, 전동기동, 과도안정도해석 등과 같이 시스템의 정적, 동적특성에 관한 분석 및 해석을 수행하여 전압, 전류, 주파수 특성들이 룰의 기준을 만족하며 안전하게 설계되었는지에 관한 연구가 주를 이루고 있고 있다(Kalsi, 2005)(Kwak, 2014)(Kim, 2014)(Lee, 2009)(Zahedi, 2013).

전기추진 시스템을 설계할 때 시스템의 특성해석과 주요설비에 관한 연구결과들을 고려해야 할 뿐만 아니라, 설계초기 가장 많은 전력을 소비하는 추진전동기들을 고려하여 전력시스템의 최대 발전용량은 결정해한다(Prempraneerach, 2008). 추진전동기의 소비전력은 선박이 운항하는 해양 환경과 선박의 종류 및 제원 등에 따라 다르므로 이를 반영한 소비전력 예측이 중요하며 따라서 전기추진 시스템을 설계할 때 고려되어야 할 소비전력 예측에 관한 연구가 필요하다. 설계 시 결정된 소비전력은 설계전력(Design Power)이라고도 하며 선속과 추진전동기, 기타 부하들의 사양을 결정할 때 중요한 요소로 작용한다(Bortnowska, 2007).

본 연구에서는 해양 환경인 파랑, 조류, 바람에 의한 '선박운동 모델'과 추진 시 요구되는 '전기추진 소비전력 예측 모델'을 모델링하여 해양 환경에 따른 추진전동기의 소비전력 예측 시뮬레이터인 'Power prediction simulator' 모델링을 수행하였고, Usage factor를 시뮬레이터에 적용하여 해양 환경에 따라 추진 시 필요한 추진전동기의 소비전력을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 해양 환경 모델링

선박운동 모델을 위한 해양 환경 모델은 파랑(Wave), 바람(Wind), 조류(Current)로 분류하였다.

2.1 파랑 모델링

규칙 파랑에 대해서 식 (1)과 같이 정의하며, Fig. 1은 파랑, 바람, 조류를 포함한 모델에 대한 지구고정 좌표계(Global fixed coordinate)와 물체고정 좌표계(Body fixed coordinate)를 나타낸다. ψ_{wave} , ψ_{wind} , $\psi_{current}$, ψ 는 각각 파랑, 바람, 조류의 방향과 선박의 Heading angle을 의미하며, U_T 는 바람과 조류

의 속도, U 는 선속, u , v 는 각각 선박의 x, y방향의 선속을 나타낸다.

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

where

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

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

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

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

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

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

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

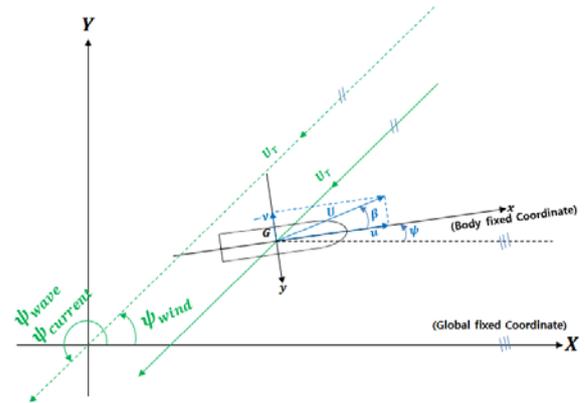


Fig. 1 Coordinates system for marine environmental simulation

식 (2)는 불규칙 파랑에 대한 정의이며, n개의 규칙 파랑의 푸리에 급수 해석으로 나타낸다. 규칙 파랑은 서로 다른 진폭, 주파수, 위상, 파수, 진행 방향을 가지고 있으며, 이들이 서로 중첩되어 실제 해양 환경과 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)

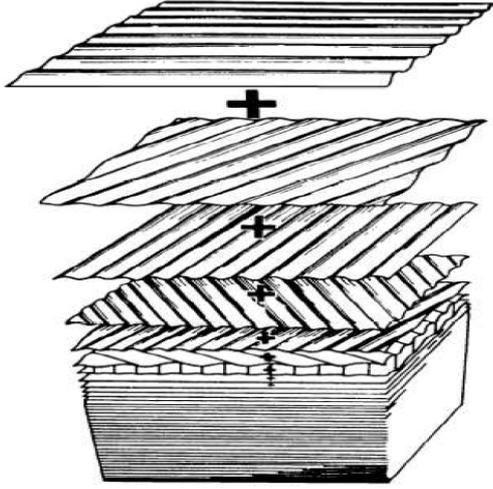


Fig. 2 Superposition of regular wave for irregular wave

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

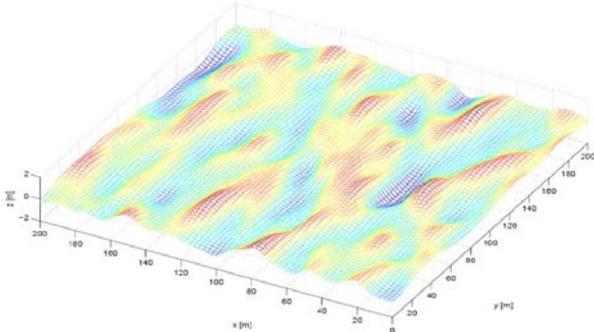


Fig. 3 Irregular wave sea state

Fig. 4은 Fig. 3의 불규칙 파랑으로 모사된 해양 환경의 한 지점에서 시간변화에 대한 파면의 변위를 나타낸다. 불규칙한 파면 변위는 규칙 파랑의 시간영역에 대한 푸리에 급수 해석으로 표현되며, 각 규칙 파랑성분들의 위상은 무작위한 성격을 가지고 있다.

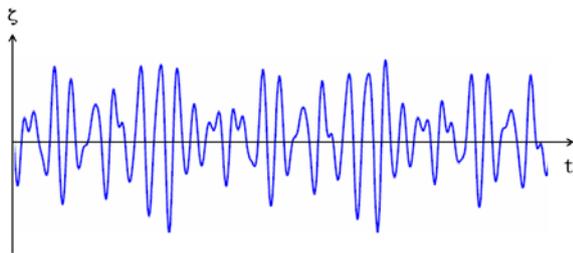


Fig. 4 Elevation of the sea surface

전 세계 해양 환경은 기상의 변화에 따라서 지역적으로 시간적으로 변화하며, 그에 따라서 파 스펙트럼도 지속적으로 변화한다.

다. 또한, 파에 포함되어 있는 에너지에 비례하는 유의파의 크기가 같더라도 주파수에 따른 에너지의 분포가 매우 다르기 때문에 파 주기 면에서 매우 다른 해양 환경이 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(Yum, 2012).

식 (3)과 식 (4)는 각각 ITTC (A.R.M.J Lloyd, 1998), JONSWAP (Sensen, 2005) 스펙트럼을 나타낸다. 식의 ω_p 는 파 스펙트럼 최댓값에 해당하는 주파수를 나타내며, T_p 그 주파수의 주기이다. 파랑 생성 시 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

$$\begin{aligned} T_1 &= 1.086 \cdot T_2 = 0.772 \cdot T_p \\ 0.921 \cdot T_1 &= T_2 = 0.711 \cdot T_p \\ 1.296 \cdot T_1 &= 1.407 \cdot T_2 = T_p \\ T_1 &: \text{Average wave period} \\ T_2 &: \text{Zero-crossing wave period} \\ T_p &: \text{Peake frequency period} \\ H_{1/3} &: \text{Significant wave height} \end{aligned} \quad (3)$$

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

where

$$\begin{aligned} \gamma &= 3.3 (\text{Peakedness factor}) \\ A &= \exp\left\{-\left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sigma \sqrt{2}}\right)^2\right\} \\ \omega_p &= \frac{2\pi}{T_p} (\text{Peak frequency}) \\ \sigma &= \text{if } \omega < \omega_p \text{ than } \sigma = 0.07 \\ &\quad \text{if } \omega > \omega_p \text{ than } \sigma = 0.09 \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

2.2 바람에 의한 영향

바람의 경우 일반적으로 2가지 요소인 평균값과(Mean value), 변동요소(Fluctuating component)로 구성되며, 평균값과 변동요소는 풍속과 풍향의 변화를 나타내는 요소이다. 풍속은 풍향에 없는 돌풍(Gust)이라는 요소가 변동요소에 포함되어 있다. 돌풍은 풍속이 순간 강하게 부는 현상을 말한다. 바람에 의한 영향은 바람이 부는 높이에 따라 풍속의 세기가 다른 3차원 현상이지만 이번 연구에서는 높이에 따른 풍속변화를 고려하지 않고 높이에 상관없이 일정한 풍속만 고려하였다. 풍향은 2차원(x, y성분)으로 제한하여 수평면 성분만 고려하였으며 풍향은 Fig. 1에서 보여주는 파랑의 경우와 다르며 일반적으로 바람이 불어오는 방향을 그 바람의 방향이라고 정의한다. 모델링한 바람의 Wind parameters는 방향과 진행속도가 있다. 바람은 평균방향과 평균속도를 기본으로 하여 방향과 속도가 천천히 변하는 특징을 가지며 변화하는 방향과 속도는 제한된 범위를 가진다. 식 (6)은 바람에 의한 x, y방향 풍하중을 나타내며 Fujiwara 풍하중 추정식을 이용하였다(Fujiwara, et al., 2006).

$$\begin{aligned} X_A &= \frac{1}{2} \rho_A C_{AX}(\psi_A) U_A^2 A_T \\ Y_A &= \frac{1}{2} \rho_A C_{AY}(\psi_A) U_A^2 A_L \end{aligned} \quad (6)$$

ρ_A : Air density
 C_{AX}, C_{AY} : Wind coefficients
 C_H : Heel effect coefficient
 ψ_A : Relative wind direction
 U_A : Relative wind velocity
 A_T : Frontal projected area
 A_L : Lateral projected area

변동요소는 1st order Gauss-Markov process를 이용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고, 돌풍 요소는 식 (8)인 바람 스펙트럼(Harris)을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{U}} + \mu \bar{U} &= w \\ 0 \leq \bar{U}_{\min} \leq \bar{U} \leq \bar{U}_{\max} \\ \dot{\bar{\psi}} + \mu_2 \bar{\psi} &= w_2 \\ \bar{\psi}_{\min} \leq \bar{\psi} \leq \bar{\psi}_{\max} \end{aligned} \quad (7)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{fS(f)}{u^{*2}} &= 583f^* & 0 \leq f^* \leq 0.003 \\ &= \frac{420f_*^{0.70}}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}} & 0.003 \leq f^* \leq 0.1 \\ &= \frac{838f_*}{(1+f_*^{0.35})^{11.5}} & f^* \geq 0.1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_* &= \frac{f_z}{U_z} \\ u(t) &= \sum_{i=1}^N \sqrt{2S_u(f_i) \Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \epsilon_i) \\ &(\text{Fluctuating component at } z(m)\text{high}) \\ U_w(t) &= U_0 + u(t) \quad (\text{Total wind velocity}) \end{aligned}$$

2.3 조류에 의한 영향

조류는 바람의 경우와 달리 평균요소만 고려하며, 영향도 2차원으로 수평면 성분만 고려하였다. 조류의 방향은 파랑의 경우와 같이 흘러 나가는 방향이 조류의 방향으로 정의된다. 모델링한 조류의 Current parameters는 방향과 속도가 있으며 이 값들은 모두 변동 없이 일정한 값이다. 경험식으로 구해지는 조류력을 이용하였고, 식 (9)와 같다(Sensen, 2005)(Faltinsen, 1990).

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{1}{2} \rho_C C_{CX}(\psi_C) U_{CX}^2 A_X \\ Y_C &= \frac{1}{2} \rho_C \left[\int_{L_{pp}} dx C_{CY}(\psi_C) (A_L/L_{pp}) \right] U_{CY}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

ρ_C : Water density
 C_{CX}, C_{CY} : Current coefficient
 ψ_C : Relative current direction
 U_{CX} : Relative current velocity
 U_{CY} : Relative current velocity
 A_X : Frontal projected area _ water
 A_Y : Transversal area _ water
 L_{BP} : Length between perpendiculars

2.4 소비전력 예측 시뮬레이터 모델링

본 연구에서 사용된 불규칙 파랑 모델은 ITTC 스펙트럼을 이용하여 계산되며, 규칙 파랑에 대한 계산도 가능하다. Fig. 5는 Fig. 3과 같이 불규칙 파랑 생성을 위한 모델과 바람, 조류 모델이며, Matlab/Simulink를 이용하여 모델링 하였다.

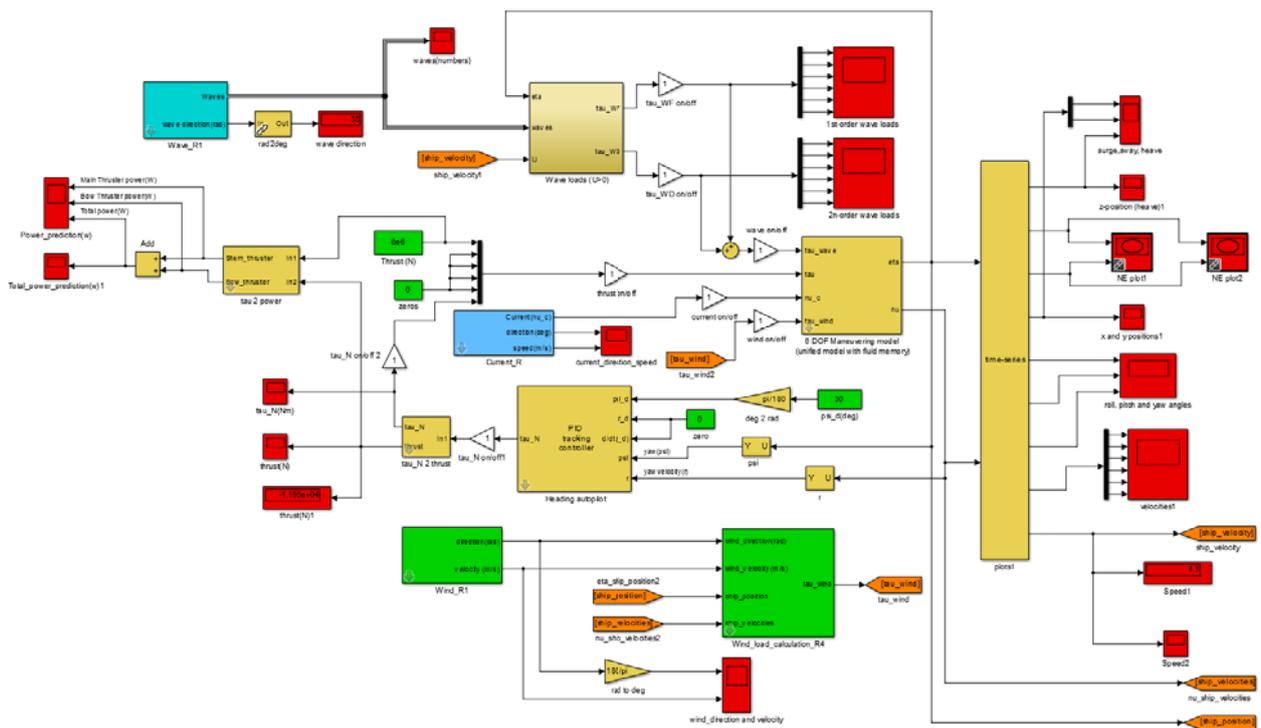


Fig. 6 Power prediction simulator

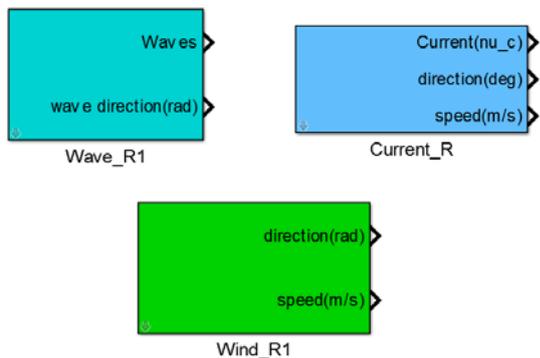


Fig. 5 Wave, wind, current block model

Wave block의 출력은 크게 2가지로 나뉜다. 첫 번째는 불규칙 파랑의 파면 변위 생성을 위한 규칙 파랑의 주파수, 방향, 진폭, 파수, 위상이다. 이는 Wave block에 입력되는 Parameter들과 파 스펙트럼을 이용하여 계산된다. 두 번째는 불규칙 파랑의 평균진행 방향이다. 이는 첫 번째 출력에서 사용했던 파 스펙트럼에 방향 분포 함수를 적용하여 계산된다. 조류와 바람 모델은 2차원 평면에 대한 영향만 고려하였고 Current block은 조류의 속도와 방향이 조류력 계산을 위해 출력하며 이때 속도는 x, y성분으로 나뉘어서 출력된다. Wind block은 바람의 풍속과 풍향성분이 출력되도록 되어있다. 조류와 바람의 모델을 Fig. 5에 나타내었다.

‘선박운동 모델’은 MSS (Fossen, et al., 2008)모델에 풍하중을 고려하기 위한 Wind load calculation block을 추가하여 구성하였고 추진기의 추진력에 따라 요구되는 소비전력 예측 모델인 ‘전기추진 소비전력 예측 모델’을 구성하였다. 이 모델을 ‘선박운

동 모델’과 같이 통합하여 해양 환경에서 선박의 추진전동기 소비전력 계산을 위한 ‘Power prediction simulator’를 Matlab/Simulink를 기반으로 Fig. 6와 같이 구성하였다. 선박운동 모델은 Wave, Wind, Current block과 대상 선박의 Ship data (Added mass, Damping, Motion RAOs, Force RAOs, Drift data, Body matrix and output)를 이용하여 선박의 6-DOF 운동을 계산한다. 대상 선박의 Ship data는 AQWA를 이용하여 계산하였으며 선박운동 모델에 사용 가능한 변수 형태로 변환하여 적용하였다.

Fig. 7은 Fig. 6의 Power prediction simulator를 Veristand 2014ver.으로 모델링한 Simulator interface이다. 이 모델은 Real-Time을 기반으로 한 HILS test를 수행할 때 적용가능하며, Wave, Wind, Current parameter들과 선박운동 계산에 필요한 Parameter들을 시뮬레이션 수행 중에 사용자가 원하는 값으로 변경이 가능하며 그에 따른 결과를 볼 수가 있다.



Fig. 7 Interface of simulator – Veristand

Table 1은 대상 선박에 대한 주요 정보를 보여주며, Fig. 7은 선박의 선형 모델이다. 선박의 수면 위와 아래의 면적, 풍하중과 조류력 계산을 위해 필요한 선박의 Parameter들은 145K급 LNG 선박의 일반적인 값으로 가정하였다.

Table 1 Specifications of the target ship

Dimensions	Ship
Lpp	273.4m
Breadth	42.6m
Draft	10.5m
LGC	3.93m
Kxx	18.21m
Kyy	65.0m
Kzz	67.4m

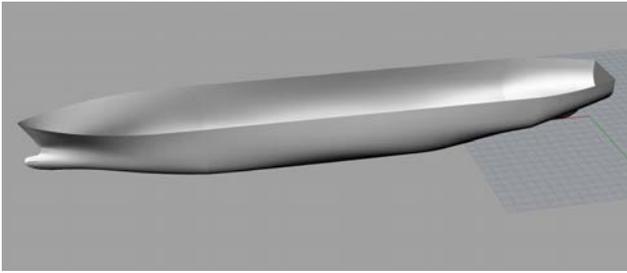


Fig. 8 Ship Model

선박의 소비전력 예측을 위해 식 (10)을 통한 Usage factor를 이용하였으며 Usage factor(C_p)는 선박에 작용하는 해양 환경에 의한 하중과 필요한 추진력을 발생시킬 때 소비하는 전력의 비를 의미하며, 추진전동기의 사양, 프로펠러의 특성 등 복합적인 요소들이 고려되어 결정된다. 본 연구에선 C_p 를 0.2로 하여 소비전력 예측 시뮬레이션을 수행하였다(Bortnowska, 2007).

$$N_{ss} = \frac{T_p}{C_p} [kW] : \text{Predictive value of ship power}$$

$$T_p [kN] : \text{Resultant thrust generated by ship propellers}$$

$$C_p : \text{Usage factor of the power consumed to generate the thrust by ship propellers}$$
(10)

3. 소비전력 예측 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 시나리오

Power prediction simulator를 이용해 선박의 운동계산을 통한 소비전력 예측 시뮬레이션을 수행하였다. PID제어기로 구성된 Autopilot block을 이용하여 선박의 Heading angle을 유지하며 전진할 때 추진전동기에서 사용하는 전력을 예측하는 시뮬레이션을 하였다. 전진을 위해 선미의 추진전동기(Main thruster)가 추진력 6,000kN을 발생시키고, Heading angle = 30°로 유지하기 위해 선수에 설치된 추진전동기(Bow thruster)를 이용하여 유지한다고 가정하였다. 선박의 Heading angle의 초기 조건은 = 0°이며, Fig. 9는 시뮬레이션을 위한 선박의 초기위치, Heading angle, 전진 조건과 해양 환경 작용 방향을 나타내고, Table 2는 해양 환경 방향에 대한 4가지 시나리오를 나타낸다.

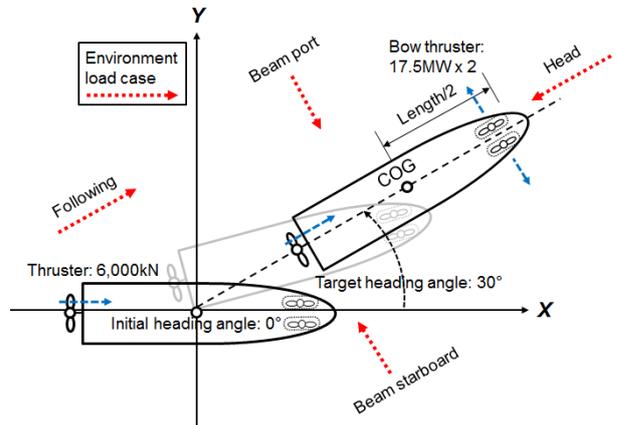


Fig. 9 Initial condition and test cases of ship operation

Table 2 Test cases as direction of environmental load

Case	Wave	Wind	Current
	direction (deg.)	direction (deg.)	direction (deg.)
Following	30°	210°	30°
Beam starboard	120°	300°	120°
Head	210°	30°	210°
Beam port	300°	120°	300°

각 시나리오별 해양 환경 방향을 제외한 다른 조건들은 Table 3과 같이 가정하였고, 시뮬레이션 시간은 300초 시뮬레이션 Step size는 0.05로 하였다.

Table 3 Values of environmental load for simulation

Environment load	Value	
Wave	Height (m)	5
	Number of frequency	20
	Number of direction	10
	Wave spectrum	'ITTC'
	ω_p (rad/s)	0.56
Wind	Speed(m/s)	10
	Gust	Harris spectrum
Current	Speed(m/s)	0.3

3.2 시뮬레이션 결과

4가지 각 시나리오별 불규칙 파랑에 대한 해양상태는 Fig. 10, 11, 12, 13에서 보여준다.

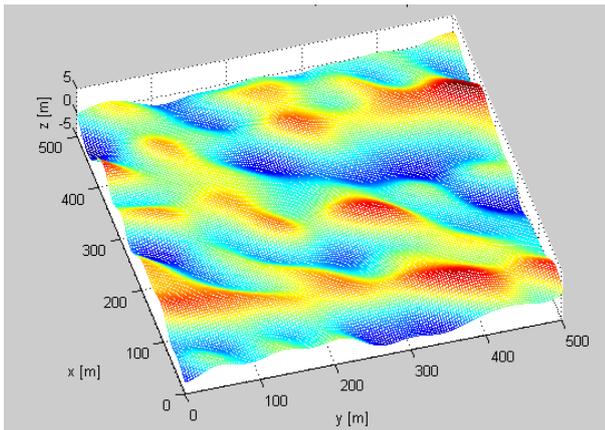


Fig. 10 Irregular wave sea state - following

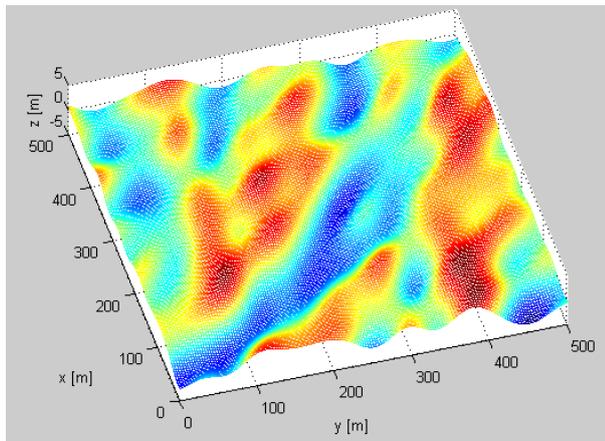


Fig. 11 Irregular wave sea state - beam starboard

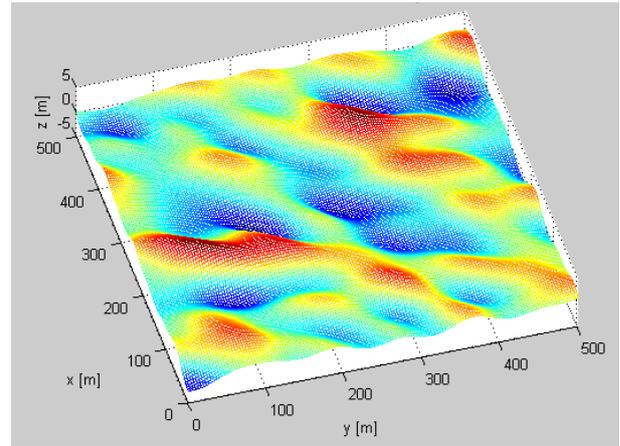


Fig. 12 Irregular wave sea state - head

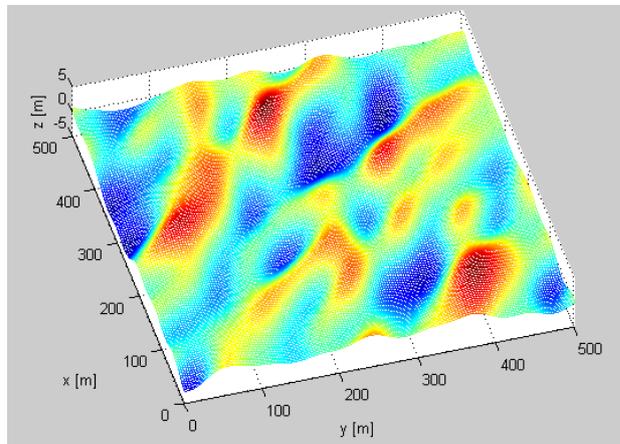


Fig. 13 Irregular wave sea state - beam port

선박의 초기위치(0, 0)와 진행 방향은 Fig. 14에 나타나 있으며, Fig. 1의 지구고정 좌표계인 X-Y평면에서의 이동을 나타낸다. Design req. 경로와 비교하여 각 시나리오별 해양 환경의 영향에 의해 선박의 진행경로가 다르게 나타남을 볼 수 있다.

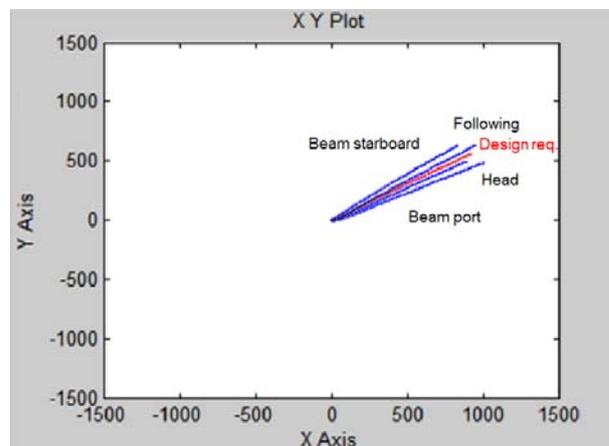


Fig. 14 Traces of the ship position as cases

선박의 측면에 작용하는 Beam의 경우 Head, Following의 경우보다 Design req. 경로를 더 많이 벗어남을 보였다. 그리고 Head와 Following의 경우 Design req. 경로에서 벗어남 정도는 Beam의 경우보다 작지만 이동한 거리는 서로 다르게 나타났다. Table 4는 4가지 시나리오에서 시뮬레이션 시간이 300초 일 때의 선속을 보여준다.

Table 4 The result of simulation – ship speed

Case	Design req.	Following	Beam starboard	Head	Beam port
Speed (knots)	8.55	8.94	8.16	7.78	8.74
Difference	-	+0.39	-0.39	-0.77	+0.19

Head 와 Following의 경우 선박은 정면과 후면에서 해양 환경의 하중을 받는다. Head의 경우 선박의 속력은 Design 속력보다 0.77kn 느렸고, Following의 경우는 Design 속력보다 0.39kn 빠르게 나타났다. 이는 Following일 때 선박의 진행 방향과 해양 환경의 작용방향이 일치하여 선속이 증가함을 보이고, Head일 때는 해양 환경의 작용방향이 진행 방향의 반대이기 때문에 느린 선속을 나타낸 것으로 판단된다. Beam starboard와 Beam port의 경우 선박의 측면에서 해양 환경의 하중을 받으며, Beam starboard의 경우 선박의 속력은 Design 속력보다 0.39kn 느렸고, Beam port의 경우 0.19kn 빠르게 나타났다. Beam starboard의 경우 선박에 작용하는 하중은 지구고정 좌표계를 기준으로 -x방향 하중과 +y방향 하중으로 나눌 수 있고, Beam port의 경우 선박에 작용하는 하중은 지구고정 좌표계를 기준으로 +x방향 하중과 -y방향 하중으로 구분할 수 있다. Beam port의 +x방향 하중이 선속의 증가에 영향을 미치며, Beam starboard의 -x방향 하중이 선속 감소에 영향을 미쳤기 때문에 두 가지 Beam에 따라 다른 선속이 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 15~18은 각 시나리오별 소비전력 예측 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각 그래프는 위에서부터 아래로 전진을 위한 Main thruster의 소비전력, Heading angle 제어를 위한 Bow thruster의 소비전력 그리고 Main과 Bow thruster 전체 소비전력의 합을 나타낸다. 각 시나리오에서 전진을 위한 Main thruster는 6,000kN의 추진력을 일정하게 내며 이는 30MW의 전력을 소비한다. 초기 약 50초 동안 Heading angle을 30°로 변화시키기 위해 Bow thruster가 최대 추진력을 내며 최대 소비전력 35MW를 사용하며, 각 시나리오에 따른 최대 소비전력 사용시간이 조금씩 다를 수 있다. 50초 이후 해양 환경 조건에 의해 Bow thruster의 소비전력이 시간에 따라 변화하며 Beam의 경우 Bow thruster의 최대 전력 사용구간이 많이 나타난다. 이는 Beam 해양 상태가 Head, Following 경우보다 상대적으로 Heading angle 변화에 큰 하중을 작용한다고 볼 수 있다.

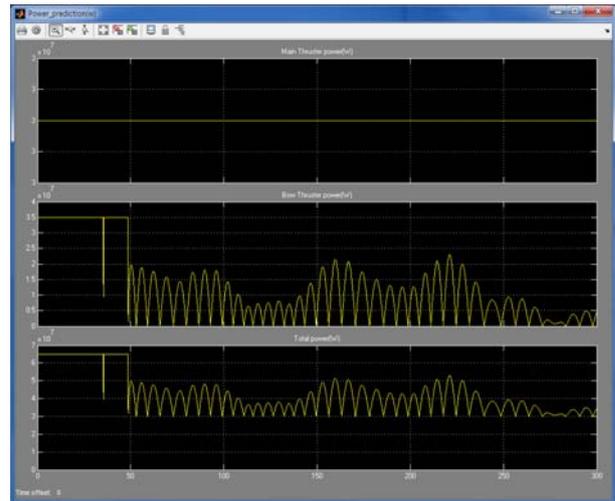


Fig. 15 Power prediction – following

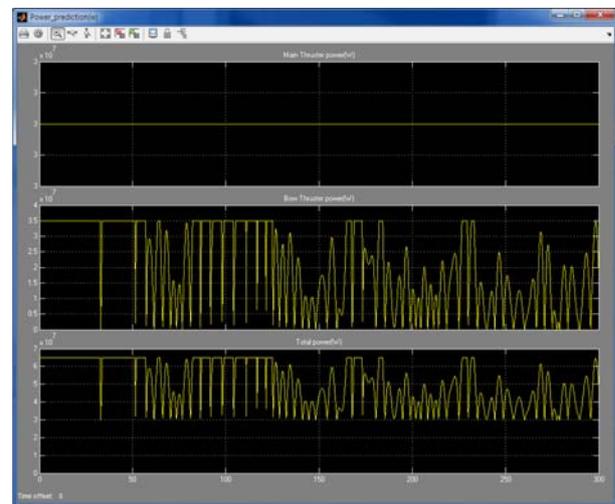


Fig. 16 Power prediction – beam starboard

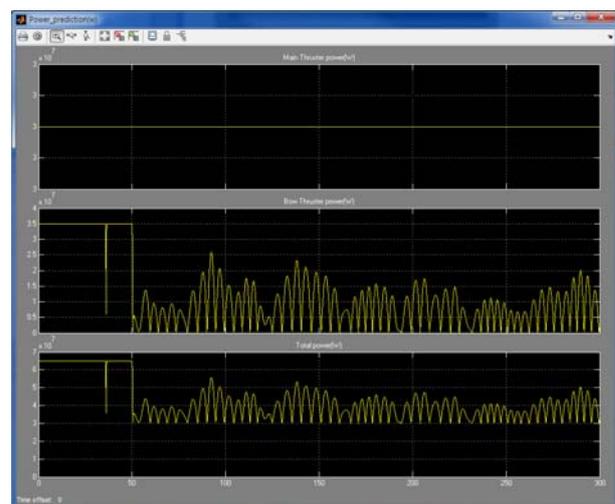


Fig. 17 Power prediction – head

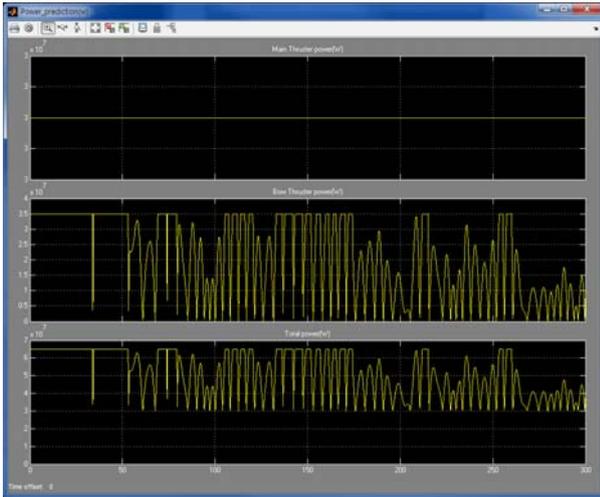


Fig. 18 Power prediction – beam port

Fig. 19~22는 각 시나리오별 선박의 Roll, Pitch, Yaw를 나타내며 Yaw는 Heading angle과 같다. 각 그래프는 위에서부터 아래로 Roll, Pitch, Yaw를 나타낸다. Yaw는 약 45~50초까지 증가하여 Overshoot 약 35°~37°를 나타낸 후 점차 30°로 수렴한다. 45~50초까지 증가하는 영역은 Bow thruster의 최대 소비전력 사용 구간과 일치한다. Roll, Pitch의 값은 해양 상태에 따라 진폭의 크기와 변화 구간이 다르게 나타났으며, Beam port의 경우가 Head, Following, Beam starboard 경우보다 Roll변화 폭이 크게 나타났다.

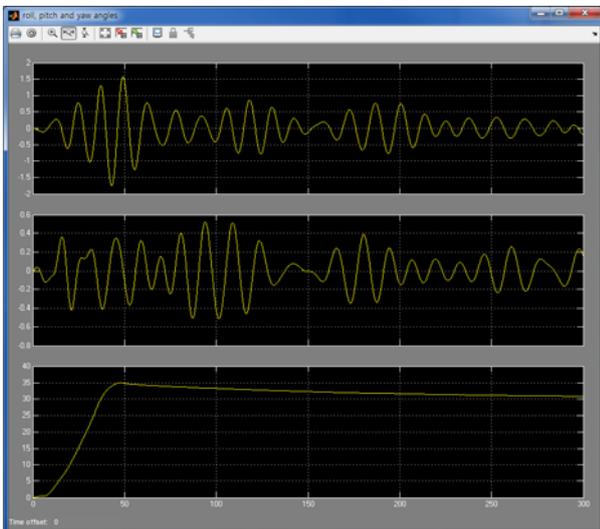


Fig. 19 Roll, Pitch, Yaw – following

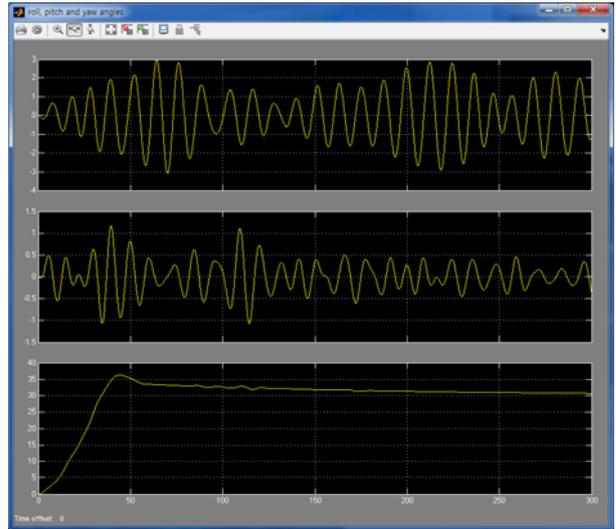


Fig. 20 Roll, Pitch, Yaw – beam starboard

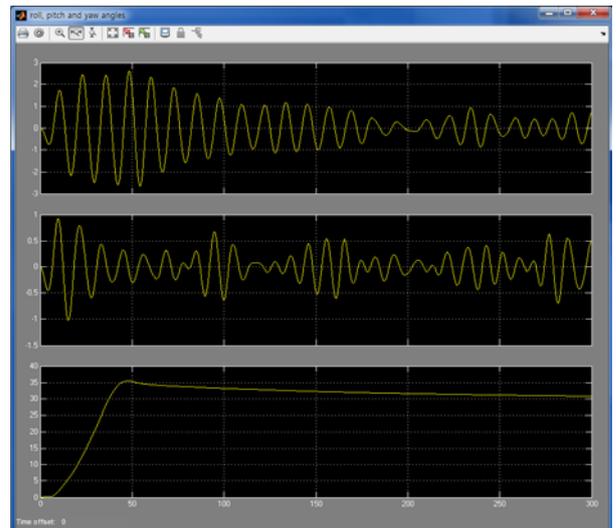


Fig. 21 Roll, Pitch, Yaw – head

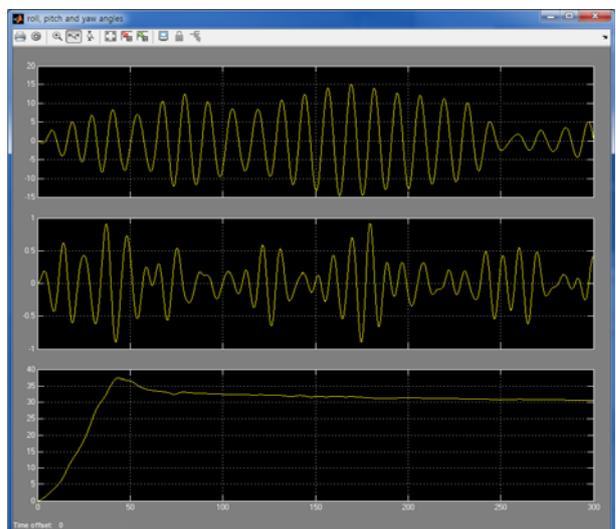


Fig. 22 Roll, Pitch, Yaw – beam port

3.3 결과 분석

해양 환경을 정면으로 받는 Head의 경우 Wave, Wind, Current가 선체에 가하는 하중이 선박의 진행 방향과 반대여서 선속이 가장 느리게 나타난 것으로 보이며, Beam starboard와 Beam port의 경우 지구고정 좌표계에 대해 선박에 가하는 하중을 x, y성분으로 나누었을 때 Beam port의 x성분은 선속의 증가 방향으로 작용하고, Beam starboard의 x성분은 선속의 감소 방향으로 작용하여, 두 Beam의 경우 선속이 Design 선속보다 빠르거나 느리게 나온 것으로 판단된다. 경로측면에선 Beam의 2가지 경우가 선박의 측면에 하중을 가하기 때문에 경로이탈 편차가 다른 경우보다 상대적으로 크게 나타난 것으로 보이고, Heading angle을 30° 유지하는 동안 지속적인 해양 환경하중에 의해 Bow thruster의 소비전력이 높은 값을 유지하며 변화하였다. 본 연구에서는 Main thruster가 6,000kN의 추진력을 유지하면서 해양 환경하중에 의한 선속 차이를 도출하여 요구되는 선속 유지를 위한 추가 필요전력 예측에 참조할 수 있도록 하였다. 또한 환경하중이 작용하는 상태에서 17.5MW Bow thruster 2대를 사용하여 Heading angle을 초기 0°에서 30°로 변경하고 유지하는데 필요한 시간과 소비전력을 예측할 수 있었다.

4. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 불규칙 파랑, 바람, 조류를 모델링 하고 각 모델들을 이용한 해양 환경하중계산을 통해 실제 해양 환경과 비슷한 상황에서 선박운동 계산을 수행하여 선박거동 모사가 가능함을 알 수 있었다.
- 선박운동 모델과 전기추진 소비전력 예측 모델을 이용하여 Power prediction simulator를 구성하였고, 이를 통해 해양 환경에서 선박이 추진 및 Heading angle을 유지하기 위해 추진전동기에서 사용하는 소비전력을 예측하였다.

본 연구를 통한 해양 환경에 따라 선박의 추진 및 자세 제어에 필요한 소비전력 예측 결과를 이용하여 전기추진선박 설계 시 전력시스템의 최대 발전용량과 추진전동기의 설계 사양을 고려할 때 참고 할 기초자료를 제공 할 수 있을 것이며, 또한 Power prediction simulator 모델을 Veristand 2014ver. 모델로 구현하여 선박 전력관리 시스템인 PMS (Power Management System) 나 다른 전기제어 시스템의 SILS (Software In the Loop Simulation) 또는 HILS (Hardware In the Loop Simulation) test를 위한 모델로 사용가능 하다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2011-0030671)

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.
- Bortnowska, M., 2007. Prediction of power demand for ship motion control system of sea mining ship fitted with tubular winning system, *POLISH MARITIME RESEARCH*, 4(54), pp.24-30.
- Faltinsen, O.M., 1990. *SEA LOADS ON SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES*. CAMBRIDGE University PRESS, pp. 187-197.
- Fujiwara, T., Ueno, M., Ikeda, Y., 2006. Cruising Performance of a Large Passenger Ship in Heavy Sea. *International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.1098-6189.
- Hong, J.T. Gang, G.H. & Bae, J.C., 2012. The research of electrical propulsion ship and infrastructure construction of assessment to test certification. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(2), pp.60-65.
- Kalsi, S.S., Nayak, O., 2005. Ship electrical system simulation. *Electric Ship Technologies Symposium*, Philadelphia, pp.63-69.
- Kim, S.Y., 2007. Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship, Master course thesis, *Seoul National University*.
- Kim, Y.M., 2014. Power Management System Modeling and Characteristics Analysis for Electric Propulsion Ship, Master course thesis, *Sungkyunkwan University*.
- Koo, D.H., 2009. The Technology Trend of Electric Propulsion Ship. *The Transactions of the Korea Institute of Electrical Engineers*, 58(5), pp.36-43.
- Kwak, K.,K., 2014. A Study on Integrated-Power-System Simulation Model of Electric-Propulsion-Ship, Master thesis, *Pusan National University*.
- Lee, S.,G., Kim, S.,H., Jeong, Y.,S., Jung, S.,Y., 2009. Power system modeling and analysis of electric ship propulsion system, *31th International Telecommunications Energy Conference*, Incheon, Republic of Korean, 18-22 October INTELEC, 2009.
- Prempraneerach, P. Kirtley, J. Chrysostomidis, C. Triantafyllou, M.S. & Karniadakis, G.E., 2008. Design of the All-Electric Ship: Focus on Integrated Power System coupled to Hydrodynamics. MIT Sea Grant Technical Reports *No MITSG 08-31*.
- Sensen, A.J., 2005. Marine Cybernetics: Modelling and Control Lecture Notes for TMR4241 Marine Control Systems, NTNU.
- Thor I. Fossen, Tristan Perez, 2008. NTNU MARINE SYSTEMS

SIMULATOR, <http://www.marinecontrol.org>

Won, J., 2008. Modeling and Characteristic Analysis of Electric Ship Propulsion System, Master course thesis, *Dong-A University*.

Yum, D.J., 2012. *SHIP MOTION AND MANOEUVRABILITY*. Ulsan University PRESS(UUP).

Zahedi, B., Norum, L.E., 2013. Modeling and Simulation of All-Electric Ships With Low-Voltage DC Hybrid Power Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(10) pp.4525–4537