JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 21, No. 3 : 613~619 Mar. 2017

PMS HILS 구축을 위한 Dual Fuel Generator 모델링 및 시뮬레이션

황준태[1] · 홍석윤[1] · 권현웅[2] · 이광국[3] · 송지훈[4*]

Dual Fuel Generator Modeling and Simulation for Development of PMS HILS

Joon-Tae Hwang[1] · Suk-Yoon Hong[1] · Hyun-Wung Kwon[2] · Kwang-Kook Lee[3] · Jee-Hun Song[4*]

[1]Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea
[2]Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Koje College, Geoje 53325, Korea
[3]Department of Naval Architecture and Ocean IT Engineering, Kyungnam University, Changwon 51767, Korea
[4*]Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약

본 논문에서는 PMS(Power Management System) HILS(Hardware In the Loop Simulaition) 가상 제어기 환경 구축을 위하여 디젤과 LNG를 연료로 사용가능한 DF(Dual Fuel) Generator를 MATLAB/SIMULINK 기반으로 모델링을 수행하고 시뮬레이션 결과 모니터링이 가능한 인터페이스를 구현하였다. DF Generator의 주요 구성은 기계적 동력을 공급하는 DF 엔진과 기계적 동력을 받아 전력을 생산 및 공급을 하는 동기발전기가 있다. DF 엔진의 서브모델은 throttle body, intake manifold, torque generation 그리고 mass of LNG and diesel quantity 가 있다. 또한, 단일 용량을 초과하는 전체 부하를 공유하기 위하여 병렬 연결된 DF Generator 와 governor 모델을 이용하여 부하 분담 시스템을 구현하였다. 시뮬레이션 결과와 가상 부하에 따른 예상 결과의 비교를 통해 DF Generator 모델의 신뢰성을 검증하였다.

ABSTRACT

In this paper, DF(Dual Fuel) Generator modeling, which uses both conventional diesel fuel and LNG fuel, has been performed and monitoring system has been developed based on MATLAB/SIMULINK for the development of PMS(Power Management System) HILS(Hardware In the Loop Simulation). The principal components modeling of DF Generator are DF engine which provides the mechanical power and synchronous generator which convert the mechanical power into electrical power. Submodels, such as throttle body, intake manifold, torque generation and mass of LNG and diesel Quantity are used to perform DF engine. Also, governor is used for load sharing between paralleled DF generators to share a total load that exceeds the capacity of a single generator. To verify modeling of DF Generator designated ship lumped load Simulation is carried out. A validity of DF Generator has been verified by comparison between simulation results and estimated result from the designated lumped load.

키워드 : 이종 연료 발전기, 하드웨어인더루프 시뮬레이션, 전력 관리 시스템, 시뮬링크

Key word : Dual Fuel Generator, HILS(Hardware In the Loop Simulation), PMS(Power Management System), Simulink

Received 14 December 2016, **Revised** 19 December 2016, **Accepted** 25 December 2016

* **Corresponding Author** Jee-Hun Song(E-mail:jhs@jnu.ac.kr, Tel:+82-61-659-7156)
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.3.613 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/ by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

최근 LNGC(Liquefied Natural Gas Carrier), Shuttle Tanker, Drillsip 등과 같은 고부가가치 선박의 자동화에 대한 요구가 다양해지고 선박의 항해 장비에 통합 운용의 개념이 도입되면서 통합시스템의 복잡도가 증가하고 있다. 제어기의 입출력을 나타내는 I/O(Input Outpout) point는 시스템의 복잡도를 나타내는데 그림 1 같이 고부가가치 선박일수록 시스템의 복잡도가 증가한다. 시스템의 복잡도가 증가 할수록 시스템 자체에 오류를 내포할 가능성이 상승하는데 2012년 IMCA (International Marine Contractors Association)에서 발간한 “DP station keeping incidents” 보고서에 따르면 2010년 DP(dynamic positioning)관련 사고가 56회로 집계 되었고 사고의 주요 요인이 전기적 오류 21 %, 컴퓨터 오류 11 %, 전력문제 9 %로 나타났다[1]. 이와 같은 사고방지를 위하여 통합제어시스템의 안전성 및 신뢰성이 중요한 이슈로 자리매김하고 있으며, 이를 해상 시운전으로 대체하는 것은 한계가 있으므로 고장 및 오작동을 테스트하기 위한 검증 체계가 필요하다[2-5].

통합시스템의 신뢰성 검증을 위해 하드웨어 기반 검증 체계인 HILS(Hardware In the Loop Simulation)가 널리 사용되고 있다. HILS는 통합시스템의 제어기를 가상의 시뮬레이터를 이용하여 검증하는 시스템으로 극한 상황이나 돌출 변수 등을 손쉽게 구축이 가능하다. 또한 시운전 시 소요되는 검증 단계를 단축시켜 선박의 인도일정을 단축 할 수 있다. HILS 기반 장비 시뮬레이션 기술은 1980년대 후반부터 미국과 독일 등 선진국 자동차, 항공 및 국방 등의 산업에 도입하기 시작하였으며, 2011년 ISO에서 제정한 자동차 기능 안전 표준 ISO 26262에 단위시험(Unit Testing)과 통합시험(Integration Testing)과정에 HILS 검증 항목이 추가되면서 ISO 26262와 함께 HILS 검증이 큰 주목을 받기 시작했다. 현재 조선해양 분야에서는 HILS가 강제규정으로 적용되지 않은 상태이지만 추후 시스템의 복잡도 증가에 따른 HILS 검증의 요구가 증가할 것으로 보인다[1,5].

조선해양 분야에서 HILS 기술을 확보하고 검증을 수행하는 기업으로 노르웨이의 Marine Cybernetics가 있다. Marine Cybernetics는 DP HILS, PMS(Power Management System) HILS 등 2002년부터 조선해양 분야의 HILS 검증을 수행하고 있다. 현재 국내의 경우에는 HILS 검증의 상용화 실적을 가진 기업이 없다. 하지만 몇몇 기업은 정부의 지원으로 DP HILS 사업을 수행한 바 있고, 조선 3사(현대중공업, 삼성중공업, 대우조선해양)에서도 HILS 기술 개발에 박차를 가하고 있다[2].

본 논문에서는 선박의 전력을 생산 및 배분을 관리하는 시스템인 PMS HILS의 가상 제어기 환경 구축을 위하여 MATLAB/SIMULINK 기반 DF(Dual Fuel) Generator 모델링을 수행하였고, 시뮬레이션 결과를 확인 할 수 있는 인터페이스를 구현하였다. 또한 단일 부하를 초과하는 전체부하를 공유하기 위하여 DF Generator 3기를 병렬 연결하여 부하 분담 시스템과 가상부하에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 1 Complexity of Marine Software

Ⅱ. DF(Dual Fuel) Generator 모델링

본 논문에서는 전기추진선박용 PMS에서 선박에 전력을 공급하는 DF(Dual Fuel) Generator 모델링을 수행하였다. DF Generator는 그림 2 와 같이 크게 전력을 생산하는 동기발전기와 동기발전기에 전력을 공급하는 엔진부가 있다. 동기발전기는 기계 동력과 계자전압을 입력 받아 3상 전압, 전류를 출력하는데 대칭 3상 방식은 순간전력의 총합이 일정하여 안정적인 전력 출력이 가능하다. DF Generator의 동기발전기는 Simulink에서 제공하는 모델을 이용하여 구성 하였다. 엔진부는 그림 3 과 같이 정격 전압과 동기발전기의 d, q 축 전압을 입력 받아 계자전압을 제어하고 출력하는 Excitation System과 정격 속도와 발전기 속도를 입력 받아 기계적 동력을 계산하고 출력하는 엔진으로 구성되어 있다. 정격 전압과 발전기의 d, q 축 전압을 입력받아 계자 전압을 제어하고 출력하는 Excitation System 모델링은 simulink에서 제공하는 모델을 이용하였고, 엔진은 LNG와 Diesel 이중연료를 사용하는 DF 엔진을 모델링 하였다. DF 엔진의 서브모델은 throttle body, intake

manifold, torque generation 등으로 구분 할 수 있고 특성은 다음과 같다[5-7].

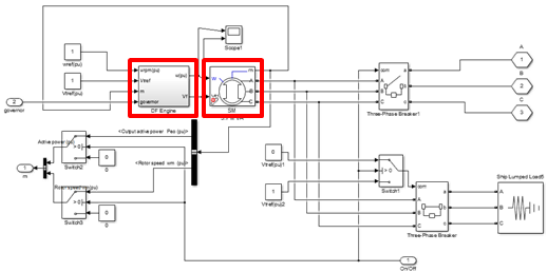

Fig. 2 DF(Dual Fuel) Generator Simulink Modeling

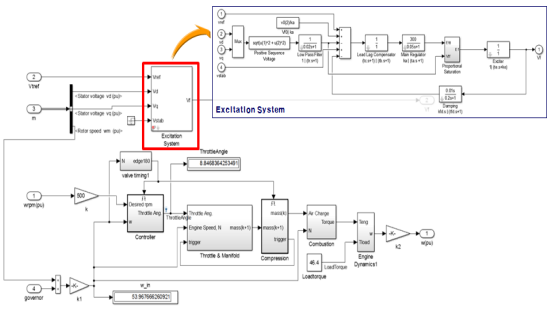

Fig. 3 DF(Dual Fuel) Engine and Excitation System Simulink Modeling

2.1. Throttle Body

매니폴드로 유입되는 공기의 유량은 throttle body의 각도와 매니폴드의 압력에 의하여 결정이 되는데, 식 (1) 과 같이 throttle body의 각도에 관한 식 $f(\theta)$와 매니폴드 내부의 압력에 관한 식 $g(P_m)$로 구분 할 수 있다.

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta)g(P_m) \tag{1}$$

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231\theta + 0.10299\theta^2 - 0.0063\theta^3$$

$$g(P_m) = \begin{cases} 1 & If\ \ P_m \le P_0/2 \\ \left| \dfrac{2}{P_0}\sqrt{P_m P_0 - P_m^2} \right| & If\ \ P_0 \ge P_m > P_0/2 \\ -\left| \dfrac{2}{P_0}\sqrt{P_m P_0 - P_m^2} \right| & If\ \ 2P_0 \ge P_m > P_0 \\ -1 & If\ \ P_m \ge 2P_0 \end{cases}$$

여기서 $\dot{m}_{ai}$는 매니폴드 내부로 유입되는 공기의 유량 (g/s), θ는 throttle body의 각도 (deg.), P_m은 매니폴드 내부의 압력 (bar), P_0는 대기압 (bar)을 나타낸다. 그림 4 는 θ변화에 따른 $f(\theta)$의 값을 나타내는데 θ가 증가할수록 $\dot{m}_{ai}$가 증가한다는 것을 알 수 있다.

그림 5 는 P_0가 1기압 일 때 P_m변화에 따른 $g(P_m)$의 값을 나타낸다. $P_m \le P_0/2$인 경우 P_m은 $\dot{m}_{ai}$의 변화에 영향을 미치지 않고, $P_0 \ge P_m > P_0/2$인 경우 P_m이 증가할수록 $\dot{m}_{ai}$가 감소하는 것을 알 수 있다. 매니폴드 내부의 압력은 대기압보다 작기 때문에 $2P_0 \ge P_m > P_0$인 경우 P_m이 증가 할수록 매니폴드에서 외부로 유출되는 공기의 유량 $\dot{m}_{ai}$이 증가 하는 것을 알 수 있고, $P_m \ge P_0$인 경우 P_m은 $\dot{m}_{ai}$의 크기변화에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

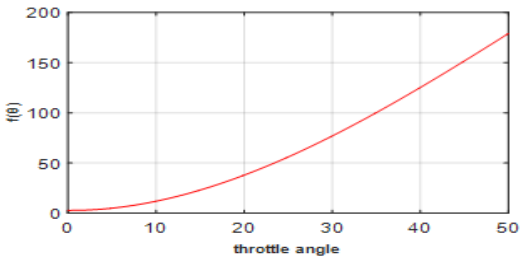

Fig. 4 The effect of throttle angle on the mass flow rate of air through the throttle

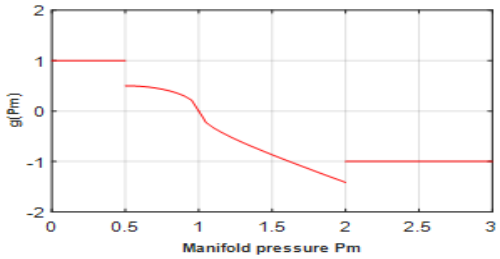

Fig. 5 The effect of manifold pressure on the mass flow rate of air through the throttle

2.2. Intake Manifold Dynamics

매니폴드 내부의 압력 변화량은 식 (2) 와 같이 매니폴드로 유입/유출되는 공기 유량의 차로 나타낼 수 있다.

$$\dot{P}_m = \frac{RT}{V_m}(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \quad (2)$$

여기서 $\dot{P}_m$은 매니폴드내부의 압력 변화량(bar/s), R은 비기체상수, T는 온도 (K), V_m은 매니폴드의 부피 (m^3), $\dot{m}_{ao}$ 매니폴드에서 유출되는 공기의 유량 (g/s)을 나타낸다. 매니폴드에서 유출되는 공기의 유량 즉 실린더로 유입되는 공기의 유량 $\dot{m}_{ao}$는 식 (3) 과 같이 나타낸다.

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 - 0.08979N \cdot P_m - 0.337 \cdot N \cdot P_m^2 + 0.0001 \cdot N^2 \cdot P_m \quad (3)$$

여기서 N은 엔진의 각속도 (rad/s)를 나타낸다. $\dot{m}_{ao}$는 N과 P_m에 의하여 결정이 되는데 N과 P_m의 변화에 따른 $\dot{m}_{ao}$의 특성은 분석하기 위하여 그림 6은 임의의 값 P_m = 0.5 bar 일 때 N의 변화에 따른 $\dot{m}_{ao}$의 값을 나타내고, 그림 7 은 N이 임의의 값 52.37 rad/s 일 때 P_m에 따른 $\dot{m}_{ao}$의 값을 나타낸다.

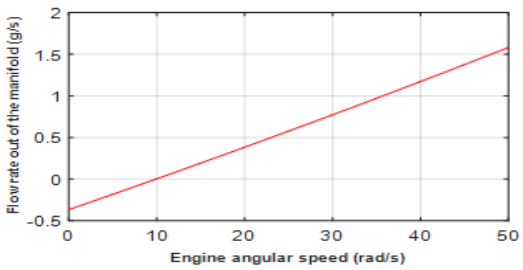

Fig. 6 The effect of the engine angular speed on the mass flow rate out of the manifold

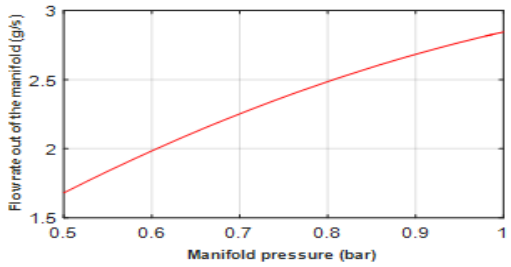

Fig. 7 The effect of the manifold pressure on the mass flow rate out of the manifold

두 변수 N과 P_m이 증가 할수록 $\dot{m}_{ao}$가 증가하는 것을 알 수 있다.

2.3 Engine Torque Generation

엔진의 torque는 식 (4) 와 같다.

$$T_{eng} = -181.3 + 379.36 \cdot m_a + 21.91(A/F) - 0.85 \cdot (A/F)^2 + 0.26\sigma^2 - 0.0028 + 0.027 \cdot N - 0.000107 \cdot N^2 + 0.0048 \cdot N \cdot \sigma + 2.55 \cdot \sigma \cdot m_a - 0.05 \cdot \sigma^2 \cdot m_a \quad (4)$$

여기서, m_a는 실린더 내부의 공기량 (g), (A/F)는 공기/연료 혼합비, σ는 점화진각(spark advance)를 나타낸다. 엔진의 효율은 (A/F)에 따라서 달라지는데 (A/F)의 변화에 따른 torque의 효율을 분석하기 위하여 그림 8 은 임의의 값 m_a = 0.15 g, N = 52.37 rad/s, σ = 15 일 때 (A/F)에 따른 torque를 나타낸다. (A/F)에 따라서 torque의 효율이 달라지는 것을 알 수 있다.

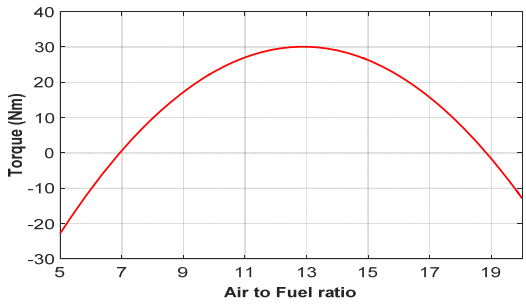

Fig. 8 The effect of air to fuel ratio on torque

엔진의 각가속도는 식 (5) 로부터 구할 수 있다.

$$J \cdot \dot{N} = T_{eng} - T_{load} \quad (5)$$

여기서, J는 회전관성모멘트 (kg/m^2), T_{load}는 torque를 나타낸다.

2.4. Mass of LNG and Diesel Quantity

LNG와 diesel의 이중연료의 비율은 식 (6) 으로부터 구할 수 있다.

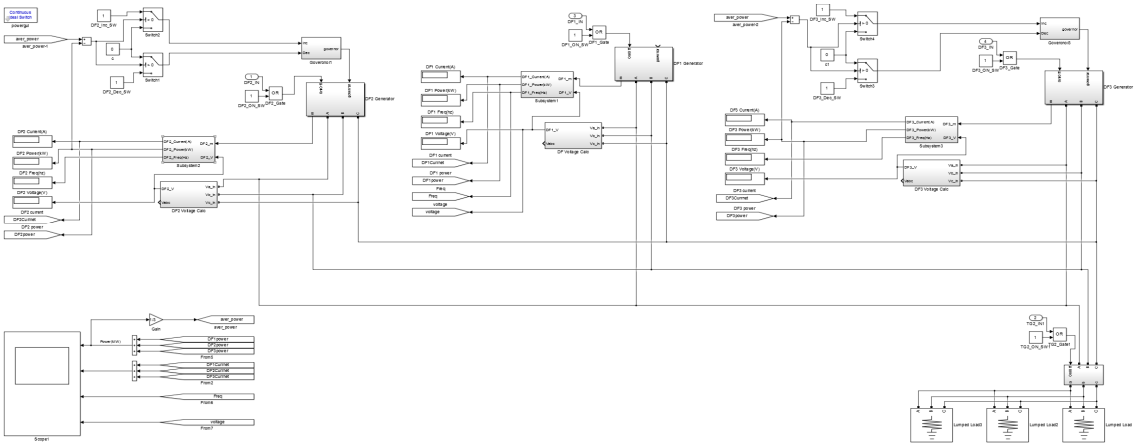

Fig. 9 Parallel connection of DF(Dual Fuel) Engine Simulink Modeling

$$Z = \frac{m_{LNG}}{m_{Diesel} + m_{LNG}} \times 100\% \qquad (6)$$

여기서, m_{LNG}는 LNG가 분사되는 유량 (g/s)을 나타내고, m_{Diesel}는 diesel이 분사되는 유량 (g/s)을 나타낸다. Z = 0% 인 경우 diesel을 연료로 사용하는 경우 이고, Z가 증가하면 LNG의 사용 비율 증가를 나타낸다.

Ⅲ. 가상부하를 이용한 DF(Dual Fuel) Generator 시뮬레이션

DF(Dual Fuel) Generator의 출력 시뮬레이션을 위하여 DF Generator 사양의 가상부하를 연결하여 시뮬레이션을 수행하였다. DF Generator의 사양은 max power 5.7 MW, voltage 1,200 V, frequency 50 Hz 이고, 그림 9 와 같이 DF Generator 3기를 병렬로 연결하여 Power Generator를 구성하였고, 발전기의 통합 전력이 일정한 값으로 유지시키는 Governor를 이용하여 부하 분담 시스템 및 DF Generator 3기에 동일한 출력이 가해지도록 모델링 하였다. 가상부하는 DF Generator 3기 사양의 가상부하를 연결하였고, 정격 출력에 대하여 시뮬레이션 결과와 출력값을 비교하였다. 그림 10 은 병렬 연결된 DF Generator의 동작 결과의 출력 그래프를 나타내고, 위에서부터 power (MW), frequency (Hz), field current (A), voltage (V)를 나타낸다. 출력 그래프에서 DF Generator의 출력값인 17.1 MW와 frequency 50 Hz, field current 14,250 A, voltage 1,200 V로 빠르게 안정화 되어 시뮬레이션 결과와 출력값이 일치하는 것을 확인 할 수 있다.

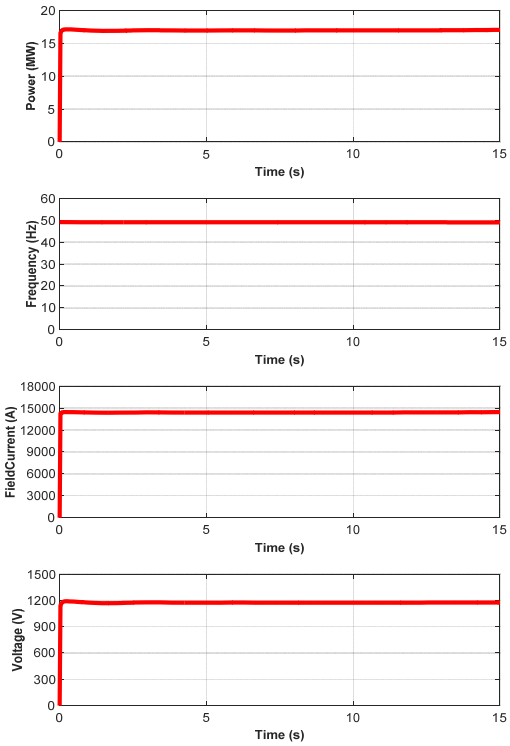

Fig. 10 DF(Dual Fuel) Generator Simulation Result

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 PMS(Power Management System) HILS(Hardware In the Loop Simulation) 가상 제어기 환경 구축을 위하여 DF(Dual Fuel) Generator를 모델링하고 전력 시뮬레이션 결과와 출력값 비교를 통해 모델링의 신뢰성을 검증하였다. 현재 조선해양 분야에서 HILS에 대한 규정이 없지만, 향후 고부가가치선박의 복잡도 증가로 HILS 검증의 요구가 증가할 것으로 판단되고, 본 논문에서 구현한 DF Generator와 실제 선박의 부하를 모델링하여 PMS에 대한 연구와 더 나아가서 실제 하드웨어와 연계한 HILS (Hardware In The Loop Simulation) 시스템 최적화 연구로 HILS 검증의 자립화가 가능할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Research Institute of Marine Systems Engineering and Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Education, Science and Technology (2016R1D11A1A099 18294, 2015 R1D1A1A010 60387).

REFERENCES

[1] International Marine Contractor's Association, "DP station keeping incidents," Incidents reported for 2010 IMCA M 218, 2012.

[2] K. K. Lee, J. S. Park, and S. H. Kim, "Hardware-In-the-Loop Simulation Technology for Productivity and Quality Improvement of Offshore Plant," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 52, no. 4, pp. 5- 10, Dec. 2015.

[3] T. O. Kim, and G. H. Kang, "HILS based PMS Testing of 30MW LNGC Electric Propulsion System," *Proceeding of the 45th the KIEE Summer Conference 2014*, vol. 7, pp. 1710-1711, July 2014.

[4] H. R. Park, I. S. Jeon, and C. J. Song, "A Design Method of the Simulation Program for HILS," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 435-440, Aug. 2013.

[5] Y. M. Kim, "Power Management System Modeling and Characteristics Analysis for Electric Propulsion Ship," Ms. D. dissertation, SungKyunkwan Univ., 2013.

[6] P. R. Crossley, and J. A. Cook, "A nonlinear engine model for drivetrain system development," *Control 1991. Control' 91., International Conference on*, vol. 2, pp. 921- 925, 1991.

[7] J. B. Ashok, S. Denis Ashok, and C. Ramesh Kumar, "LPG diesel dual fuel engine - A critical review," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 2, pp. 105-126, June 2015.

황준태(Joon-Tae Hwang)

2016년 서울대학교 조선해양공학과 (공학석사)
※관심분야 : PMS(Power Management System), HILS(Hardware In the Loop Simulation),

홍석윤(Suk-Yoon Hong)

1992년 펜실베이니아주립대학교 음향공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선해양, M&S, HILS

권현웅(Hyun-Wung Kwon)

2009년 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선해양, HILS

이광국(Kwang-Kook Lee)

2008년 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
※관심분야 : 조선IT, HILS, M&S, PLM

송지훈(Jee-Hun Song)

2007년 서울대학교 조선해양공학과 (공학박사)
※관심분야 : PMS(Power Management System), HILS(Hardware In the Loop Simulation),