



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

HILS를 이용한 함정 추진체계
검증 시뮬레이터 개발

The development of simulator for warship
propulsion system using HILS



指導教授 吳 珍 錫

2018年 2月

韓國海洋大學交 大學院

기 관 공 학 과
孫 那 榮

本 論 文 을 孫 邦 榮 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

委 員 長 柳 熙 漢



委 員 吳 珍 錫



委 員 蘇 明 玉



2017 年 12 月 27 日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	ix

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	4
1.3 연구 내용 및 구성	9

2. 함정 추진체계

2.1 함정 추진체계 종류	10
2.2 함정 추진체계 설계	12

3. 추진체계 장비 모델링 & 시뮬레이션

3.1 추진체계 모델링 & 시뮬레이션 개요	16
3.2 함정 모델	18
3.3 가스터빈 모델	23
3.4 전기추진전동기 모델	27
3.5 감속기어 및 클러치	29
3.6 가변피치 프로펠러	33

4. 추진체계 시뮬레이터	
4.1 시뮬레이터 구축	36
4.2 함정추진체계 운용모드	40
4.3 통합기관제어기	42
4.3.1 FPGA 모델	43
4.3.2 Telegraph 모델	45
4.3.2 Propulsion System 모델	47
5. 추진체계 시뮬레이션	
5.1 주 프로그램	52
5.2 가스터빈 자동모드	56
5.3 가스터빈 수동모드	58
5.3 전기추진전동기 자동모드	59
5.4 전기추진전동기 수동모드	60
5.5 Navigation Mode	61
6. 결 론	
참고문헌	66

List of Tables

Table 1	List of propulsion systems of the world naval ships	6
Table 2	List of propulsion systems of the korea naval ships	7
Table 3	Electric ship LBTS test result and improved security matters	8
Table 4	List of hybrid propulsion system	10
Table 5	Specification of FFX-II	19
Table 6	Type of resistance to hull	19
Table 7	System model	21
Table 8	MT30 specification	24
Table 9	Gas turbine model factors and coefficients	25
Table 10	Propulsion motor specification	27
Table 11	Controllable pitch propeller specification	34
Table 12	Propulsion system simulator hardware specification	37
Table 13	Propulsion system simulator architectures	43
Table 14	Propulsion system model	47
Table 15	Block diagram function	53
Table 16	Propulsion simulator data list	55

List of Figures

Fig. 1	Increasing electrical power demands	1
Fig. 2	The Navy' s next generation integrated power system roadmap illustrates plans regarding future technology development.....	2
Fig. 3	LBTS layout map for electric propulsion system	8
Fig. 4	Propulsion system abbreviation.....	10
Fig. 5	CODLOG Propulsion system	12
Fig. 6	Naval ship acquisition program R&D process.....	14
Fig. 7	Dynamic propulsion simulation, SEASTEMA	15
Fig. 8	Hardware in the loop simulation.....	16
Fig. 9	FFX-II(daegu class) multi-role frigates.....	18
Fig. 10	Black box model (system identification).....	21
Fig. 11	Ship speed - Demand power for the deal weight 3,500 ton.....	22
Fig. 12	Rolls-Royce MT30 gas-turbine.....	23
Fig. 13	Gas turbine power diagram.....	24
Fig. 14	Output according to gas turbine TIC value.....	26
Fig. 15	LabVIEW - Gas turbine model block diagram.....	26
Fig. 16	EPM power diagram.....	27
Fig. 17	LabVIEW - EPM model block diagram.....	28
Fig. 18	LabVIEW EPM internal controller model.....	28
Fig. 19	SSS-clutch.....	30
Fig. 20	LabVIEW - SSS-clutch model block diagram.....	31
Fig. 21	CPP characteristic curve.....	35
Fig. 22	LabVIEW CPP model block diagram.....	35
Fig. 23	Propulsion system simulator layout.....	36
Fig. 24	Propulsion system simulator - 1.....	37
Fig. 25	NI C-rio system configuration.....	38
Fig. 26	Propulsion system simulator - 2.....	39
Fig. 27	Propulsion system simulator propulsion mode.....	40
Fig. 28	Navigation - auto mode.....	41

Fig. 29	Navigation - Manual mode	41
Fig. 30	Telegraph - Ship speed graph	42
Fig. 31	Photo sensor pick the RPM	44
Fig. 32	GT motor RPM block diagram	44
Fig. 33	Hardware control lever	45
Fig. 34	Telegraph signal processing block diagram	46
Fig. 35	Telegraph signal processing result	47
Fig. 36	ECS Control flow	48
Fig. 37	Propulsion system power transmission	49
Fig. 38	Gas turbine auto mode RPM & CPP P/D	50
Fig. 39	Gas turbine auto mode vessel speed	51
Fig. 40	EPM auto mode RPM & CPP P/D	51
Fig. 41	Propulsion system simulator block diagram	53
Fig. 42	Propulsion system simulator front panel	54
Fig. 43	Host PC data saving program	55
Fig. 44	GT auto mode telegraph signal	56
Fig. 45	GT auto mode simulation results	56
Fig. 46	GT auto mode torque	57
Fig. 47	GT manual mode control signal	58
Fig. 48	GT manual mode RPM - Torque curve	58
Fig. 49	EPM auto mode Pitch - RPM - Torque curve	59
Fig. 50	EPM manual mode Pitch - RPM - Torque curve	60
Fig. 51	Propulsion system hybrid mode curve	61
Fig. 52	Hybrid mode propulsion machine RPM & clutch state	62
Fig. 53	Hybrid mode vessel speed	63

Nomenclatures

T	: 토크 [Nm]
w	: 각속도 [rad/sec]
n	: 속도 [rpm]
S	: 침수 표면적
D	: 배수량
k	: 기어비
n_g	: 가스터빈의 회전속도 [rpm]
n_p	: 프로펠러 회전속도 [rps]
e_r	: 감속기어 에너지 전달 효율
D	: 프로펠러 직경 [m]
ρ_w	: 해수 밀도 [kg/m ³]
n_o	: 프로펠러 효율
V_A	: 선체 전진속도
P_0	: 기준 피치
J	: 전진계수
K_T	: 프로펠러 추력 계수
K_Q	: 프로펠러 토크 계수
P/D	: 프로펠러의 피치와 직경의 비
P_p	: 프로펠러 출력 [kW]
Q_a	: 축에 설치된 발전기 토크 [Nm]
Q_e	: 엔진의 토크 [Nm]
Q_p	: 프로펠러 토크 [Nm]
R	: 선체 저항 [kgf]
R_f	: 마찰 저항 [kgf]
R_r	: 잉여 저항 [kgf]
R_n	: 레이놀드 수
T_p	: 추력 [N]
V	: 함속 [m/s]

MVDC	: Middle Voltage Direct Current
IPS	: Integrated Power System
PSI	: Propulsion System Integration
ECS	: Engineering Control System
RT	: Real Time
HILS	: Hardware In the Loop Simulation
LBTS	: Land Based Test Site
FREMM	: Frigate European Multi-Mission
HTS	: High Temperature Super conductor
CODOG	: COMbined Diesel Or Gas turbine
CODLOG	: COMbine Diesel-eLectric Or Gas turbine
COGAG	: COMbine Gas turbine And Gas turbine
IFEP	: Itegrated Full Electric Propulsion
PKG	: Patrol Killer Guided missile
ICAS	: Integration Condition Assessment System
ROC	: Requirement Of Concept
RFP	: Request For Proposal
CONOPS	: CONcept of OperationS
M&S	: Modelling & Simulation
ECU	: Engine Control Unit
EPM	: Electronic Propulsion Motor
FFX	: Future Frigate eXperimental
IHP	: Indicator Horse Power
SI	: System Identification
TIC	: Throttle Input Command
CPP	: Controllable Pitch Propeller
SSS clutch	: Synchro Self Shifting clutch
FPP	: Fixed Pitch Propeller
P/D	: Pitch/Diameter ratio
PMPM	: Permanent Magnet Propulsion Motor

The development of simulator for warship propulsion system using HILS

Son, Nayoung

Department of Division Marine Engineering
Graduate School, Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The electric power required for naval ships is increasing as the weapon systems mounted on naval ships are becoming more powerful. Accordingly, the propulsion systems of naval ships are evolving from mechanical to composite or electric systems. The control function becomes sophisticated when a propulsion motor is added to a simple mechanical propulsion system to create a composite propulsion system. In Korea, tasks, such as interlocking, control, test, and propulsion system integration of the propulsion engine, rely on foreign technologies because of insufficient experience in composite propulsion systems equipped with a propulsion motor. Therefore, we intend to develop herein a simulator that validates propulsion and maneuvering of naval ships to localize interlocking, controlling, and verifying technologies for the propulsion system of naval ships and secure their reliability.

The simulator comprises a propulsion equipment model that simulates the dynamic characteristics of a propulsion system, a control model that simulates the procedure, and a plant model that simulates an actual propulsion system. The propulsion equipment model is not suitable for real-time control if it is developed as a thermodynamic model because of the complicated formulas and process. This study solves this problem by selecting the factors affecting the power output of naval ships and developing a simplified propulsion equipment model.

The developed propulsion system simulator is used to simulate the navigation mode that can check the conversion procedure between the gas turbine and the propulsion motor and the power output and control/interlocking relations of the automatic and manual modes of the single propulsion equipment among the propulsion modes of naval ships.

The simulation results confirm that the errors between the actual data of the gas turbine and the propulsion motor and those of the propulsion equipment model were within 5% on average. Furthermore, the errors between the simulation result of the hardware plant model and the actual data were within 5% on average. Therefore, this simulation can be utilized to verify the system and check its performance prior to the building stage of a composite propulsion system in the future.

KEY WORDS : Warship, Propulsion system, Simulator, RT-HILS, M&S, Navigation

HILS를 이용한 함정 추진체계 검증 시뮬레이터 개발

손 나 영

Department of Division Marine Engineering
Graduate School, Korea Maritime and Ocean University

초 록

최근 함정에 탑재되는 무기체계가 고전력화 되어감에 따라 함정에 요구되는 전력이 증가함에 따라 함정의 추진체계는 기계식에서 복합식, 전기식으로 발달하고 있다. 단순한 기계식 추진체계에서 전기추진전동기를 복합하여 추진할 경우 제어 기능이 복잡해진다. 국내에서는 전기추진전동기를 탑재한 복합식 추진체계에 대한 경험의 부족으로 추진기관의 연동이나 제어, 시험 및 추진체계 연동통합 등의 업무를 국외의 기술에 의존하고 있다. 이에 함정 추진체계의 연동 기술 및 제어, 검증 기술을 국산화하고 신뢰성을 확보하기 위해 함정의 추진과 기동을 검증하는 시뮬레이터를 개발하고자 한다.

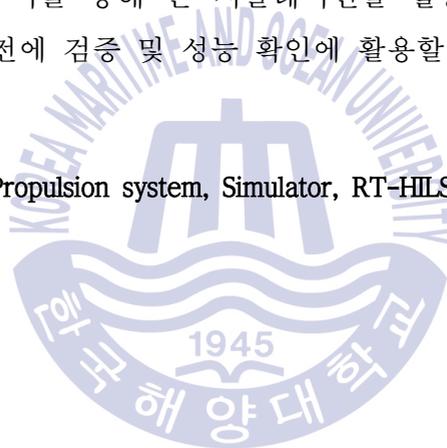
시뮬레이터는 추진체계의 동특성을 모사하는 추진 장비 모델과 절차를 모사하는 제어모델, 실제 추진체계를 모사하는 플랜트모델로 구성되어있다. 추진 장비 모델은 열역학 기반의 모델로 개발할 경우 복잡한 연산으로 인한 시간지연이 발생하여 실시간 제어에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는

이를 해결하기 위해 함정의 출력에 영향을 주는 인자를 선택하여 단순화된 추진 장비 모델을 개발하였다.

개발한 추진체계 시뮬레이터를 활용하여 함정의 추진모드 중에서 가스터빈과 전기추진전동기의 전환절차를 확인할 수 있는 복합(hybrid)모드와 단일 추진 장비에 대한 자동모드와 수동모드의 출력 및 제어연동관계에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션 결과, 가스터빈과 전기추진전동기의 실제 데이터와 추진 장비 모델 간의 오차는 평균 5% 이내의 오차를 가졌다. 또한, 하드웨어 플랜트 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 간의 오차는 평균 5% 이내의 오차를 가짐을 확인하였다. 이를 통해 본 시뮬레이션을 활용하여 추후 복합식 추진체계 건조 단계 이전에 검증 및 성능 확인에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

KEY WORDS : Warship, Propulsion system, Simulator, RT-HILS, M&S, Navigation



제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

해군의 전투력은 군함 이전에는 인간의 노동력으로 구성되었으나, 전함(battle ship) 시대에 이르러 무기체계는 화약을 이용한 체계로 변화되어왔다[1]. 그러나 근현대 이후 화약을 대신하여 미사일 기반의 무기체계를 갖추면서 이지스(aegis) 전투체계를 시작으로 전자장치를 이용한 무기체계로 변화되었다. 그림 1은 무기개발에 따른 소요 전력을 나타낸다.

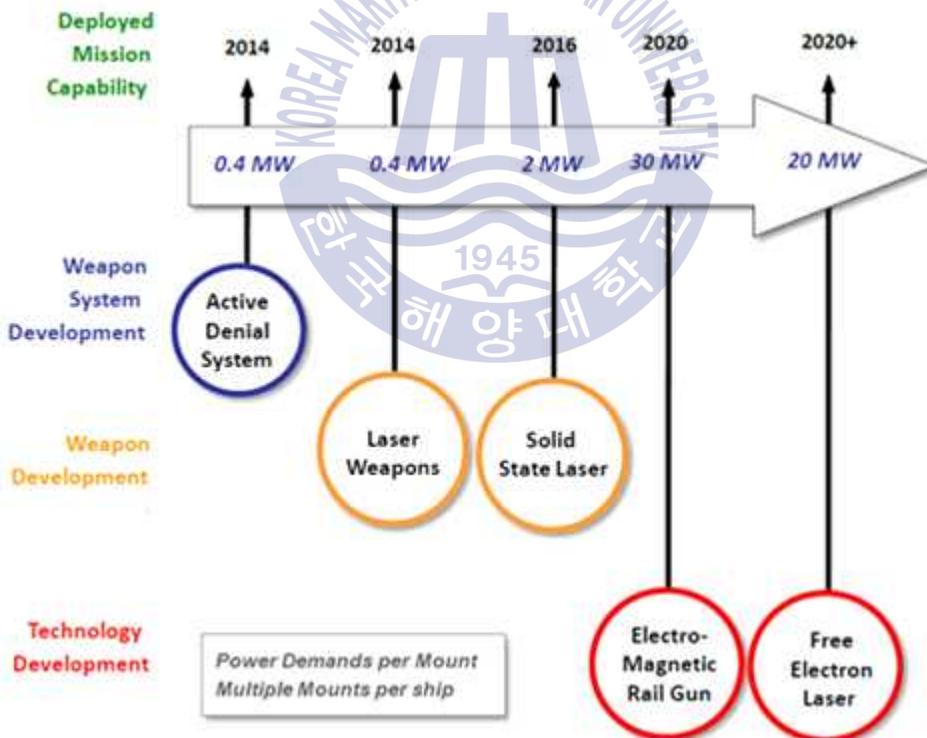


Fig. 1 Increasing electrical power demands [9]

이러한 변화는 기존의 화학무기 기반의 전투에 있어 기동성이 높은 함정이 생존성이 높기 때문에 함정의 최고 속도에 대한 요구가 높았으나 현대의 전투는 최첨단 탐지체계 및 전자 장비를 이용한 고성능 전자장비 및 대잠능력이 요구되어지기 때문이다[2].

미국 해군의 기술 개발 로드맵에 따르면 향후 10년간 주요 기술 개발 사항으로 고사양화 및 고전력 기반이 되어가는 무기와 센서를 지원할 수 있는 전력 인프라, 선박 전원 관리 컨트롤러, AC의 대안인 중전압 DC(MVDC, Middle Voltage Direct Current) 기술 등이 포함된다[3]. 그림 2는 해군의 기술 개발 로드맵을 나타낸다.

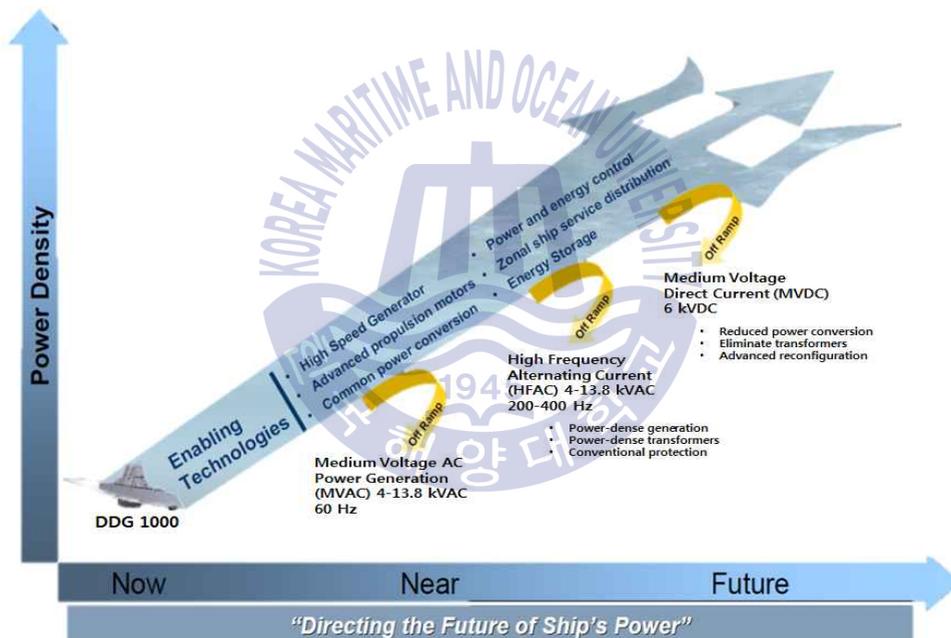


Fig. 2 The Navy's next generation integrated power system roadmap illustrates plans regarding future technology development [3]

미 해군의 차세대 해군 함정의 로드맵에 따르면 기존의 기계식 추진체계 기반에서 복합식 추진체계 이후, 통합전력시스템(IPS, Integrated Power System)

m)으로 변화될 예정이다. 이는 해군의 전투력이 함속 및 화약기반의 무기체계에서 나오는 것이 아니라 차세대 무장시스템의 소요전력이 증가함에 따라 필수적으로 통합전력시스템이 요구될 것으로 보인다[4]. 이에 전력변환산업 및 기술의 발전과 더불어 최근 건조되어지는 함정에 전기추진전동기(EPM, Electronic Propulsion Motor)를 이용한 복합식 추진체계 방식이 적용되어지고 있다[5,6]. 이러한 복합식 추진체계는 함정의 운용 목적에 따라 적절한 추진체계를 사용함으로써 기존의 기계식 추진체계에 비하여 대잠능력, 생존력 강화, 에너지 효율 향상 등을 기대할 수 있다. 그러나 복합식 추진체계는 기존의 기계식 추진체계에 비하여 설계 및 제작이 복잡하며 연동되는 장비의 수가 늘어남에 따라 연동에서 발생할 수 있는 문제 등에 대한 대처가 필요하다[7,8].

대한민국 해군은 현재 복합식 추진체계에 대한 기술력이 선진국에 비하여 약 75%정도의 기술력을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 추진동력원, 추진동력전달 기술은 각각 77%, 71% 수준으로 선진국과 격차가 다소 적은편이나, 추진제어 기술은 61%로 국내 개발능력 및 기술력이 선진국에 대비하여 많이 낮다[7]. 대한민국 해군에서도 현재 소수의 함정의 추진체계가 복합식으로 건조되고 있으나 복잡한 추진축계 해석, 장비 연동 제어 등의 기술력 부족으로 인하여 운항 중인 함정에서 다소 문제가 발생하고 있는 실정이며, 수리 및 유지보수에 어려움을 겪고 있다[10].

대한민국 해군의 경우 함정의 복합식 추진체계 적용이 확대될 전망으로, 관련 기술의 확보가 시급히 필요하다. 또한, 복합식 추진체계를 함정에 적용하는 과정에서 복합식 추진체계의 성능 향상 및 검증은 하나의 큰 문제로 남아 있다. 복합식 추진체계의 경우 기계식 추진체계에 비하여 구성이 복잡하며 함내 발전기를 추진시스템 및 함내 전력공급에 모두 사용해야 하는 어려움이 있기 때문에 신뢰성 및 기술 확보의 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 현재 복합식 추진체계에 대한 추진체계 연동통합 업무(PSI, Propulsion System Integration)에 대한 기술 및 함정의 통합기관제어장치(ECS,

Engineering Control System)의 기술 부족으로 인하여 해외에 의존하고 실정이다.

이러한 함정 건조의 핵심기술의 해외 의존은 국내 함정기술의 경쟁력을 약화시킬 뿐만 아니라 함정 건조 예산의 과대화, 함정 추진체계 관련 기밀 정보의 해외유출, 함정의 작전 성능의 해외 유출 등의 문제를 야기할 수 있다. 최근, 이러한 문제를 해결하기 위해 국내업체를 통한 PSI를 진행한 사례가 있으며 국산 ECS 개발을 위한 신뢰성 확보를 위한 연구 등을 진행 중에 있으나 아직 초기단계에 머물러 있는 단계이다.

미 해군 및 선진국의 경우 개발 함정에 대하여 수십여 척을 장기간 생산 함으로 많은 예산을 들여 RT-HILS (Real Time - Hardware In the Loop Simulation) 기반의 시뮬레이션 및 육상시험기지(LBTS, Land Based Test Site) 등의 활용 또는 시제선을 운영함으로써 함정의 추진체계를 검증하고 있으나 국내 해군의 경우 예산 및 환경의 여건상 검증과정에 많은 예산을 투입하기 어려운 실정이다.

이러한 문제로 국외 전문기관에 관련 업무를 위탁하여 진행하여 왔으나 해군 산업의 국산화 및 보안문제를 강화하기 위해 다른 대책이 필요하다. 이에 본 논문에서는 이를 해결하기 위해서 주요 추진 장비 모델링을 통한 RT기반의 HILS를 이용한 검증방안을 제안하고자 한다. HILS를 활용하여 함정의 출력 및 선체의 속도, 복합식 추진체계의 추진기 전환절차 등의 함정의 동특성을 구현하고 통합기관제어장치 제어기간의 연동특성을 확인함으로써 실제장비와의 연동 시 발생할 수 있는 문제점을 사전에 수정하여 비용과 시간을 절약하고자 한다.

1.2 연구 동향

국외 ECS 개발 전문업체인 이탈리아의 SEASTEMA에서는 ECS 개발 및 검증을 위한 HILS기반의 시뮬레이터를 2000년대 초반부터 개발하여 ECS 개발

에 활용하고 있다. SEASTEMA는 Fincatieri 조선소에서 만든 항공모함 Cavour와 FREMM(Frigate European Multi-Mission)급 함정의 ECS와 PSI 업무를 함께 수행하였다. ECS 개발과정에서 ECS의 신뢰성 확보 및 추후 ECS 개발을 위한 도구로 RT HILS 시뮬레이터를 개발하여 ECS의 개발과 검증을 수행하였다. ECS 시뮬레이터 개발은 FREMM 함정용으로 2005년도에 “Electrical simulation for FREMM program”을 개발하였으며, 2007년에 “Simulator of FREMM’ S propulsion system”을 개발하였다. SEASTEMA는 Genova 대학과 공동연구를 통하여 2000년부터 2017년까지 함정 추진체계 시뮬레이터 개발에 관한 논문 17편 게재하였으며 주요 논문으로 2009년 항공모함 Cavour을 대상으로 한 논문과 2011년 FREMM 함정을 대상으로 함정 추진체계용 시뮬레이터 개발과 모델링에 대한 논문을 들 수 있다[11,12].

최초 미 해군은 가스터빈 추진체계를 같은 새로운 함정 추진체계를 설계할 때 수명시험(Life Cycle Test) 및 새로운 장비 관련 교육을 시행하지 않았다. 그러나 점차적으로 복잡해지는 추진체계 및 함정 체계에 대하여 엔지니어링 관점에서 신뢰성 및 검증이 필요해짐에 따라 1970년도부터 LBTS의 적용 및 활용방안에 대하여 검토되어 왔다. 1974년도에 “Patrol frigate combat system”에 대한 LBTS가 구축되어 활용되어 왔으며, 최근 여러 분야 및 다양한 시스템에 LBTS를 적용해오고 있다. LBTS의 활용사례로 DDG-1000의 통합전력시스템 연구개발을 위해 설치된 설비, HTS(High Temperature Super) conductor Propulsion Motor 검증 및 전기식 추진체계를 검증하기 위한 LBTS를 구축하였다. 미 해군에서는 구축한 LBTS를 통하여 육상에 기초 기술을 확보하고 설계 및 건조 단계에서 발생하는 문제를 미리 분석하여 해결하고자 하였다[12].

위와 같이 LBTS의 구축 목적은 새로운 시스템 개발에 있어 설계단계 및 건조 단계에서 발생하는 문제를 미리 분석 및 파악하여 추후 발생할 수 있는 문제를 해결하는 목적으로 이용되어져 왔다. LBTS 구축을 통하여 충분한 연구 이후 미 해군에서는 새로운 시스템에 대한 선원들의 교육을 위해 활용

할 수 있도록 하였다. 이는 함정 승무원의 교육을 통하여 새로운 장비에 익숙해질 수 있도록 하며 장비의 유지 및 보수를 수행할 수 있도록 하였다.

기계식 추진체계에서 복합식 추진체계로 변화되는 과도기간을 거쳐 미국, 영국, 프랑스, 이탈리아 등 선진 해군을 중심으로 실전 배치되어 활용되어지고 있다. 표 1은 최근 건조된 해외 선진 해군 함정의 추진체계를 나타낸다.

Table 1 List of propulsion systems of the world naval ships

Platform	Nation	Displacement (tons)	Max. Speed (knots)	Propulsion system
FREMM (Bergamini Class)	ITALY	6,900	30	CODLAG 32MW*1 GT(LM2500) 2.5MW*2 EPM
FREMM (Aquitaine Class)	FRANCE	6,000	28	CODLOG 32MW*1 GT(LM2500) 2.5MW*2 EPM
Type 23	U.K	4,500	28	CODLAG 19.5MW*2 GT(LM2500) 1.5MW*2 EPM
Type 26	U.K.	6,900	26	CODLOG 40MW*1 GT(MT30) 3.9MW*4 EPM
F125	GERMANY	7,200	27	CODLOG 20MW*1 GT(LM2500) 4.7MW*2 EPM
LHD 8	U.S.A.	41,649	25	CODLOG 26MW*1 GT(LM2500) 3.7MW*2 EPM
Type 45	U.K.	8,500	30	IFEP 20MW*2 EPM
DD(X)	U.S.A.	14,564	30	IFEP 39MW*2 EPM
CVF	U.K.	70,600	26	IFEP 40MWx4 EPM

Platform	Nation	Displacement (tons)	Max. Speed (knots)	Propulsion system
T-AKE	U.S.A	45,149	20	IFEP -

최근 선진국들의 추진체계 변화 및 대잠능력에 대한 성능요구가 강화됨에 따라 국내에서도 최근 건조되거나 건조 예정인 함정에 대하여 복합식 추진체계를 선택하여 개발 및 건조하고 있으나 해외 선진국에 비해 경험 및 실적이 많이 부족한 상황이다. 표 2는 국내에서 복합식 추진체계가 적용된 함정을 나타낸다.

Table 2 List of propulsion systems of the korea naval ships

Platform	Nation	Displacement (tons)	Max.Speed (knots)	Propulsion system
FFX-I	KOREA	3,100	30	CODOG 2 GT(LM2500) 2 DE(MTU)
FFX-II	KOREA	3,600	30	CODLOG 40MWx1 GT(MT30) 2 EPM
DDG-993	KOREA	7,650	30	COGAG 4 GT(LM2500)

해외 선진국과의 기술격차를 줄이고 보다 신뢰성 높은 해군함정을 건조하기 위해 국내에서는 한국전기연구원에서 세계 3번째 ‘전기 선박 육상시험소’를 창원시에 준공하여 운영하고 있다. 전기 선박 육상시험소는 국산 잠수함 개발을 위해 전기추진체계의 육상통합성능시험설비의 필요성과 고부가 전기추진선박의 핵심기술 개발 등의 목적으로 구축하였다.

육상시험설비를 이용하여 전기추진의 운전성능 및 가혹조건 성능실험을 진행하여 추진체계의 주요장비의 통합성능 사전확인, 운용 시나리오 별 운전성능 확인, 기술적 위험요소, 장비 간 연동 문제점을 분석한다. 분석된 문제점들은 사전식별 및 대책수립 등에 사용하여 개발하고자 하는 잠수함의

건조 안전에 고장 및 비상상황에 대한 시험수행을 담당하고 있다. 표 3은 L BTS를 통한 시험수행 결과를 나타내며, 그림 3은 국내 전기 함정 LBTS 배치도를 나타낸다.

Table 3 Electric ship LBTS test result and improved security matters

	시험완료항목	개선보완사항 식별 및 반영여부		
		식별된 개선보완사항	함반영 필요	함반영 불필요
장비(계통)작동시험	112항목	27건	20건	7건
장비 간 연동시험	48항목	46건	33건	13건
통합연동시험	71항목	52건	41건	11건
계	231항목	125건	94건	31건



Fig. 3 LBTS layout map for electric propulsion system

장보고함-III의 경우 LBTS를 통하여 선도함을 건조할 경우 발생할 수 있는 조치내용을 금액으로 환산할 경우 약 4,600억원의 효과를 볼 수 있는 것으로 보인다. 이는 투자비 대비 약 11배 이상으로 추후 더 많은 기대효과를 기대할 수 있다.

국내 함정의 경우 동형함의 건조수가 적어 시험용 선도함을 구축하기 어렵다. 이러한 상황에서 HILS나 LBTS를 활용한 추진체계 검증은 진행할 경우

육상 및 해상 시운전 이전에 발생할 수 있는 문제점에 대한 개선사항을 미리 조치할 수 있어, 인적 및 물적 손실을 최소화 할 수 있으며 국산화 기술력 확보 등으로 지속적인 성능향상 연구가 가능하다.

1.3 연구 내용 및 구성

본 논문에서는 복합식 추진체계 함정의 건조에 있어 복합식 추진체계의 적용으로 발생할 수 있는 문제점을 사전에 분석 및 검증하기 위한 추진체계 시뮬레이션 개발 방안을 연구한다.

본 논문은 총 6장으로 구성되어 있으며 각 장의 내용은 다음과 같다.

제 1 장에서는 복합식 추진체계의 필요성과 복합식 추진체계의 검증방안에 대한 국내·외 연구 사례 등에 대하여 기술한다.

제 2 장에서는 함정의 복합식 추진체계의 종류와 함정 추진체계 설계과정에 대하여 기술한다.

제 3 장에서는 주요 추진 장비에 대하여 시뮬레이션 모델을 개발하기 위한 방법과 모델링을 통한 추진 장비의 기본모델에 대해 기술한다.

제 4 장에서는 제 3 장에서 개발한 시뮬레이션과 하드웨어 장비를 이용한 시뮬레이터의 연동 방안 및 연동 특성에 대하여 기술한다.

제 5 장에서는 개발한 추진 장비 모델을 이용하여 대상 함정에 적용한 함정의 특성에 대한 실험 결과에 대하여 기술한다.

제 6 장에서는 추진체계 시뮬레이션 결과를 토대로 추후 활용방안에 대하여 기술한다.

제 2 장 함정 추진체계

2.1 함정 추진체계 종류

함정의 추진체계는 추진기관의 조합에 따라 다양하다. 기계식 추진계통인 가스터빈이나 디젤엔진 중 하나의 추진시스템으로만 이루어진 것을 단일 추진체계, 기계식 추진계통의 두 종류를 복합하여 사용하거나 기계식 추진장치와 전기식 추진장치를 혼용하여 이루어진 것을 복합식 추진체계, 주 추진기관으로 다수의 발전기를 이용하여 전기식 추진장치로 동력을 발생시키는 추진체계를 완전전기추진체계라고 일컫는다. 그림 4는 추진장치의 활용방법에 따른 추진체계 명칭을 부여하는 방법을 나타낸다.

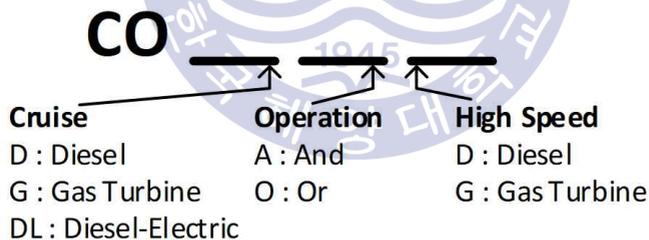


Fig. 4 Propulsion system abbreviation

함정의 복합식 추진체계는 추진체계의 구성에 따라 크게 6가지로 분류할 수 있다. 표 4는 복합식 추진체계의 종류를 나타내며, 전기식 추진장치는 디젤엔진 발전기를 이용하여 동력을 발생시킨다.

Table 4 List of hybrid propulsion system

복합식 추진체계	추진 기관
CODOG(COmbined Diesel engine Or Gas turbine)	디젤엔진, 가스터빈
CODAD(COmbined Diesel engine And Gas turbine)	디젤엔진, 가스터빈
COGAG(COmbined Gas turbine And Gas turbine)	가스터빈, 가스터빈
CODAD(COmbined Diesel engine And Diesel engine)	디젤엔진, 가스터빈
CODLAG(COmbined Diesel-eLectric And Gas turbine)	가스터빈, 전기추진전동기
CODLOG(COmbined Diesel-eLectric Or Gas turbine)	가스터빈, 전기추진전동기

기존의 화학무기 기반의 전투에 있어, 기동성이 높은 함정은 생존성 또한 높아지기 때문에 함정의 최고 속도에 대한 요구가 높았다. 하지만 현대의 전투에서는 최첨단 탐지체계를 이용하며, 수많은 전자 장비로 전투를 수행하므로 적에게 발각될 위험을 낮추는 대잠능력 및 정속성이 함정의 속도만큼 중요하게 되었다[13]. 이에 따라 과거의 함정에 비해 탑재되는 첨단장비의 소요 전력이 높아짐에 따라 여유전력 확보 및 대잠능력 향상을 위한 함정의 소음 저감 등의 문제를 해결하기 위해 전기추진전동기를 탑재한 복합식 추진체계에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

이러한 전기추진전동기를 탑재한 복합식 추진체계는 함정의 작전상황과 운항 속도에 따라 선택적으로 추진기를 운용함으로써 함정을 다목적으로 사용가능하다. 전기추진전동기를 활용함으로써 대잠능력 강화 및 저속에서의 운항 연료 절감을 기대할 수 있으며, 대함 및 대공을 목표로 하는 전투 작전 시 가스터빈 또는 디젤엔진을 구동하며 전기추진전동기에 소비되던 전력을 함내 전력으로 사용함으로써 보다 높은 전력을 소비하는 첨단장비에 안정적으로 전력공급이 가능하다.

본 연구에서는 세계적인 함정 복합식 추진체계 적용 사례 및 추세에 따라 CODLOG 추진체계를 기반으로 주요 추진 장비의 모델링 및 시뮬레이션을 진행한다. 그림 5는 시뮬레이션 대상 함정의 주요 추진 장비 구성을 나타내

며, 추진기관용 가스터빈 1대, 전기추진전동기 2대, 클러치 2대, 가변피치프로펠러 2대로 구성된다.

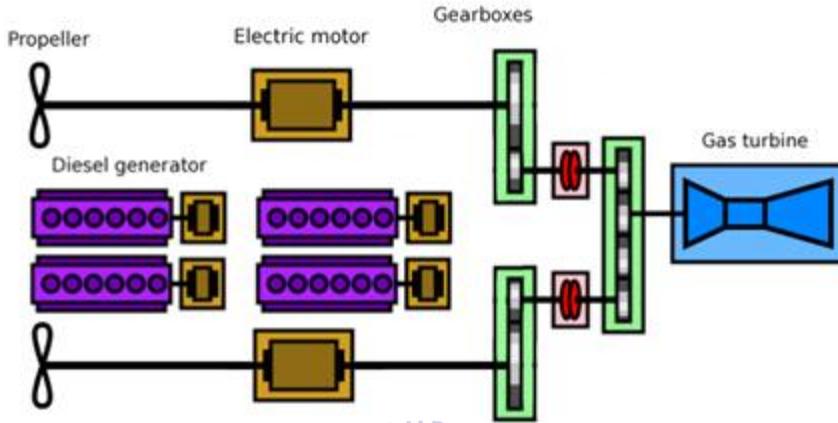


Fig. 5 CODLOG Propulsion system

2.2 함정 추진체계 설계

국내에선 복합식 추진체계 설계에 대한 경험 및 사례가 외국에 비하여 매우 부족하다. 이러한 이유로 함정의 경우 국외 함정의 설계도를 바탕으로 제작하거나 주요 설계 단계인 PSI 업무를 해외 전문기업에 외주를 통하여 의존하고 있는 단계이다. 특히 복합식 추진체계는 기계식 추진체계에 비하여 추진체계의 구성 및 제어가 복잡하여 문제가 발생한 사례가 있으며 이러한 주요 장비 및 기술의 해외의존은 국내 기술의 경쟁력 약화로 이어질 수 있다.

국내 기술력 부족으로 인한 사례를 분석하면 PKG(Patrol Killer Guided) missile 사업 당시 PSI 업무를 ECS 장비개발 업체의 업무내용에 포함하여 추진을 진행하면서 국내 ECS 기술 협력생산업체가 국외 전문업체와 사전에 기

술이전 계약을 명확히 하지 않고 사업을 진행함으로 인해 추진체계장비 연동에 대한 기술적 검토가 진행되지 않은 채로 진행된 사례가 있다. 이로 인하여 디젤엔진 감속기어부분에 진동으로 인한 문제가 발생하였으나 함정 건조 이후 시운전시 문제가 발견됨에 따라 장비교체 및 수리의 한계로 인하여 임기응변식으로 탄성 마운트를 교체하여 함정이 운항 중인 것으로 파악되고 있다.

또한 복합식 추진체계의 변화는 운영체계의 제어방식이 디지털화로 변화되면서 함정의 건조 및 운항 중 발생한 문제점에 대한 기술적, 경험적 바탕이 부족하여 문제 해결에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 사례로 현대중공업이 건조한 DDG(Guided Missile Destroyer)함정의 경우 ECS 제작사가 PSI 업무를 같이 수행하면서 통합조건평가계통(ICAS, Integration Condition Assessment System) 구현 시 관급장비 연동 등 문제가 발생하였으나 PSI를 ECS 제작사에서 주관하다보니 추진체계 장비 제작사간 통합에 따른 이견 발생 시 중재가 어려워 문제 해결에 곤란함을 겪었다.

이러한 함정의 문제점은 해외기술의 의존과 추진체계 설계당시 충분한 검토가 이루어지지 않은 상태에서 진행함으로써 발생하였다. 함정 건조사업의 추진절차를 보면 선행연구단계인 개념설계 이후 해군의 요구사항에 따른 ROC(Requirement of Concept)를 설정하고 이를 기반으로 작성된 함정건조 기본지침서에 따라 탐색개발단계인 기본설계에서 장비사양을 결정하게 된다. 이를 기반으로 함정건조기술사양서 확정 후 함정건조기술사양서에 따라 체계개발 상세설계를 수행된다[14]. 즉, 기본설계 이후 결정된 장비 사양에 대하여 설계 및 장비 변경은 현실상 불가능하다. 더불어 함정을 건조하는 조선소는 ROC에 명시된 사항을 자의적으로 해석하여 조선소에 유리한 업체를 선정하고 있는 실정이다. 이는 함정의 설계 및 건조 과정에 검증할 마땅한 방법이 없는 상태로 진행되어지고 있음을 뜻한다.

일반적으로 함정 건조는 기본설계 초기단계에서 장비의 사양이 제시되어 설계검토회의를 거쳐 장비에 대한 제안요청서(RFP, Request for Proposal)가

작성되어 기본설계 단계에서 장비의 사양 검토 후 확정된다. 그러나 위에서 언급한 것과 같이 추진체계 통합 업무를 조선소의 판단아래 수행되기 이전에 설계 검증을 통하여 함정의 최고의 성능을 내기위한 운용효율 및 작전능력을 결정하는 운용개념서(CONOPS, CONcept of OperationS) 구성이 함께 검토되어야 한다. 함정의 설계 절차는 아래 그림 6과 같다.



Fig. 6 Naval ship acquisition program R&D process [15]

함정 건조 후 연동의 문제나 최고 속도 미달 등의 문제가 발생하여 해결하려면, 무기체계와 함정의 건조가 같이 이루어지는 함정의 경우 많은 시간이 소요되고, 장비 교체 비용 등 금전적인 손실이 발생한다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 복합식 추진체계 검증용 시뮬레이션은 기본설계 단계에서 활용하여 함정의 건조 중 또는 건조 후 발생할 수 있는 문제점을 사전에 분석 및 해결방안을 확보하는 것이 중요하다. 해외 유사 사례로 이탈리아의 Genoa대학에서는 SEATEMA와 이탈리아의 항공모함 Cavour와 다목적 호위함인 FREMM에 추진 시스템을 시뮬레이션하는 연구가 진행되어 왔다. 또한, ABB에서는 해군 함정 추진 시스템의 설계 방법론에 ‘함정 수치 시뮬레이션’을 도입하는 등 실제 함정의 추진과 기동을 검증하고 설계하는데 이용하고 있다[12].

그림 7은 SEATEMA에서 사용 중인 dynamic propulsion simulation의 예시이며, 전체 시스템의 동적 특성을 조사한다. slam start나 crash stop 등과 같은 추진 장비의 동적 특성을 최적화하여 장비의 작동 한계를 검증하는 데 이용된다.

SHIP SPEED

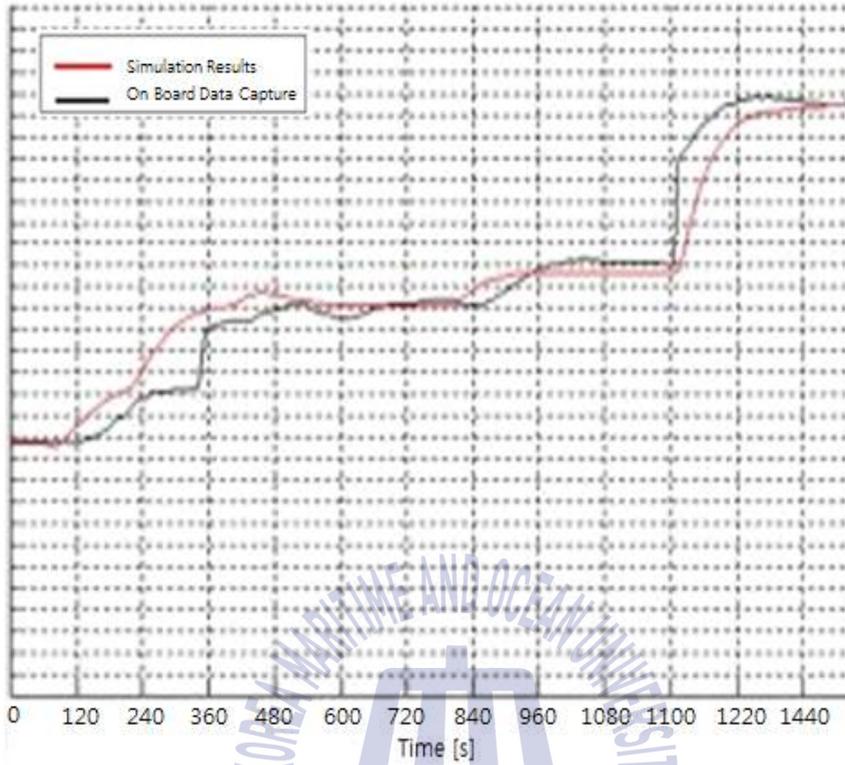


Fig. 7 Dynamic propulsion simulation, SEASTEMA[16]

제 3 장 추진체계 장비 모델링 및 시뮬레이션

3.1 추진체계 모델링 및 시뮬레이션 개요

국내에선 조선·해양플랜트산업 분야에서 M&S(Modelling & Simulation)를 활용한 HILS 적용 사례는 극히 드무나, 가상의 운용 환경을 구축하고 시뮬레이션으로 제어시스템의 검증 및 테스트를 통해 제어 시스템의 성능을 평가하는 실시간 시뮬레이션 기반의 해석 기법으로 여러 분야에 현재 적용되어 사용되어지고 있다. 또한 이러한 M&S기반의 HIL 시스템은 복잡한 모델을 실시간 해석할 수 있는 컴퓨터 성능의 발전에 따라 산업 분야에 확대되어 사용된다. 특히 국내에선 이미 자동차 분야에서는 전자장치(ECU, Engine Control Unit)를 개발하는 과정에서 컨트롤러 시스템과 배터리, 엔진, 차량 동역학, 전기 구동부나 ECU 네트워크를 시험하는데 있어 HILS가 핵심적인 과정에 포함되어 개발되어진다. 그림 8은 자동차 분야의 HILS 구성을 나타내며, 본 논문에서도 이와 같은 구성을 적용한다.

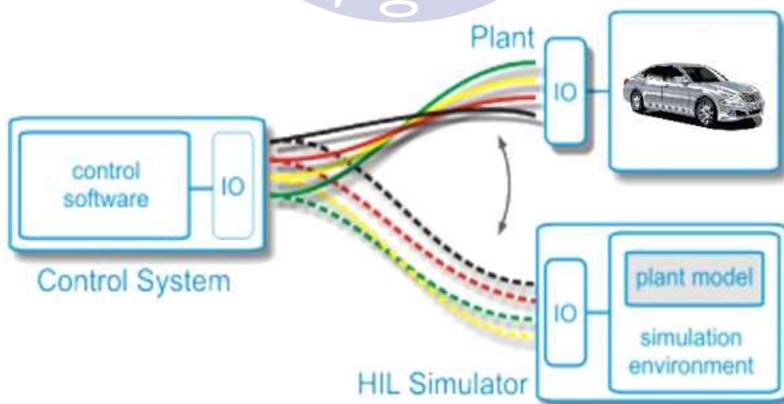


Fig. 8 Hardware in the loop simulation[17]

해외 주요 자동차 제조사인 포르쉐나 BMW, 아우디 등은 자체 HILS 시스템을 구축하여 엔진 전자제어장치나 자동긴급제동시스템 등 자동차에 들어가는 주요 장비 및 기능에 대하여 HILS 장비를 통해 안정성 시험 및 확보한다[18]. HILS는 실제 환경에서 시험하기 어려운 분야인 자동차뿐만 아니라 항공우주, 선박, 무기 등에서도 활발하게 적용되고 있으며, 그 규모는 2013년 1800억~2000억 규모의 HILS 장비 해외시장이 2015년 기준 2500억원으로 증가하였고, 국내 시장도 매년 증가하고 있다[19].

HILS 시스템 없이 실제 함정에서 컨트롤러의 시험이 이루어진다면, 함정의 전반적인 시스템을 운영해야 하기 때문에 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 많은 비용이 소비된다[20]. 또한 실제 함정에서의 시험은 반복 테스트가 어렵고 악조건을 발생시키기 어려워 문제점을 발견하기 어렵다. HILS 시스템은 테스트벤치 단계에서 실제 테스트 환경을 구현한 모델을 사용함으로써 비용과 시간을 절약하고, 설계 변경 시에도 적은 비용으로 교체할 수 있으며, 가상의 환경에서 개발된 컨트롤러를 테스트하여 프로젝트 초기에 문제를 식별하고 해결함으로써 초기에 재설계를 가능하게 한다. 함정에 HILS를 적용한 예로 중국의 Wuhan 대학교에서 전기추진 시스템을 대상으로 하여 HILS를 구성한 연구가 활발히 진행 중이며[21], 이탈리아의 Genoa대학과 이탈리아 해군에서 공동 개발 연구하여 진행된 항공모함 Cavour COGAG 추진체계 시스템에서도 RT-HILS개념을 사용하여 함정의 추진시스템을 시뮬레이션 하였다[22]. 이를 토대로 추후 SEASTEMA와 해군, 대학이 함께 FREMM의 CODLAG 추진체계시스템도 적용하여 함정 추진의 동적 모델 개발 후 제어체계를 개발하여 RT-HILS을 활용하여 해상 시운전 전에 컨트롤러의 매개변수를 조정하여, 개발 단계를 단축시켰다[23].

HILS는 크게 3단계로 나눌 수 있다. 첫 단계에서는 해군의 요구 사항 및 기술 사양 분석을 통해 만들어진 시뮬레이터는 추진 시스템의 동작에 대한 이해도를 높인다. 두 번째 단계에서는 여러 로직을 통한 시뮬레이션 결과를 분석하여 사용자가 원하는 성능을 얻을 수 있도록 조정한다. 세 번째 단계

에서는 지연시간을 제외한 실시간기반의 운영체제에서 시뮬레이션하여 발생하는 오류를 조정한다[20]. 반복적이고 점증적으로 검증함에 따라 결함을 조기에 발견하여 비용과 일정은 단축시키면서 품질 높은 시뮬레이터를 개발할 수 있다.

3.2 함정 모델

본 논문에서는 CODLOG 추진체계를 갖춘 함정의 추진체계 검증을 위한 시뮬레이션 개발을 위해 실제 함정을 바탕으로 대상함정을 설정하였다. 대상함정은 대구급 호위함은 FFX(Future Frigate eXperimental)함을 대상으로 하였으며, 추진체계는 ROC에 따른 최고속도를 바탕으로 임의의 CODLOG 추진체계 갖도록 선정하였다. 그림 9와 표 5에 나타난 대구급 호위함 FFX-II는 본 논문에서 개발하고자 하는 CODLOG 추진체계를 갖추고 있으며 가스 터빈 1대와 전기추진전동기 2대로 구성되어져 있다.



Fig. 9 FFX-II(daegu class) multi-role frigates[24]

Table 5 Specification of FFX-III[26]

Figure		
Type		FFX-Batch II
Displacement	Full	3,592 ton
	Light	2,800 ton
Max. Speed		30 knot(55.5km/h)
Propulsion	Gas turbine	롤스로이스 MT30 1EA
	Propulsion Motor	unknown 2EA

함정의 출력은 선속과 연관되어 있으며, 선체의 마찰저항, 속도, 배수량 등에 영향 등을 고려하여야 선속을 계산할 수 있다. 특히, 함정이 해상상태가 호수와 같이 잔잔한 해상상태인 ‘0’ 이라 가정하였을 때 함정이 받는 저항성분은 아래 표 6과같이 크게 4가지 성분으로 나타낼 수 있다[25].

Table 6 Type of resistance to hull

저항의 종류	설명
마찰저항	물과 선체표면이 접촉하게 됨으로써 발생하는 저항 성분. 실험에 따르면 저속선의 경우 전체저항의 80~85%에 달하며 고속선의 경우 50%에 달한다.
조파저항	선박이 진행함에 따라 수면상에 형성된 파계가 유지되도록 선체에 지속적해서 공급되어야 하는 에너지로 인한 저항
와류저항	선체의 형상이 급격히 변하는 경우 물이 선체 표면을 따라 흐르지 못하게 되어 형성되는 소용돌이와 같은 유동에 의한 저항
공기저항	수면 상에 노출된 선체 외 선루가 공기 중에 움직이게 되므로 인하여 발생하는 저항

위 저항성분 중 조파저항과 와류저항을 합하여 통상 잉여저항(residuary resistance)라고 부르며, 공기저항은 마찰저항과 잉여저항에 비하여 극히 적

기 때문에 본 논문에서는 무시한다.

함정의 경우 운항속도가 빠를수록 선체에 영향을 미치는 마찰저항[R_f]이 급격하게 증가하게 된다. Froude 상사법칙 및 Reynold 상사법칙에 따르면 선체가 받는 마찰저항은 아래 식 (1)을 통하여 식 (2)와 같은 비례 관계를 나타낼 수 있다[25].

$$R_f = \frac{1}{2} \times f \times S \times V^{1.825} [lbs] \quad (1)$$

(f : 실험 계수, S : 침수표면적, V : 속도)

$$\therefore R_f \propto S \times V^2 \quad (2)$$

즉, 함정의 마찰저항은 선속의 약 거듭제곱에 비례하여 높아짐을 알 수 있다. 또한, 침수표면적[S]의 경우 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S \propto D^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

(D : 배수량)

여기서 함정의 지시마력(IHP, Indicated Horse Power)과 속도의 관계를 구하면 아래 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$IHP \propto R_f V \propto D^{\frac{2}{3}} V^3 \quad (4)$$

위 식(4)에서 배수량이 일정하다고 가정을 하였을 시, 지시마력은 함정의 속도의 3제곱에 비례함을 알 수 있다. 또한 실제로 운항중인 함정의 동력 공급을 중단하면 그 배는 자신의 길이의 약 40배 이상의 거리를 지나서 정지하게 된다. 즉, 그 배는 해수 및 자가 속도에 의해 저항을 받는다는 의미

이며 지속적으로 속도를 내기위해선 함정의 저항이상의 추진력을 공급받아야 가능하다.

함정을 모델링하기 위한 함정의 모든 동특성을 모델링하는 것은 자료의 확보 및 보안상의 문제로 어려움이 있다. 하지만 시스템 전체의 경향성과 대략적인 동적모델을 확인하고자 하면 함정의 동특성을 시스템 동정(System Identification, SI)을 통해 비교적 간략히 구할 수 있다. 표 7에서 black box 모델과 같이 입력과 출력과의 관계를 명확히 알 수 없을 때 시스템 동정을 활용하여 전달함수를 추출하여 모델링을 진행한다.

Table 7 System model

모델의 종류	설명
White box model	모델이 물리법칙으로 표현이 가능한 수준이며, 시스템의 변수도 모두 아는 모델
Gray box model	어느 정도 물리법칙으로 표현이 가능하며, 변수도 비교적 어느 정도 알고 있는 모델
Black box model	모델이 물리법칙으로 표현이 어려울 정도로 변수 및 정보가 없는 모델

위 설명과 같이 시스템 동정은 black box 모델의 입력과 출력의 데이터를 기반으로 동적 시스템의 수학적인 모델을 구한다. 그림 10과 같이 SI기법을 통한 모델은 입력($u(k)$)과 출력 $y(k)$ 데이터를 통해 출력 응답으로 분석할 수 있으며, 시간 영역에서 분석하여 모델을 알아 낼 수 있다.



Fig. 10 Black box model (system identification)

특히 시간 영역에서 분석하는 방법은 임의의 입력에 대한 출력값이 나오게 되는데, 실제 데이터와 유사한 출력이 나올 수 있게 전달함수를 찾을 수 있다. 이렇게 구한 전달함수를 통하여 대상 모델의 동적 특성을 파악할 수 있으며, 얻어낸 모델을 기반으로 제어기를 설계하기 때문에 정확하고 다양한 범위 내에서 실제 물리 현상과 맞춰가며 모델을 구현하여야 한다. 아래 그림 11은 일반적인 만재배수량 3,500[ton]급 함정에 대한 속도와 필요 출력에 대한 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

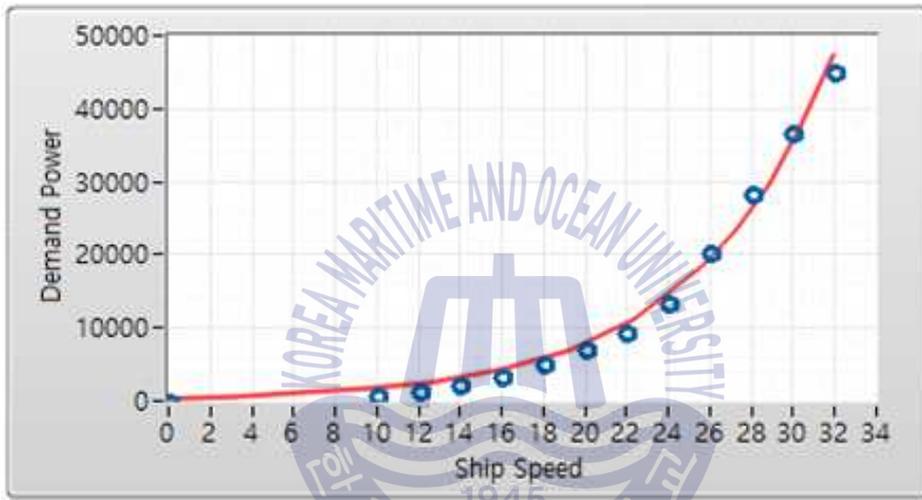


Fig. 11 Ship speed - Demand power for the deal weight 3,500 ton

본 논문에서 시뮬레이션 하고자 하는 함정의 platform은 FFX Batch-II를 대상함정으로 하여, 최대출력 약 35,000[kW]에서 ROC의 최대 속도 30[knot] 이상이 나오도록 함정 모델을 설계하였다.

3.3 가스터빈 모델

본 논문에서 사용하는 가스터빈 모델은 국내 해군 함정에 적용되는 GE(General Energy)社의 LM-2500과 RR(Rolls-Royce)社의 MT30 중 MT30을 대상으로 가스터빈 모델을 선정하였다. 현재 배치되어 운영 중인 FFX Batch-II 함정의 경우와 동일한 가스터빈을 사용함으로 보다 실제함정과 유사한 모델 개발 및 시뮬레이션을 위해 선정하였다.

가스터빈은 최대 3,600[RPM]에서 약 40[MW]의 출력을 내며, 항공기 및 선박에 다양하게 적용되어지고 있다[26]. 또한 40[MW]의 출력은 대함 함정의 최대 속도에 필요한 충분한 출력을 갖추므로 본 시뮬레이션에 적합하다. 그림 12는 본 논문에서 시뮬레이션 대상이 된 롤스로이스사의 가스터빈 MT30의 그림이며, 표 8은 가스터빈의 기본 사양을 나타낸다.

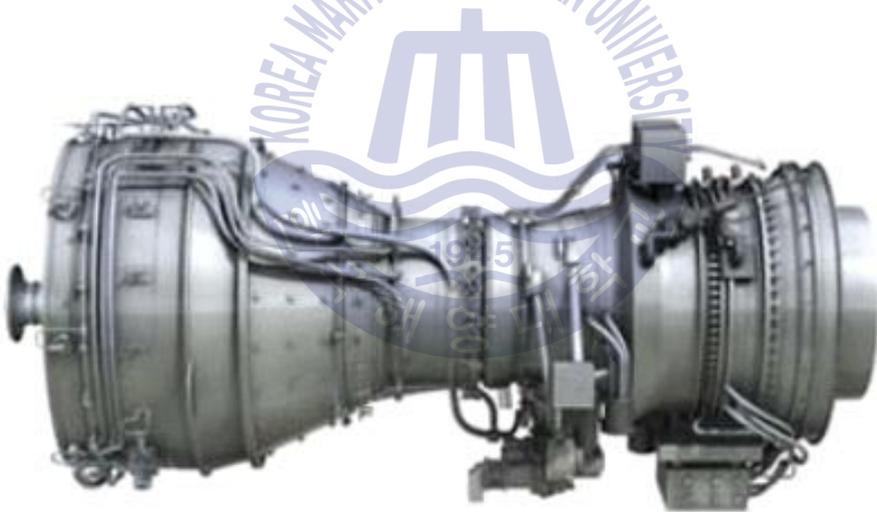


Fig. 12 Rolls-Royce MT30 gas-turbine

Table 8 MT30 specification

Name	Specification
Name	MT3040
Structure	2 Gas generator(GG) 1 Power turbine(PT)
MCR (Maximum Continuous Rating)	40[MW] at 3,600 [rpm] (Idle : 900~1,100 [rpm])

가스터빈을 안정적으로 운영하기 위해선 가스터빈의 기계적 모델, 가스터빈 내부 제어기 모델, 가스터빈을 제어하기 위한 외부제어기 ECS모델이 필요로 한다.

가스터빈 제어기 모델은 ECS로부터 내려오는 TIC(Throttle Input Command)의 입력신호에 따라 가스터빈의 Throttle 교축부의 개도를 제어하여 가스터빈의 출력을 변화시키게 된다. 이러한 가스터빈의 출력은 함정 모델 및 함정의 가변피치프로펠러(CPP, Controllable Pitch Propeller)의 P/D(Pitch/Diameter ratio)값에 따라 축토크[kNm] 및 축회전수[rpm]을 도출한다. 즉, 함정의 축회전수와 축토크에 영향을 미치는 인자로 TIC값에 따른 가스터빈의 출력과 함정의 CPP pitch값이 있다. 본 논문에서는 함정의 출력-토크-회전수의 관계와 가스터빈의 회전수-토크 관계 및 임의의 가스터빈 내부 PID제어기를 이용하여 가스터빈모델을 개발하였다. 가스터빈의 출력 관계도 및 변수는 아래 그림 13과 표 9에 나타내었다.

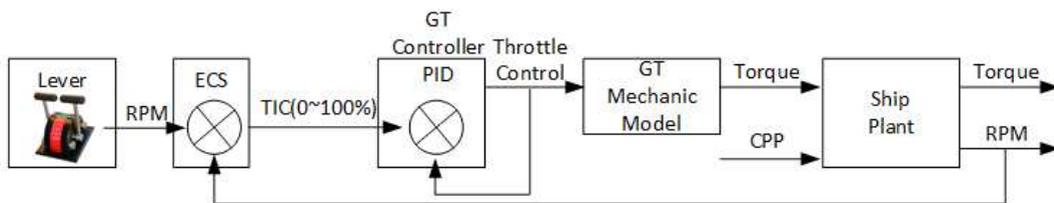


Fig. 13 Gas turbine power diagram

Table 9 Gas turbine model factors and coefficients

Input factors		Output factors	
ECS power demand	0~100 [%]	External power	0~40 [MW]
Internal power demand	0~40 [MW]	Shaft torque	0~500 [kNm]
Feedback power	0~40 [MW]	GT RPM	0~3,500 [rpm]
Feedback GT rpm	0~3,500 [rpm]		
CPP P/D	0~100 [%]		
Gas turbine model coefficients			
Ship's torque coefficient according to pitch			
Ship's torque coefficient according to RPM			
Ship's torque coefficient according to ship speed			

가스터빈은 TIC값에 따른 요구되는 출력값에 따라 파워터빈의 축속도, 토크, 출력을 낸다. 가스터빈의 출력-축속도-토크의 관계는 기본 토크와 출력, 각속도 식 (5)로부터 변환되어, 식 (6) [kW] 단위로 환산되어 사용되었다.

$$\begin{aligned}
 P[W] &= T[Nm] \times w[rad/sec] & (5) \\
 &= T[Nm] \times n[rpm] \times \frac{2\pi}{60} \\
 &= \frac{T[Nm] \times n[rpm]}{9.549}
 \end{aligned}$$

$$P[kW] = \frac{T[Nm] \times n[rpm]}{9549} \quad (6)$$

그림 14는 가스터빈 TIC 값에 따른 출력을 나타낸 그래프이며, 그림 14와 식 (6)을 활용하여 가스터빈 TIC 값의 변화에 따른 지연 PID제어기를 설계하여 토크 및 축회전수, 출력을 나타내는 가스터빈 모델을 개발하였다.

그림 15는 그림 14와 식 (6)을 바탕으로 개발된 가스터빈 모델 블록다이어그램이며, 토크는 GT에서 발생하는 토크와 프로펠러 피치각에 의해 발생하는 토크를 고려하여 수식화한 모델이다. 그림 15에서 상수 15.54는 기어비를 나타낸다.

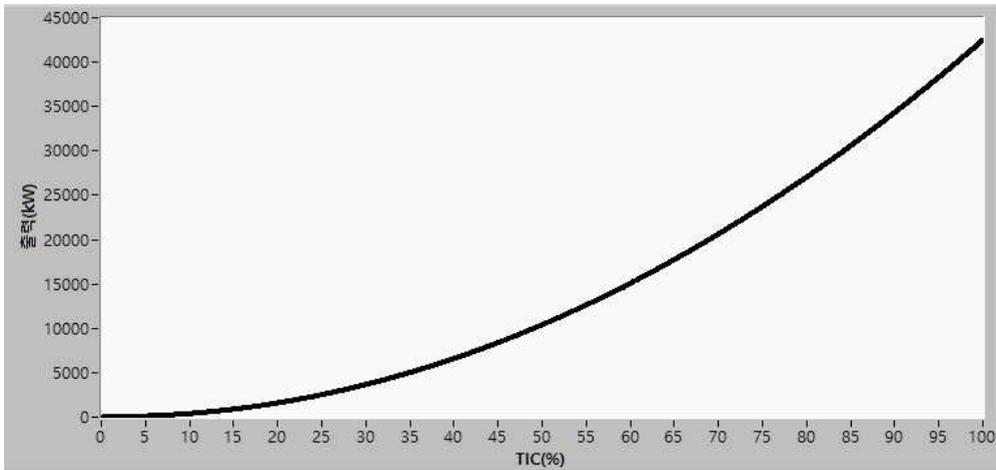


Fig. 14 Output according to gas turbine TIC value

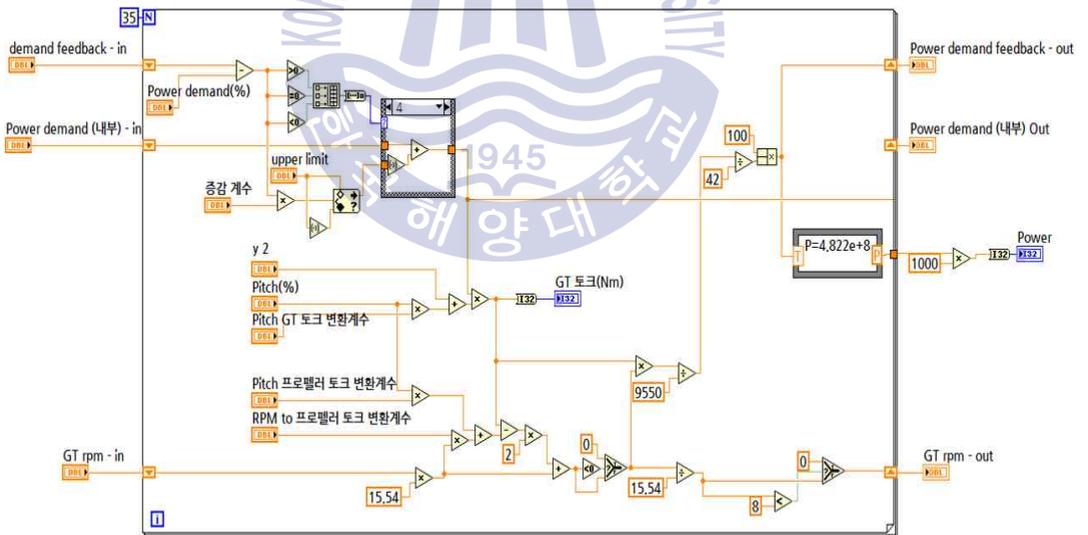


Fig. 15 LabVIEW - Gas turbine model block diagram

3.4 전기추진전동기 모델

일반적으로 2축기반의 추진체계의 경우 1축기반의 추진체계에 비해 생존성이 높기 때문에 군함 및 해경선 등 추진축을 2개 사용하는 2축기반의 추진체계를 적용한다. 본 논문에서 시뮬레이션 대상 함정인 FFX Batch-II의 경우에도 2축기반의 추진체계를 적용하고 있어 2축 2기의 전기추진전동기가 탑재되어야 하나 본 논문에서는 하드웨어기반의 시뮬레이터의 단순화를 위해 1대의 전기추진전동기를 탑재하되 2배의 출력을 갖는 전기추진전동기를 모델로 선정하였고, 사양은 표 10과 같다.

Table 10 Propulsion motor specification

Specification	
Type	PMPM (Permanent Magnet Propulsion Motor)
Rating Power	3.5MW at 100 [rpm]

그림 16은 전기추진전동기 모델은 가스터빈의 제어 입력신호는 TIC[%]와 같이 출력대비 백분율로 받는 것이 아니라, 요구되는 출력[kW] 입력 신호에 따라 축회전수 및 축 토크를 출력하도록 하였다.

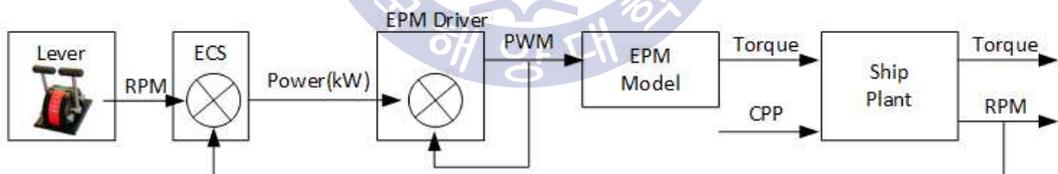


Fig. 16 EPM power diagram

전기추진전동기 모델은 ECS로부터 출력 명령을 받아 축속도 및 축토크를 출력하도록 한다. 전기추진전동기 모델의 출력범위는 0~3,600[kW]이며, 출력되는 축속도는 0~110[rpm], 토크범위는 0~340[kNm]로 설정하였다.

그림 17는 ECS로부터 요구되는 출력과 CPP의 pitch값과 전기추진전동기 샤프트의 속도를 입력받아 토크, 출력, 속도를 나타내는 전기추진전동기 모

델 블록다이어그램이다.

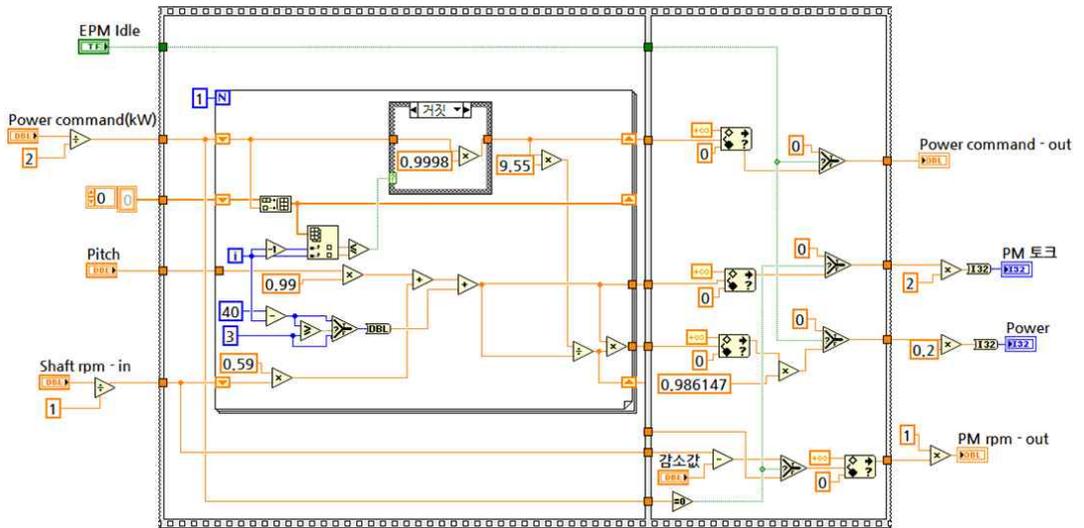


Fig. 17 LabVIEW - EPM model block diagram

가스터빈과 전기추진전동기는 각 장비의 운영특성을 예측하기 보단, 연동 특성 및 함정 전체 추진체계에 대한 특성을 예측하므로 열역학적 모델이 아닌 제어 값에 따른 제어동작 및 출력 특성을 반영하도록 단순화하여 모델링을 진행하였다. 그 가운데 제어 명령에 따른 기계적 및 전기적 지연을 주기 위하여 내부제어기 모델을 PID제어기를 이용하여 출력 및 속도변화를 시간에 따른 모델로 구현하였다. 그림 18은 전기추진전동기 내부 제어기 모델을 나타내는 블록 다이어그램이다.

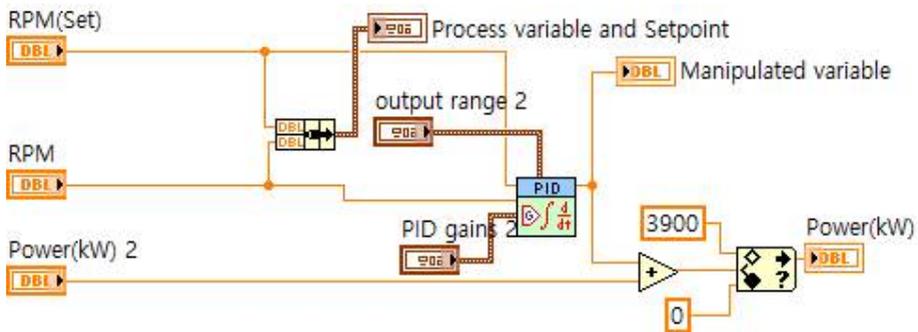


Fig. 18 LabVIEW EPM internal controller model

3.5 감속기어 및 클러치

감속기어는 주 추진기관의 동력전달 및 동력전환 등의 기능을 한다. 또한 함정의 경우 프로펠러의 회전수가 저속일 때 효율이 높음으로 중·고속 기관의 속도를 낮추고 토크를 높이는 역할을 수행한다. 감속기어의 회전속도와 토크는 식 (7)과 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[27].

$$k = \frac{n_g}{n_p} \quad (7)$$

$$Q_P = kQ_g e_r \quad (8)$$

k 는 감속기어의 기어비, n_p 및 n_g 는 각각 프로펠러 및 주 추진기관의 회전속도 [rpm]이며, Q_p 및 Q_g 는 각각 프로펠러 및 주 추진기관(가스터빈 또는 전기추진전동기)의 토크 [Nm], e_r 은 에너지 전달 효율을 나타낸다.

감속기어는 식 (7)과 식 (8) 이외에 동력을 전달하는 가운데 토크와 회전속도에 따라 효율이 변화하나, 최근 개발되는 감속기어의 경우 저속구간을 제외한 대부분의 구간에서 98[%]이상의 에너지 전달효율을 가지므로 본 논문에서는 전달효율을 100[%]로 가정하여 진행하였다.

함정에서 사용되는 클러치의 경우 멀티디스크 클러치 또는 SSS-clutch가 사용된다. SSS-clutch의 경우 입력축 축 회전속도가 출력축 축 회전속도보다 빠를 경우 자동으로 클러치가 붙으며, 입력축 축 회전속도가 출력축 축 회전속도보다 낮아지는 경우 클러치가 떨어지는 특성을 가지므로 최근 복합식 추진체계를 갖는 함정에 많이 이용되어지고 있다. 이러한 특성은 기어식 클러치에 비하여 안정적으로 동력전달을 할 수 있는 장점을 가진다. 본 논문에서는 실제 장비의 속도를 바탕으로 비교하여 추진 장비 전환 절차가 보다 부드럽고 축계에 무리가 가지 않도록 SSS-clutch와 동일하게 동작할 수 있도록 구현하였다.

그림 19는 SSS-Clutch의 동작 특성을 나타낸다. E는 입력측의 샤프트를 나타내며, E의 속도가 빨라질 경우 C가 이동하여 B의 클러치가 붙게 된다.

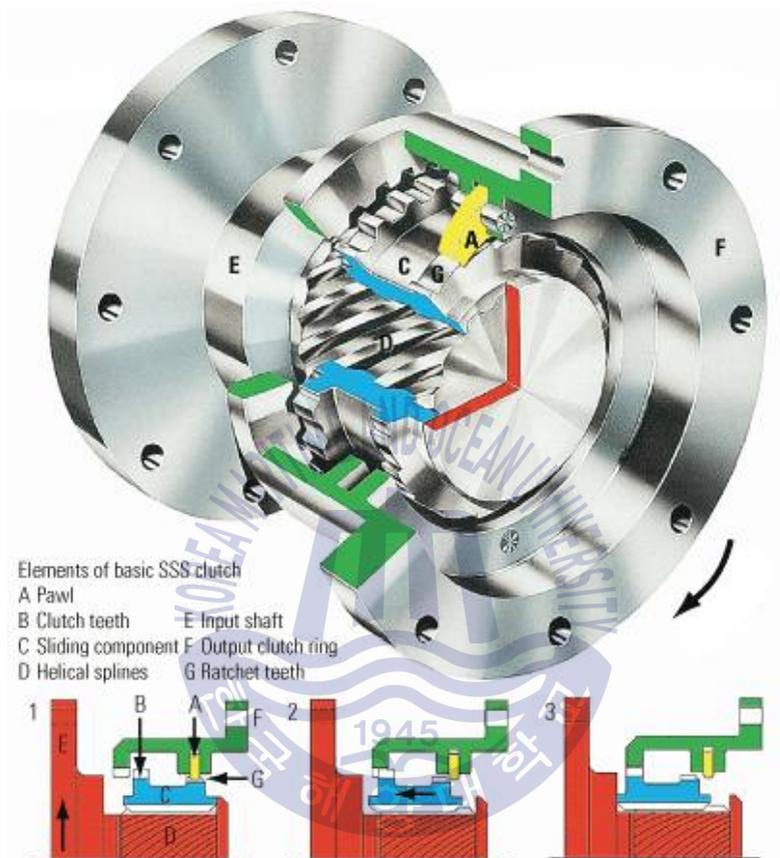
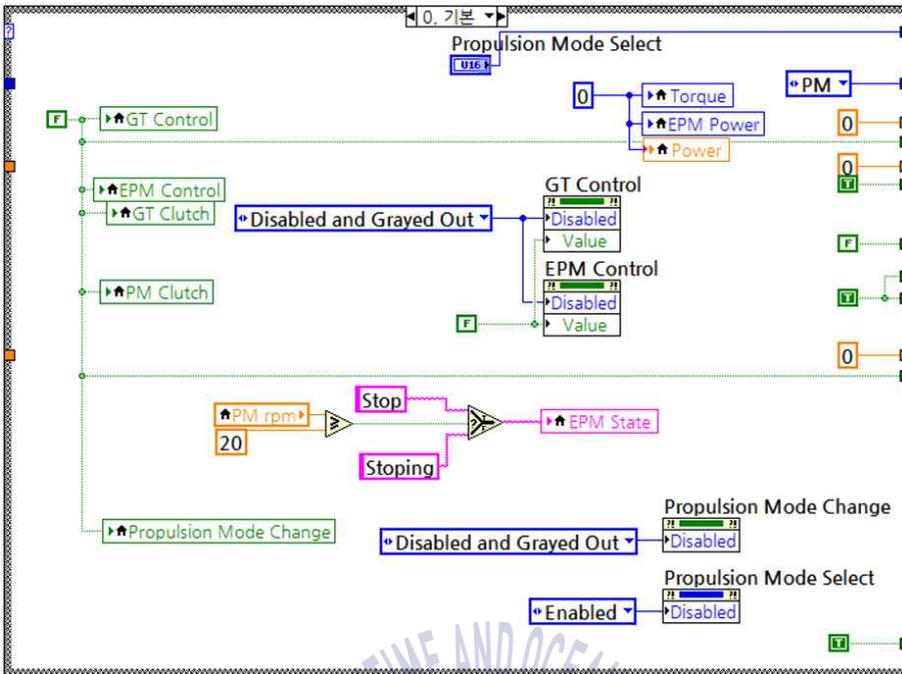
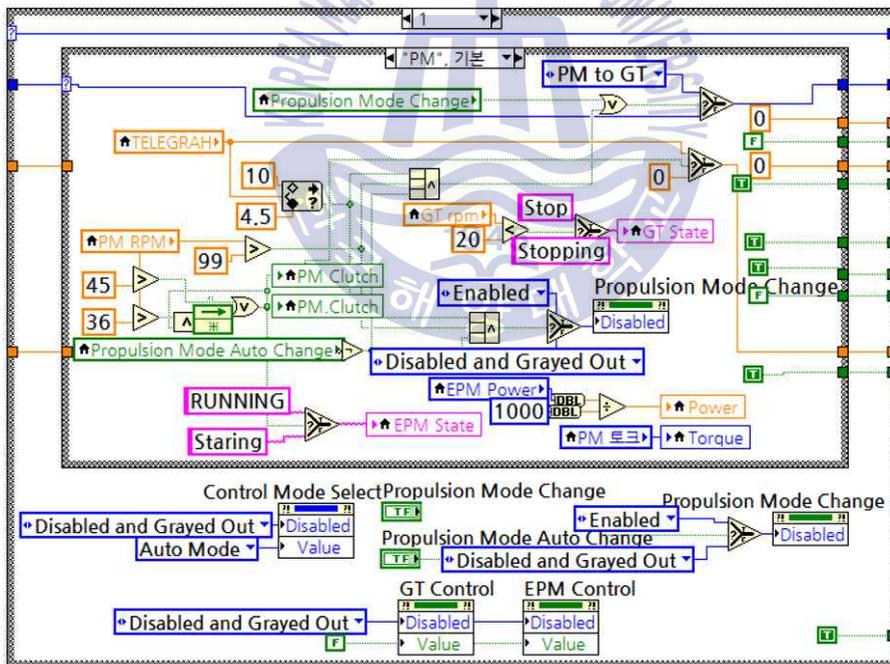


Fig. 19 SSS-clutch

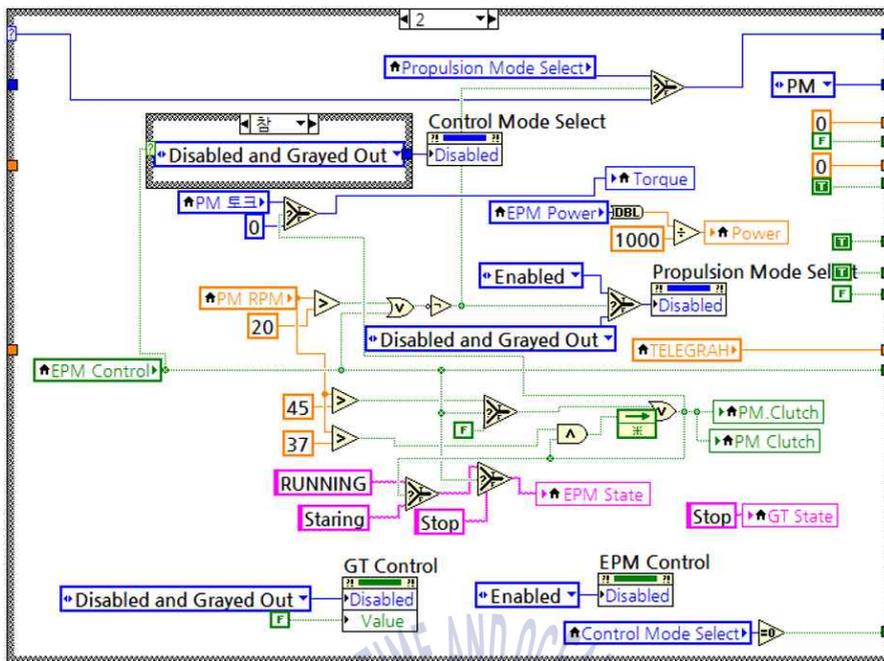
그림 20의 (a)-(d)는 각 운항모드에 따른 SSS-clutch의 동작을 구현한 블록 다이어그램으로, 사용자의 운용모드나 주 추진기관의 샤프트 속도에 따라 제어된다. 기본적으로 주 추진기관이 안정적인 축 속도를 내기 전까지는 연결되지 않는다.



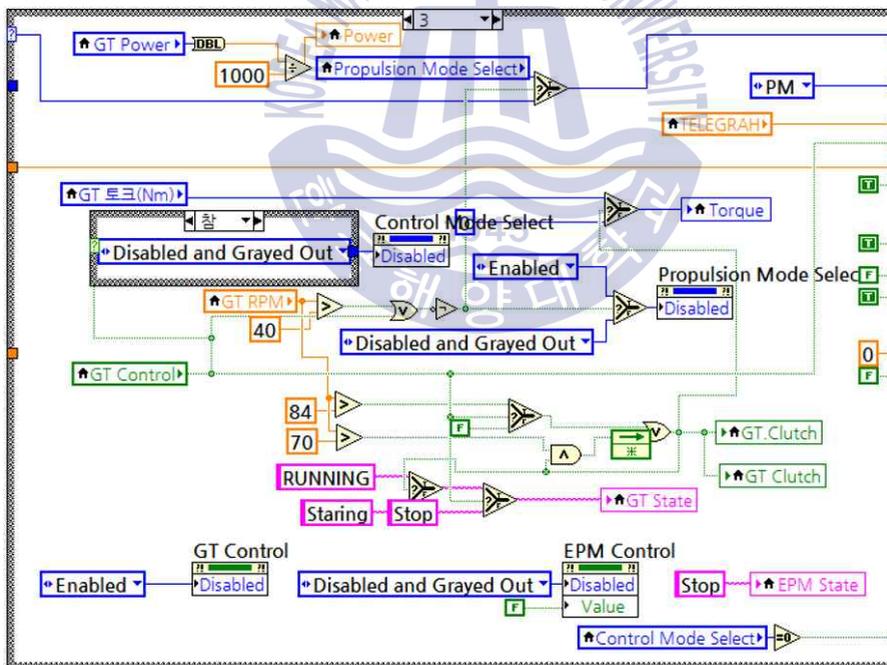
(a) Standby mode



(b) Hybrid mode



(c) PM mode



(d) GT mode

Fig. 20 LabVIEW – SSS-clutch model block diagram

3.6 가변피치 프로펠러

함정의 경우 가변피치프로펠러(CPP, Controllable Pitch Propeller)는 보다 고정피치프로펠러(FPP, Fixed Pitch Propeller)가 널리 적용되어지고 있다. 가변피치프로펠러의 경우 날개의 피치를 자유롭게 변화시켜 원하는 위치에 고정할 수 있으므로 주기관의 회전속도 또는 일정방향으로 고정되어 있어도 함정의 전진, 후진 및 회전을 자유롭게 할 수 있다. 또한 함정과 같이 급격한 출력변화가 필요한 선박이나 가스터빈과 같이 한 방향으로 회전하여 역회전이 불가능한 주기에 사용될 수 있다는 장점을 가진다.

이러한 프로펠러는 주추진기관으로부터 나오는 출력을 축계 및 함체에 전달하여 함정이 추력을 얻도록 한다. 프로펠러에서 나오는 출력(P_p [kW]) 즉, 추력(T_p [N]) 및 토크(Q_p [Nm])는 프로펠러의 회전속도(N_p [rps])와 프로펠러의 직경(D [m]) 및 해수의 밀도(ρ [kg/m³])로 나타낼 수 있다[28,29,30]. 프로펠러의 출력, 토크, 추력은 식 (9), (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_p = 2\pi Q_p = 2\pi K_Q \rho D^5 N_p^2 \quad (9)$$

$$T_p = K_T \rho D^4 N_p^2 \quad (10)$$

$$Q_p = K_Q \rho D^5 N_p^2 \quad (11)$$

이러한 프로펠러의 특성은 아래 매개 변수에 의해 결정된다.

$$\text{전진계수}[J] = V_A / (N_p D) \quad (12)$$

$$\text{추력계수}[K_T] = T_p / (\rho N_p^2 D^4) \quad (13)$$

$$\text{토크계수}[K_Q] = Q_p / (\rho N_p^2 D^5) \quad (14)$$

$$\text{프로펠러 효율}[n_o] = V_A T_p / 2\pi N_p Q_p = J / 2\pi (K_T / K_Q) \quad (15)$$

여기서 V_A 는 함정의 전진속도이다. 가변피치프로펠러의 경우 차원계수 K_p 와 K_Q 는 전진계수 J 와 프로펠러 블레이드의 방향각 P 에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$K_Q = K_Q(J, P) \quad (16)$$

$$K_T = K_T(J, P) \quad (17)$$

여기서 P 는 기준피치(P_0)에서 시작하는 프로펠러 블레이드의 방향각을 의미하므로 고정피치프로펠러의 경우 P 가 고정되어있으므로 J 를 다항식으로 표현할 수 있으나, 가변피치프로펠러의 경우 P 의 변화에 따른 J 와 프로펠러의 회전속도에 따라 지속적으로 변화하게 되어 표현의 어려움을 가진다. 프로펠러 자체 성능 및 해석하기 위해서 위 식을 활용하여 프로펠러에 대한 시뮬레이션을 진행하여야 하지만, 본 논문에서는 함정의 추진체계에 대한 시뮬레이터를 개발하므로 가변피치프로펠러의 특성을 표 11 및 그림 21과 같이 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

표 11은 가변피치 프로펠러의 기본 사양을 나타내며, 그림 21은 프로펠러 단독시험 결과 나오는 전진계수와 방향각에 따른 차원계수의 그래프를 나타낸다.

Table 11 Controllable pitch propeller specification

Type	Specification
Type	CPP
Number of blade	5
Propeller diameter	4.3 [m]
Pitch to diameter ratio	1.8
Area ratio	0.57

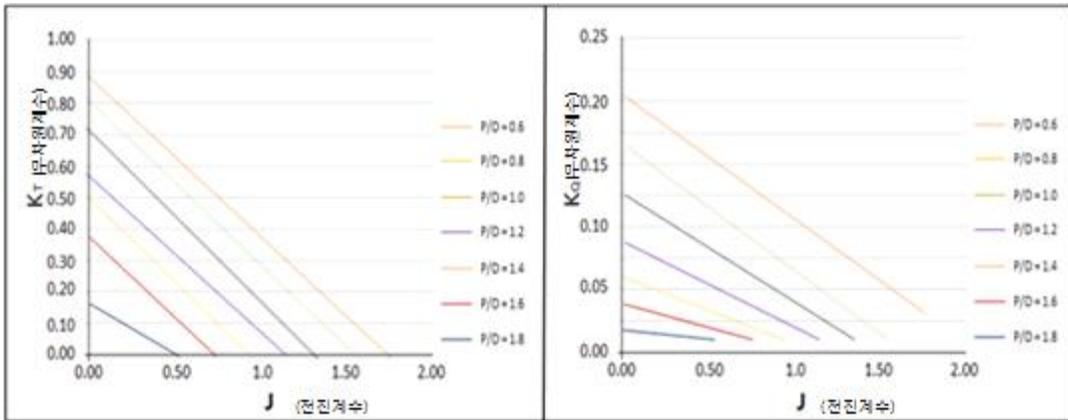


Fig. 21 CPP characteristic curve

그림 22는 표 11과 그림 21을 바탕으로 토크와 속도, P/D를 출력하는 가변피치 프로펠러 블록다이어그램이다.

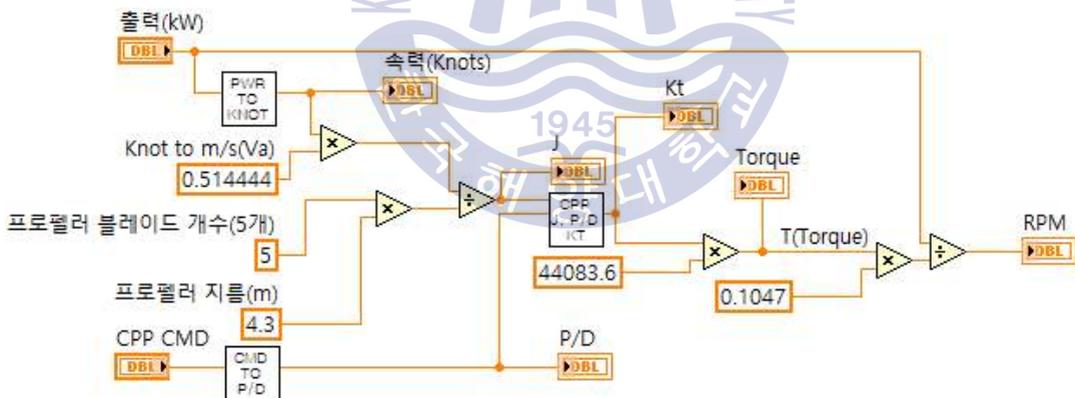


Fig. 22 LabVIEW CPP model block diagram

제 4 장 추진체계 시뮬레이터

4.1 시뮬레이터 구축

본 논문에서는 함정 추진체계의 검증 및 ECS를 검증하기 위해 가상의 함정 시뮬레이터를 구축한다. 가상의 시뮬레이터는 함정의 추진체계 장비와 유사한 특성을 갖는 장비모델, 시뮬레이션을 통한 장비모델을 가시적으로 보여주는 하드웨어 테스트 유닛, 함정의 추진체계 중앙제어기인 가상의 ECS로 구성되며 시뮬레이터 구성은 그림 23과 같으며 하드웨어 테스트 유닛 및 가상의 ECS의 하드웨어 구성 사양은 표 12와 같다.

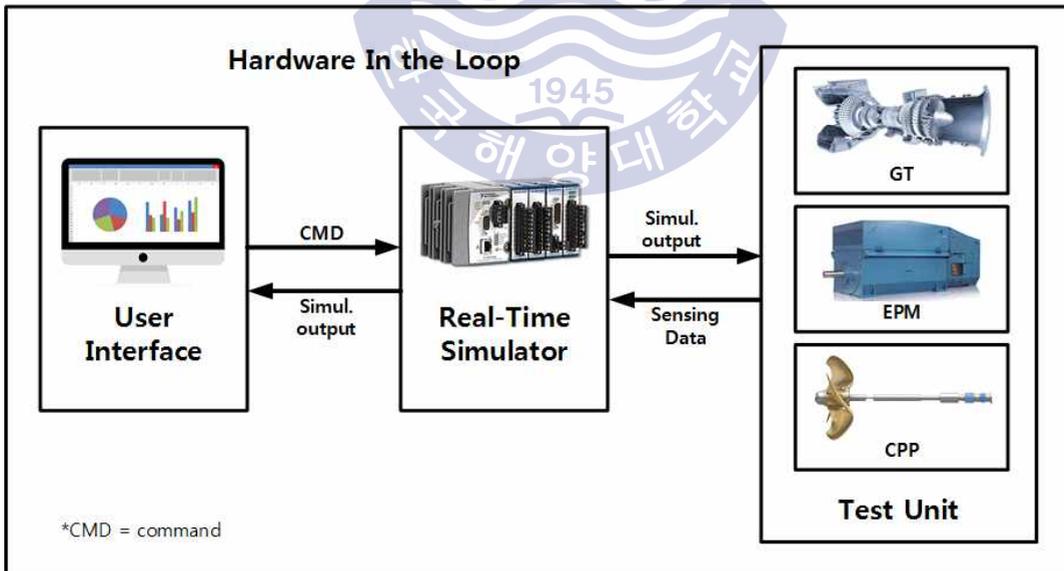


Fig. 23 Propulsion system simulator layout

Table 12 Propulsion system simulator hardware specification

no	Model	Name	EA	Description
1	ECS & Propulsion equipment	NI Crio-9035	1	1.33GHz, Atom E3825, Xilinx Kintex-7
		NI 9870	2	4ch RS232 serial communication module
		NI 9472	1	8ch, 24V Source DO
		NI 9403	1	32ch TTL DIO
		NI 9221	1	8ch ±60V AI
		NI 9401	1	8ch 100ns High-Speed DI
2	Main Propulsion machine	MY1020ZXFH	2	24V 450W DC Motor
	Propulsion Motor controller	NT-M-DCDM	1	2ch 24V DC Motor Driver
	Reduction Gear	SM4A-1R	2	Bevel gear
	SSR Clutch	BCS Type2.0	2	24V Electrical clutch
	RPM sensor	BUP-30	3	Photo sensor
	Shaft bearing	UCP204	3	Unit bearing

그림 24는 표 12의 No.1인 통합기관제어기 및 추진장비 시뮬레이터를 나타내며, 그림 23의 실시간 시뮬레이터에 해당된다. 그림 25의 장비를 통해 센싱된 데이터와 사용자의 명령에 따라 추진장비의 시뮬레이션을 진행하고, 시뮬레이션 결과를 하드웨어에 보내 장비를 구동하게 된다.



Fig. 24 Propulsion system simulator - 1

그림 25는 그림 24의 장비인 National Instrument(NI)사의 NI-Crio의 주요 특성을 나타낸다[31].

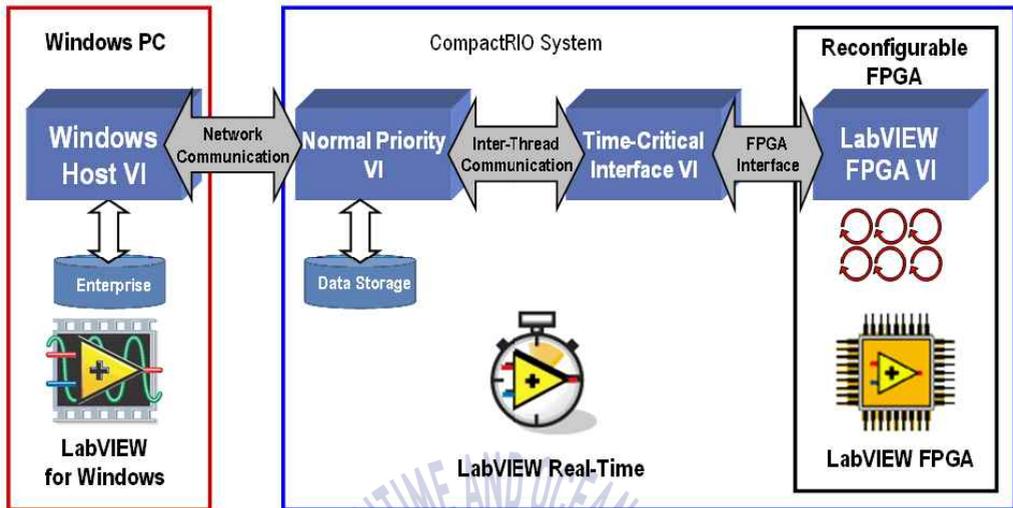


Fig. 25 NI C-rio system configuration

NI-Crio를 이용하여 실시간 운영체제 기반의 추진체계 장비 및 시스템에 대한 모델링을 하였다. NI-Crio 9035는 Linux기반의 실시간 운영체제를 탑재하고 있어 동적 시뮬레이션의 신뢰성 확보에 필수적인 정시성(on-time performance)을 확보할 수 있다. 여기서 정시성이란 프로그램이 사용자가 정해놓은 시간에 정해진 동작을 정확하게 수행하는 기능으로 시간에 대한 장비 간 연동특성을 확인하는데 매우 중요하다.

이러한 실시간 운영체제는 일반 운영체제(Windows 등)에 비하여 지터 발생률이 현저히 적으며, 프로그램의 기능에 따라 루프를 달리 지정하여 지터 발생을 최대한으로 억제하도록 구성할 수 있다. 본 논문에서는 데이터 수집 루프, 제어 및 동적 모델 시뮬레이션 루프, 하드웨어 시뮬레이터 제어 루프, 데이터 저장 루프로 이루어져 있으며 제어 및 동적 모델 시뮬레이션 루프의 정시성을 1순위로 설정하여 중요 기능에 대하여 지터(jitter)의 발생을 줄이

도록 구성하였다.

그림 26은 표 12의 No.2의 장비들을 나타내며, 그림 24의 테스트 유닛에 해당된다. 모터는 각각 가스터빈과 전기추진전동기를 나타내며 RPM을 출력한다. 광센서(photo sensor)를 통해 속도가 측정되어 그림 24인 실시간 시뮬레이터에 전달되며, 하드웨어에서 측정된 속도에 따라 목표값에 도달하기 위한 명령이 달라진다. 두 개 클러치는 연결 상태에 따라 샤프트에 전달되는 속도가 달라지며, 클러치의 연결 상태는 사용자의 운용모드 선택에 따라 상이하다. 하단의 레버는 사용자의 운용모드에 따라 속도를 제어하거나, 피치값을 제어하며 측정된 레버값은 실시간 시뮬레이터로 전달되어 내부에서 ECS 명령값으로 전환되어 시뮬레이션이 진행된다.



Fig. 26 Propulsion system simulator - 2

4.2 함정 추진체계 운용모드

함정의 정상상태 운항모드에는 크게 3가지로 항해모드(navigation mode), 선속조정모드(manoeuvring mode), 예인모드(towing mode)가 있다. 일반적인 의미로 항해모드는 원해에서 순항시 사용하는 모드이며, 선속조정모드는 주로 항만 근처에서 사용되는 모드이다. 예인모드는 다른 선박을 끄는 모드이다. 본 논문에서는 가스터빈과 전기추진전동기를 복합적으로 사용하는 항해모드와 단일 추진기관을 사용하여 운항되는 자동모드와 수동모드에 대해서 시뮬레이션을 진행한다. 그림 27은 5가지의 추진모드를 나타낸다.

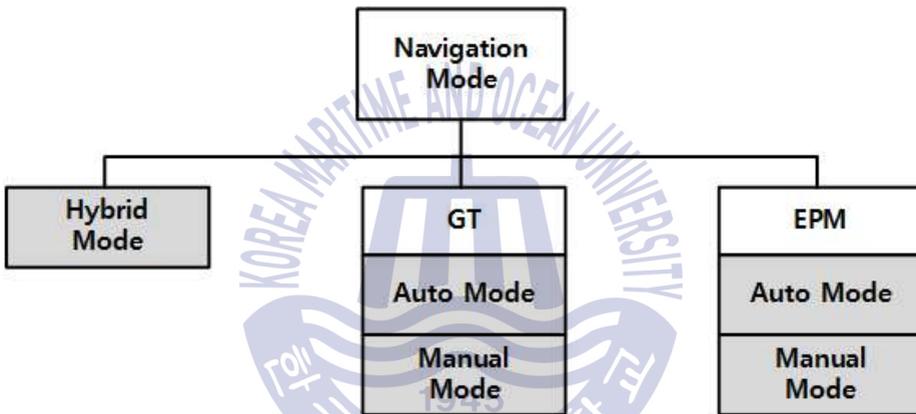


Fig. 27 Propulsion system simulator propulsion mode

함정의 경우 신속한 이동과 높은 기동성 확보를 위해 추진기관의 회전수를 일정 속도 이상 높여놓은 상태에서 가변피치프로펠러를 이용하여 함정의 추력을 얻는다. 즉, 가변피치프로펠러의 피치 각 0을 유지한 상태에서 주기관이 충분한 축 회전속도가 도달하였을 때 피치 각을 변화시켜 함체가 추력을 가지도록 한다. 이에 자동모드에선 사용자 레버(lever) 값에 따라 통합기관제어기(ECS)에서 추진기관 출력제어 및 가변피치프로펠러의 피치각도 값을 함께 제어하여 최적의 운항특성을 갖도록 한다.

그림 28과 같이 단일 추진기관(PM, GT)에서의 자동 모드는 하나의 레버값에 따라 통합기관제어기를 통하여 사전에 정의된 축 회전수와 가변피치 프로펠러의 P/D값이 자동으로 조정되어 출력되는 모드이다.

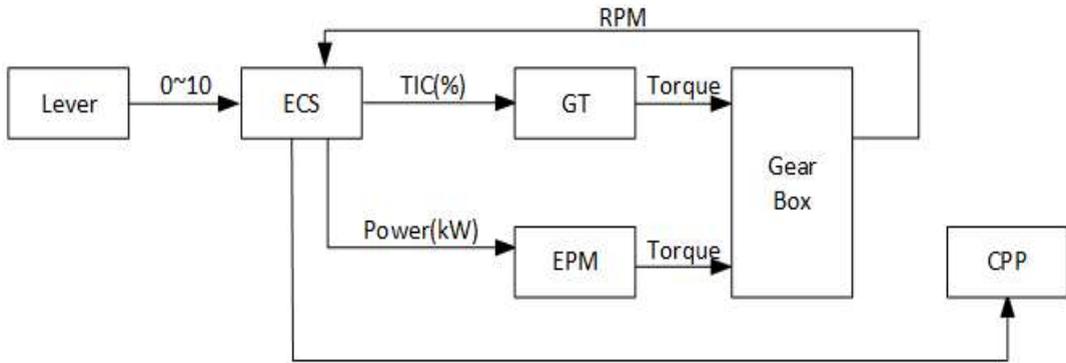


Fig. 28 Navigation - auto mode

수동 모드는 그림 29와 같으며 기관의 출력과 가변피치프로펠러의 P/D값 두 개의 텔레그래프를 이용하여 각각의 출력 및 피치 값을 사용자가 수동으로 조작하는 모드이다. 수동 모드는 출력기관의 엔진 출력을 조정하는 레버값과 가변 피치 프로펠러의 P/D 값을 조정하는 레버값을 받아 장비에 전달한다.

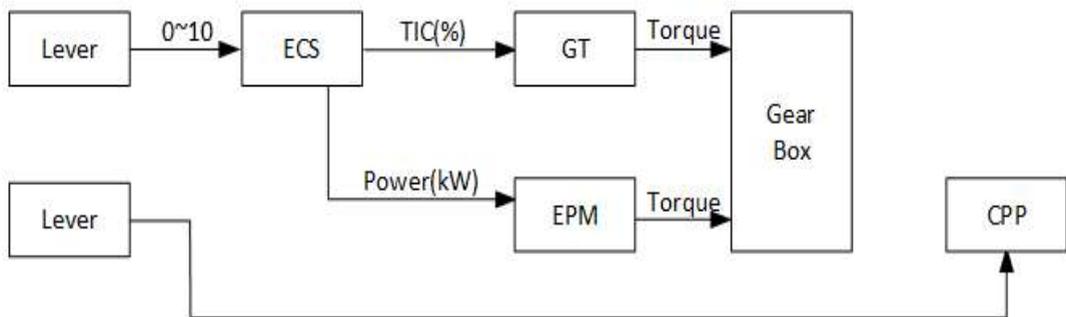


Fig. 29 Navigation - manual mode

4.3 통합기관제어기

본 논문에서는 구축한 함정 추진체계의 시뮬레이션 및 시뮬레이터의 특성을 검증하기 위해 가상의 함정의 통합기관제어기의 운영알고리즘을 개발하여 시뮬레이션과 연동을 통하여 그 특성을 분석하고자 한다.

일반적으로 추진기관의 자동모드의 경우 축 회전수와 프로펠러의 P/D각도에 따라 무수히 많은 수의 결합방법(combined law)이 존재하나 최적의 운항을 위해 함정 건조 상세설계 단계에 있어 PSI업체 또는 프로펠러 업체에서 추력과 프로펠러 P/D 각을 계산하여 추진축에 과토크(over torque), 과속도(over speed) 및 추진 장비의 운영 매뉴얼상 안정적으로 운영할 수 있는 범위를 검토하여 결합방법을 제안하게 된다.

본 논문에서는 추진기관의 출력 및 특성을 고려한 임의의 결합방법을 설정하여 제작한 시뮬레이션과의 연동을 통하여 추진체계 시뮬레이터, 통합기관제어기, 장비간의 특성을 비교하여 신뢰성을 검증하는 방법을 제안한다.

본 논문에서 제안한 함정을 대상으로 통합기관제어장치의 특성 값을 설정하였으며 자동모드에서 텔레그래프에 따른 선속은 그림 30과 같다.

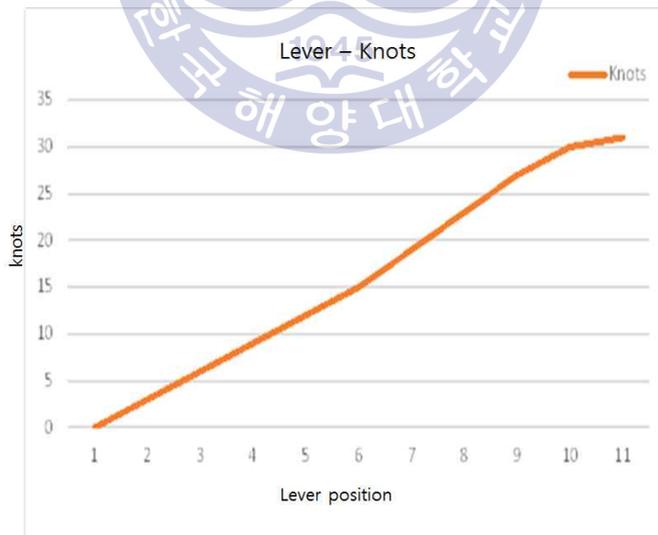


Fig. 30 Telegraph - ship speed graph

대상함정의 경우 약 3,600[kW]에서 함정의 최고속도인 약 31 노트가 출력 되도록 하였다. 본 논문에서는 추진체계 시뮬레이터 구현을 위하여 아래 표 13과 같은 시스템을 갖도록 구축하였다.

Table 13 Propulsion system simulator architectures

Loop	Model	Description
FPGA	Data Acquisition	10Mhz이상의 속도로 포토센서 값을 받아 RPM 측정
Real-Time1	Telegraph	Hardware Telegraph신호를 내부 전달
Real-Time2	Control Model	추진 장비(PM, GT 등)의 물리적 모델 및 ECS 역할 수행(가장 높은 우선순위로 정시성을 가짐)
Real-Time3	Hardware Model	실제 모터 및 클러치 등을 제어하여 운영상 태를 직접 확인 할 수 있도록 구현
Real-Time3	Data Trans.	RT OS와 PC의 Host 간 데이터를 전달
Host	Data Saving.	RT로부터 온 데이터를 PC에 저장하도록 구현

4.3.1 FPGA 모델

실시간 운영체제는 정시성을 갖는다는 장점이 있으나, FPGA(Field Programmable Gate Array)에 비하여 루프 속도가 느리다는 단점을 가진다. 본 논문에선 실제 하드웨어를 제어하여 추진함정의 축 속도 및 클러치 등을 제어함으로 축 속도 계측이 매우 중요하다. 축 속도 계측은 말굽형 광센서를 활용하여 계측하였다.

원리는 다음 그림 31과 같이, 축계에 타원형으로 구멍을 낸 후 구멍이 말굽형 광센서의 수광 소자와 발광소자 사이에 가도록 배치한다. 이후 축이 회전하게 되면 구멍이 나 있을 경우 발광 소자에서 쏜 적외선이 수광 소자에 도달하여 edge trigger 신호가 발생하게 되고 반대의 경우 down trigger 신호가 발생하게 된다. 이때 각 trigger사이 시간을 측정하여 축 속도를 계산할 수 있다. 시뮬레이터의 축회전수 측정 장비의 경우 축이 1회전 할 때 2개의 trigger신호가 발생하게 되어 측정된 RPM속도에 trigger 개수를 보정하여야 한다.

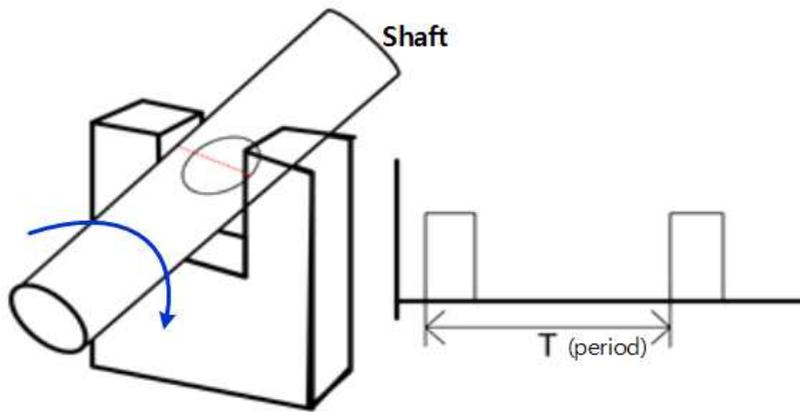


Fig. 31 Photo sensor pick the RPM

그림 32은 FPGA에서 구현된 가스터빈 시뮬레이터의 축 속도 계측을 위한 블록다이어그램이다.

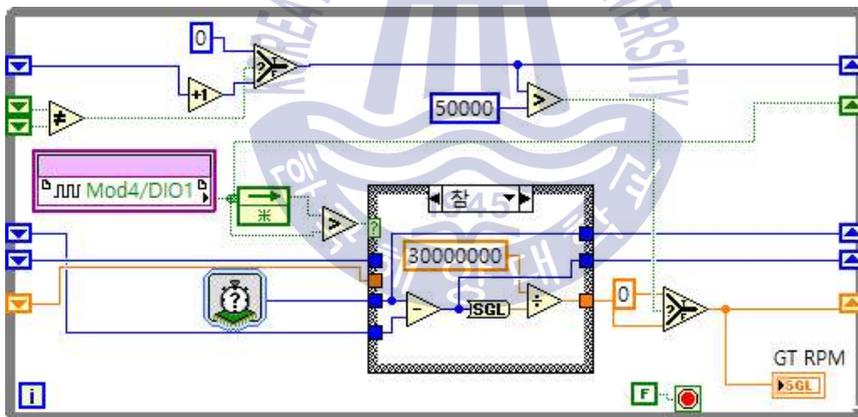


Fig. 32 GT motor RPM block diagram

축회전수 측정 루프의 시간단위는 [μs]이기 때문에 분당 회전수를 계산하기 위해 식 (18)과 같이 계산할 수 있다. 이 말굽형 광센서는 데이터가 한 주기에 2번씩 측정되기 때문에 실제 주기보다 2배 빠르게 측정되어, 시간을 2로 나눈 계산식 (18)을 사용하였다.

$$RPM = \frac{t_2 - t_1}{30,000,000} \quad (18)$$

그러나 이러한 trigger방식의 경우 N+1번째 trigger신호가 발생하지 않을시 가장 최근에 계산된 축 회전수를 표기하기 때문에 축 회전에 따른 trigger 신호가 50,000[μs]동안 발생하지 않을 시, 축이 정지하였다고 판단하여 0[RPM]으로 인식하도록 하였다. 이렇게 계산된 가스터빈 회전수, 추진 모터 회전수, 프로펠러 축 회전수는 실시간 운영체제로 데이터를 전달하게 된다.

4.3.2 레버 모델

본 논문에서 개발한 시뮬레이터는 그림 33과 같이 2개의 물리적 레버를 가지고 있다. 각각의 레버는 추진기관의 제어, 가변피치프로펠러의 피치 각을 제어하는데 사용한다.



Fig. 33 Hardware control lever

앞서 4.2장에서 설명한 그림 27의 운영모드에서 복합모드(hybrid mode)와 자동모드(auto mode)의 경우 왼쪽 추진 장비 제어 레버만 사용한다. 사용자가 원하는 함정의 출력을 추진 장비 제어 레버로만 입력을 받아 통합기관제어기에서 피치값과 추진장비의 출력을 조정하게 된다.

수동모드에서는 사용자가 추진기관의 출력과 가변피치프로펠러의 각을 임의로 조작할 수 있는 모드임으로 두 개의 텔레그래프가 모두 쓰인다. 수동모드일 경우 추진 장비 제어 레버는 추진장비의 출력을, cpp 제어 레버는 cpp의 피치값을 조정하는데 사용된다.

레버의 출력은 0~5V 전압신호로 나오며 내부 구성은 가변저항으로 되어 있어 입력전압 및 레버의 위치에 따라 출력 신호의 전압 값이 변화하게 된다. 그림 34는 데이터 취득 및 필터 프로그램을 나타낸다.

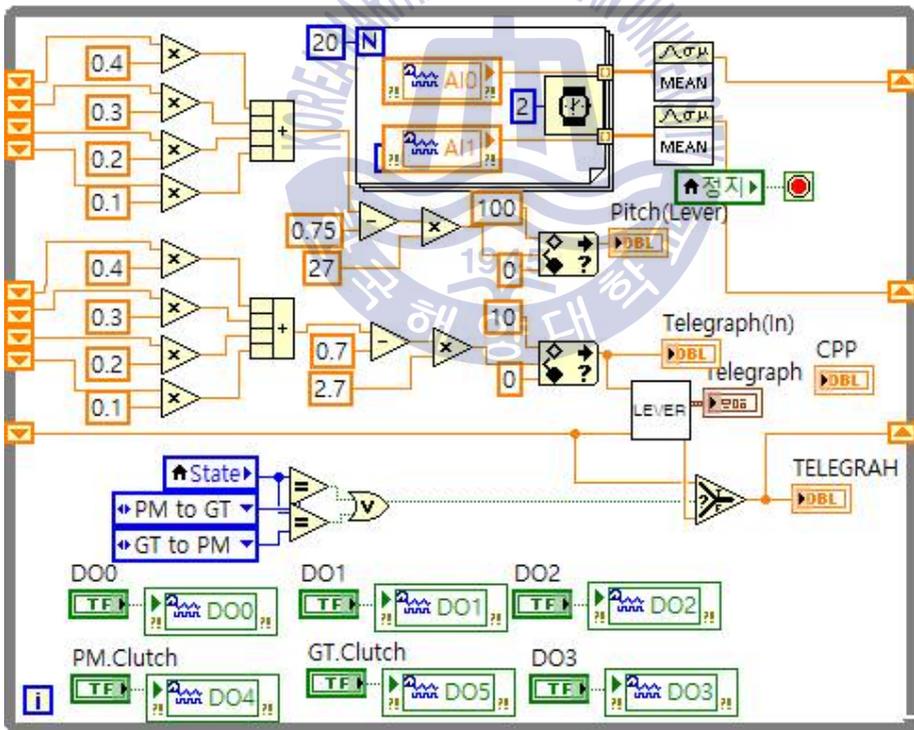


Fig. 34 Telegraph signal processing block diagram

출력 전압 값이 노이즈 및 주변 환경에 영향을 받아 지속적으로 변화하는 문제가 발생하여, 노이즈를 감소시키기 위해 텔레그래프 신호 취득 프로그램에서 PI(비례, 적분)제어를 통하여 노이즈를 감소시켰다. 또한 급속히 변화하는 텔레그래프신호를 내부적으로 모터 및 가변피치프로펠러가 천천히 동작할 수 있도록 하였다.

그림 35의 흰색 그래프와 같이 텔레그래프로부터 받은 전압신호는 상당히 많은 화이트 노이즈를 가지고 있으나, PI필터를 이용하여 빨간색 데이터와 같이 상당한 노이즈 저감 효과를 가지도록 하였음을 확인할 수 있다. 그림 35는 필터 전과 후의 데이터를 나타낸다.

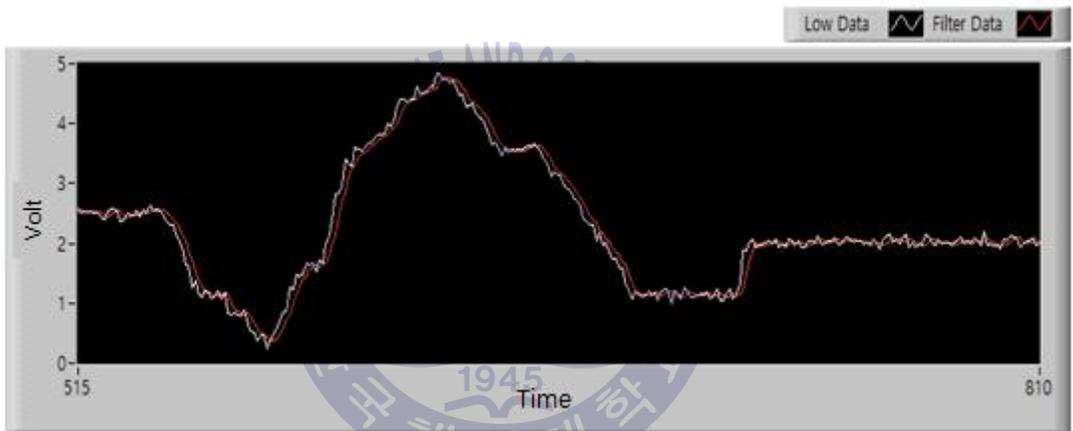


Fig. 35 Telegraph signal processing result

4.3.2 추진시스템 모델

표 14는 추진시스템 모델은 핵심이 되는 연구로 주요 추진 장비에 대한 모델 및 통합기관제어기의 역할을 함께 수행하도록 구현하였다.

Table 14 Propulsion system model

Model	Description
GT basic model	TIC(%)값 및 함정상태(축RPM, CPP 값)에 따라 토크 및 RPM 출력
GT plant model	실제 GT와 유사한 특성을 갖기 위해 TIC 연료 분사 시간등을 고려한 내부 지연 모델(PID제어기로 구현)
EPM basic model	출력(kW)값 및 함정상태에 따라 토크 및 RPM 출력
EPM plant model	EPM driver 모델로 EPM의 상태 및 출력 제어모델
CPP model	자동 및 수동에 따라 CPP 각도를 제어하는 모델
Clutch model	추진 장비로부터 발생된 동력을 축계에 전달
ECS	자동모드일 경우 기 설정된 제어 값에 따라 추진 장비 및 CPP 모델에 제어 값을 전달. 자동 추진 장비 전환 및 함정 상태 분석

추진시스템의 모델은 그림 36과 같이 레버 운용방식(2개), 통합기관제어기, 원동기 운용방식(3개) 구성되어, 6가지 추진시스템으로 모델링하였다. 통합기관제어기는 그림 36과 같이 하드웨어 레버로부터 신호를 받아 주요 추진기관에 제어명령을 수행하게 된다.



Fig. 36 ECS Control flow

제어명령을 받는 각 추진 장비 및 함체 모델은 함정의 축회전수, 토크, 속도 등을 나타내게 되며 신호 및 추력의 전달체계는 아래 그림 37과 같다.

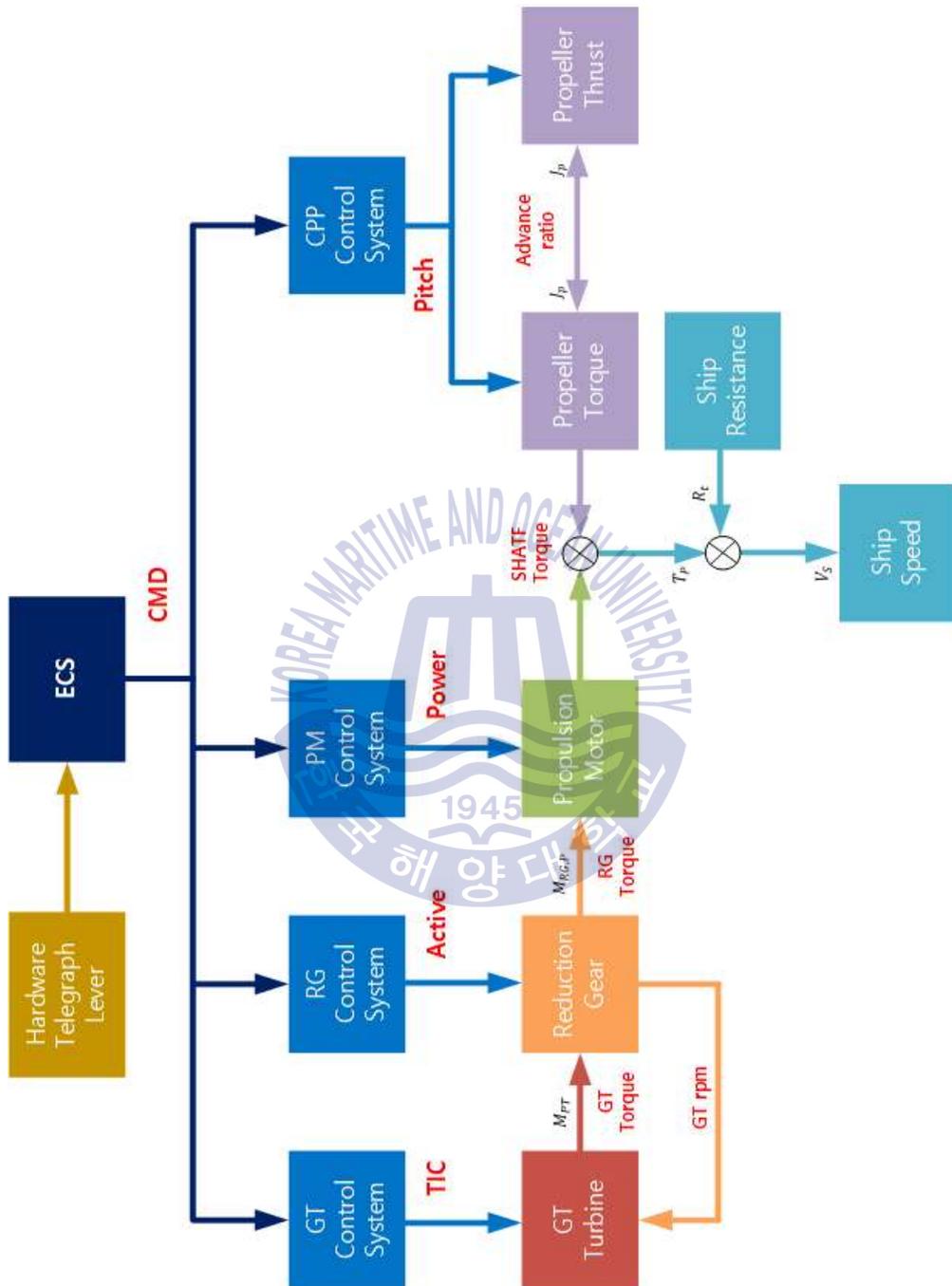


Fig. 37 Propulsion system power transmission

가스터빈 자동모드에서 레버의 위치에 따른 통합기관제어기의 제어 명령인 rpm과 pitch 값은 그림 38과 같이 정의하였다.

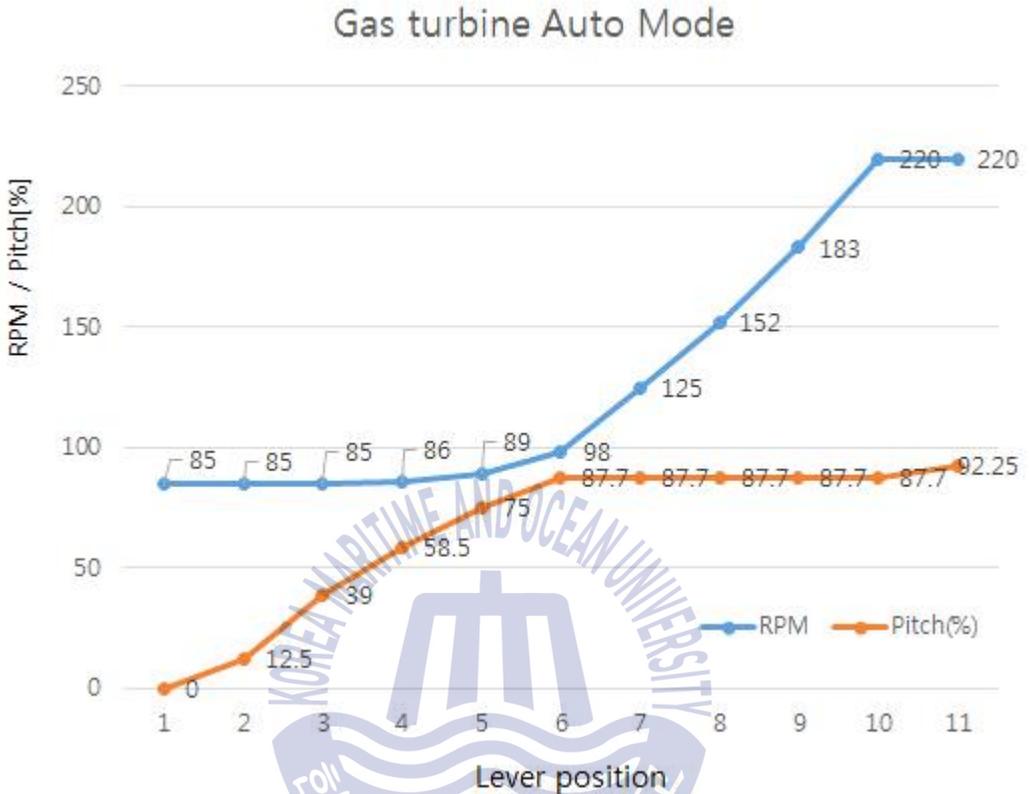


Fig. 38 Gas turbine auto mode RPM & CPP P/D

3.6장에 설명한 것과 같이 함정의 경우 기동성과 신속성의 향상을 위해 함속의 저속구간에서 가스터빈을 이용하여 축회전수를 특정 구간까지 상승시킨 뒤 가변피치프로펠러를 제어하여 추력을 얻는다. 본 논문에서 가스터빈의 Idle 속도를 85[rpm]으로 설정하였으며, 축과 가스터빈에 과토크 및 과속도로 인한 문제가 발생하지 않도록 가스터빈의 RPM과 그에 따른 가변피치프로펠러의 피치 값을 설정하였다. 설정한 축회전수와 가변피치프로펠러로 인한 토크를 이용하여 가스터빈을 이용한 추진 시 레버값에 따른 함속은 3.3장에서 개발한 가스터빈의 기본모델을 이용할 경우 아래 그림 39와 같다.

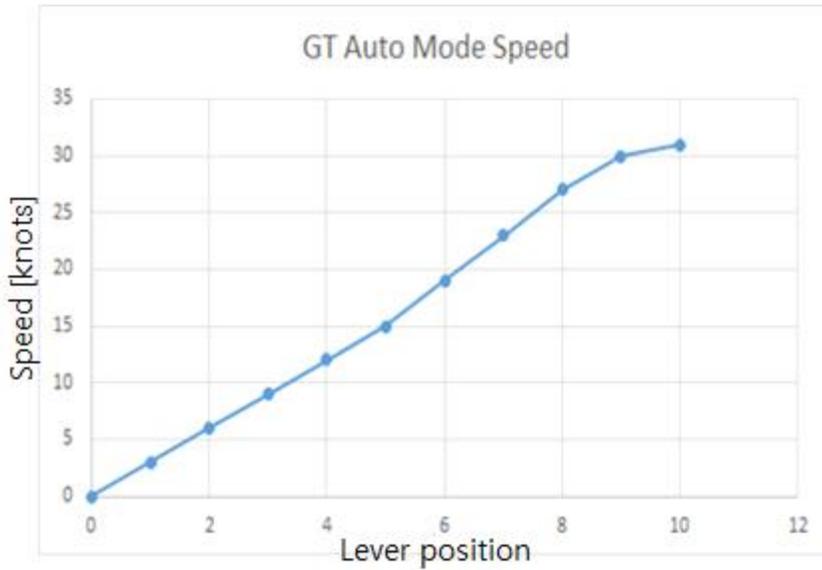


Fig. 39 Gas turbine auto mode vessel speed

가스터빈과 동일하게 3.4장에서 개발한 전기추진전동기 기본모델을 활용하여 그림 40과 같이 레버의 위치에 따른 EPM 자동추진모드에서의 축회전수와 가변피치프로펠러 값을 정의하였다.

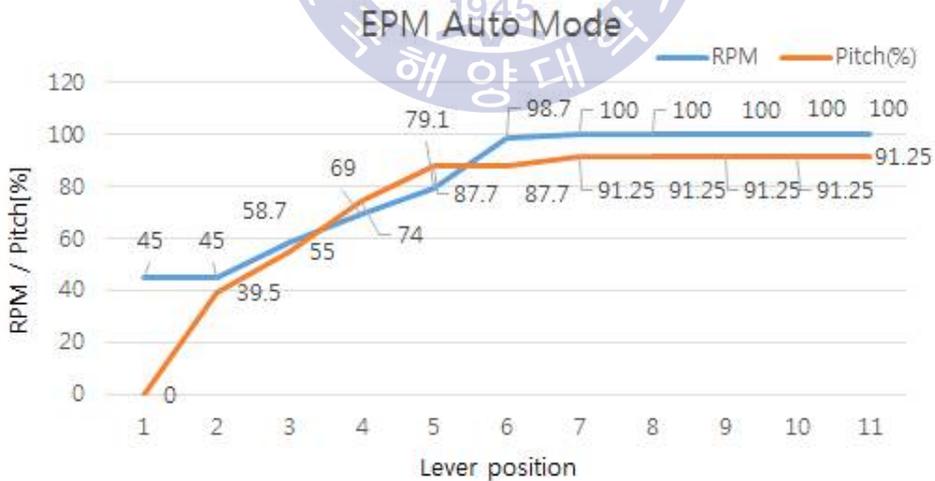


Fig. 40 EPM auto mode RPM & CPP P/D

제 5 장 추진체계 시뮬레이션

5.1 주 프로그램

본 연구에서 개발한 추진체계 장비 모델 및 시뮬레이터의 성능을 실험하기 위해 시뮬레이션을 통한 장비의 특성과 시뮬레이터의 특성을 비교 및 분석하였다. 이를 실험하기 위해 가스터빈 기본모델, 가스터빈 내부제어기 모델, 전기추진전동기 기본모델, 전기추진전동기 내부 제어기 모델, 가변피치 프로펠러 모델, 기관통합제어장치 모델, 데이터 측정 및 저장 프로그램 그리고 이를 하드웨어로 표현하기 위한 전동기 2대, 전자식 클러치 1대, 베벨기어 2대, 포토센서, 베어링 등으로 구성하였다.

실제 함정의 동특성을 분석하기 위해선 열역학적, 동역학적 모델이 필요로 하나 모델의 구현을 위해 많은 변수들에 대한 정확한 값을 알아야 되며 시뮬레이션하기 위해 많은 시간이 소모되기 때문에 실시간 시뮬레이션에 적용하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 시스템 동정기법의 black box 모델을 활용하여 실제 추진 장비의 입력 및 출력 값을 바탕으로 전달함수를 이용하여 개발함으로써 개발 모델의 신뢰성 및 모델의 단순화를 통해 실시간 운영체제에 적합하도록 개발하였다. 실제함정과 달리 시뮬레이션의 루프 속도는 실제 함정 시간의 1/10 Scale로 시뮬레이션을 진행하여 시뮬레이션 결과를 사용자가 보다 빨리 확인할 수 있도록 구현하였다.

개발한 프로그램의 구동 루프는 총 5종으로 그림 41은 개발한 프로그램의 블록다이어그램을 그림 42는 개발 프로그램의 GUI 기반 프론트패널을 나타내며 표 15는 프로그램의 루프별 설명 및 기능에 대하여 나타낸다.

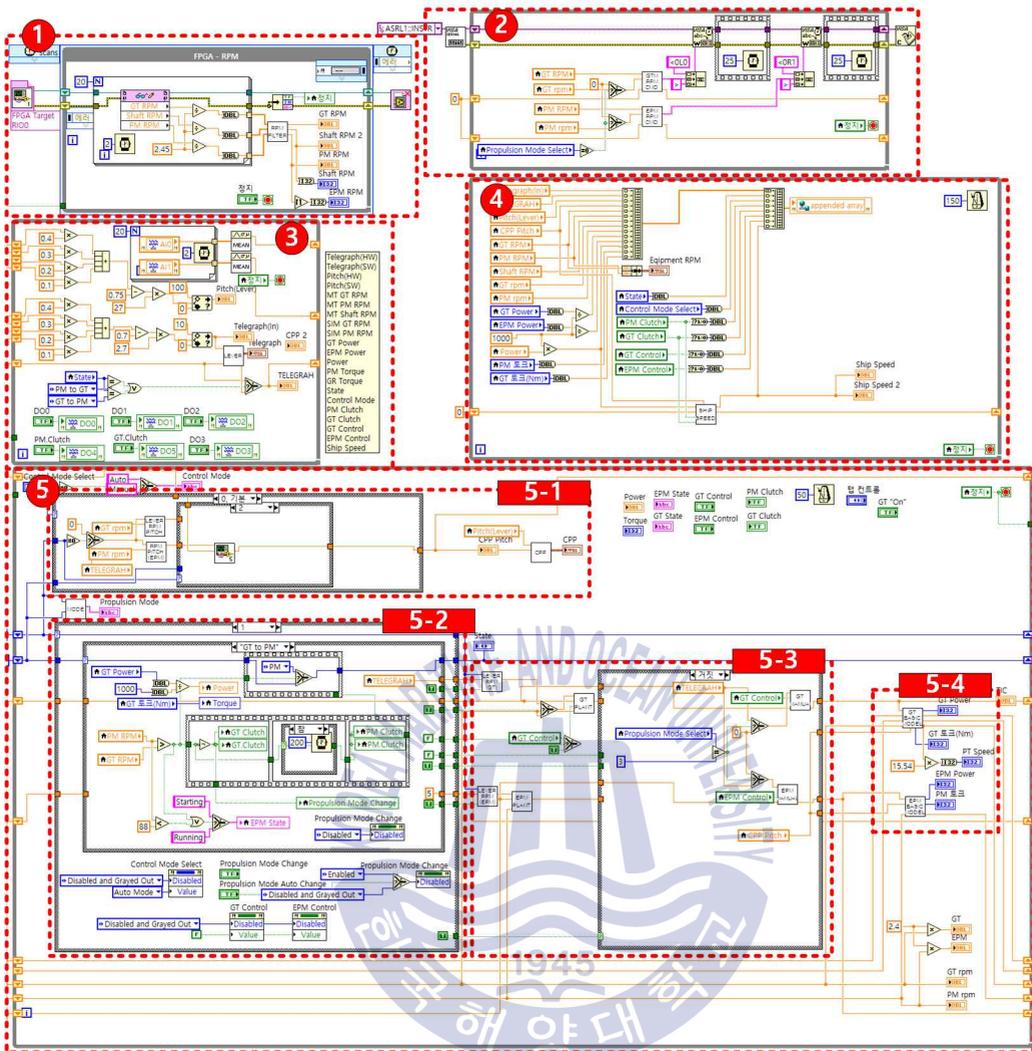


Fig. 41 Propulsion system simulator block diagram

Table 15 Block diagram function

Model	Description
1	FPGA를 이용함 축회전수 측정 및 계산
2	시뮬레이터 모터 회전수 제어
3	시뮬레이터 텔레그래프 신호 처리 및 클러치 제어
4	Host PC로 데이터 전송 및 저장
5	추진 장비 모델 + ECS 제어기능
5-1	가변피치프로펠러 모델
5-2	상태머신을 이용한 추진모드 절환 및 제어
5-3	가스터빈 및 전기추진전동기 내부제어기 모델
5-4	가스터빈 및 전기추진전동기 기본모델

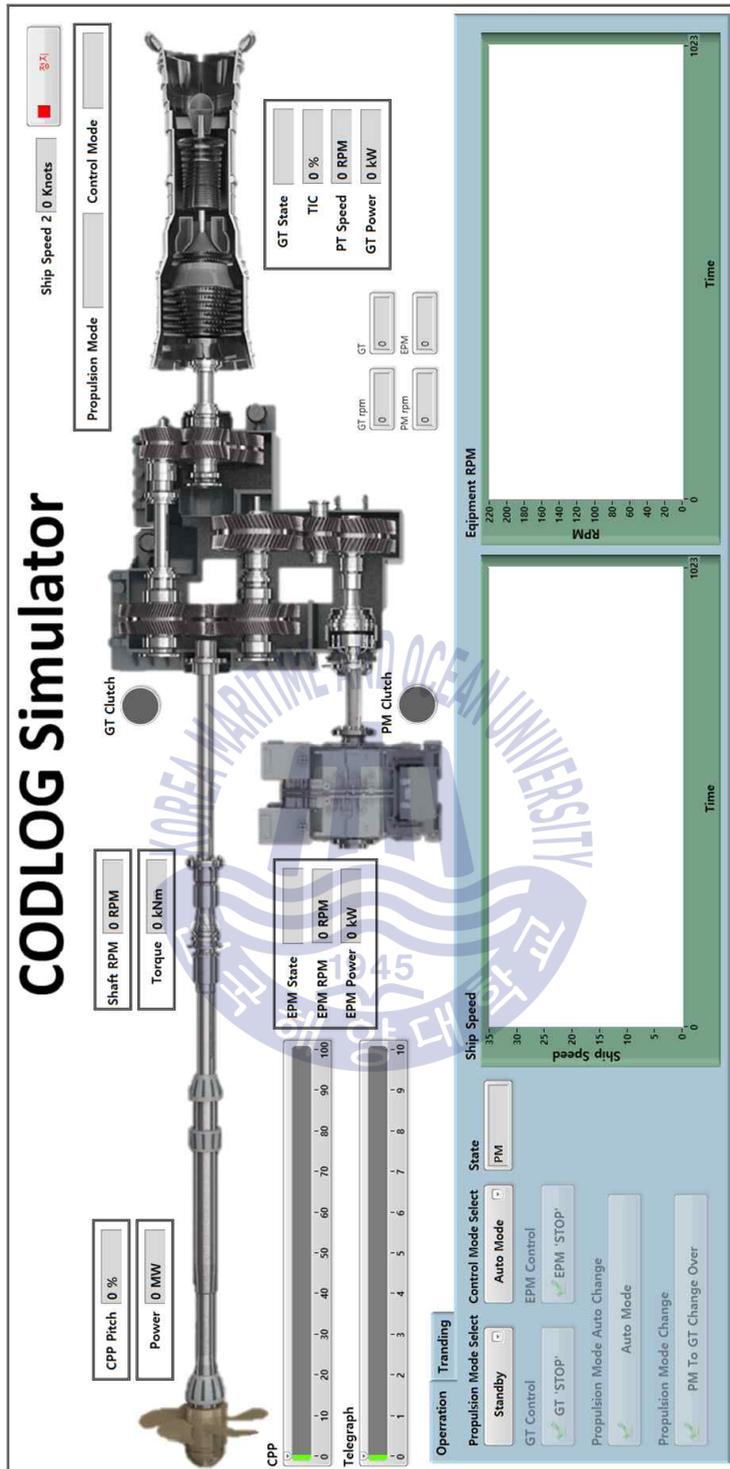


Fig. 42 Propulsion system simulator front panel

본 시뮬레이터에서 수집데이터는 아래 표 16과 같다.

Table 16 Propulsion simulator data list

Name	Type	Range	Description
Telegraph(HW)	AI	0-5V	시뮬레이터 기관 출력 텔레그래프 전압신호
Telegraph(SW)	AO	0~10	주기관 출력제어 1 ~ 10 level
Pitch(HW)	AI	0-5V	시뮬레이터 Pitch 텔레그래프 전압신호
Pitch(SW)	AO	0~100%	프로펠러 Pitch P/D 0~1.59 제어
MT GT RPM	DI	RPM	포토펜서를 이용하여 실제 모터(가스터빈 모델, 전기추진전동기 모델) 및 축의 회전수를 계산
MT EPM RPM	DI	RPM	
MT Shaft RPM	DI	RPM	
SIM GT RPM	AO	RPM	기본모델에서 계산된 가스터빈 RPM
SIM PM RPM	AO	RPM	기본모델에서 계산된 가스터빈 RPM
GT Power	AO	0~40MW	가스터빈 모델에서의 출력
EPM Power	AO	0~3.4kW	전기추진전동기 모델에서의 출력
Power	AO	0~40MW	합정 추계에 전달되는 출력
GT Torque	AO	0~1,800 kNm	가스터빈 축계의 회전수와 프로펠러의 피치 각에 따른 토크
EPM Torque	AO	0~320 kNm	전기추진전동기 축계의 회전수와 프로펠러의 피치 각에 따른 토크
State	Ring	-	추진 장비모드(Auto, GT, EPM)
Control Mode	DO	A/M	Auto Mode 또는 Manual Mode
GT Clutch	DO	On/Off	시뮬레이터 가스터빈 전자식 클러치 제어
EPM Clutch	DO	On/Off	시뮬레이터 전기추진전동기 전자식 클러치 제어
GT Control	DO	On/Off	가스터빈 모델 시동 신호
EPM Control	DO	On/Off	전기추진전동기 모델 시동 신호
Ship Speed	AO	Knot	합정의 속도

표 16의 주요 신호 중 일부에 대하여 200ms당 주기적으로 데이터를 저장 하도록 구현하였다. 그림 43은 host PC에서 데이터 저장 프로그램이다.

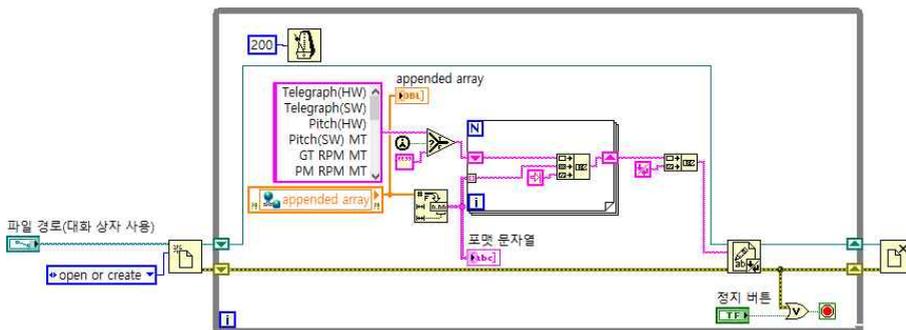


Fig. 43 Host PC data saving program

5.2 가스터빈 자동모드

본 연구에서 개발한 추진 장비 모델과 시뮬레이터를 이용하여 대상함정의 가스터빈을 이용한 추진 특성을 분석한다. 가스터빈 모드의 경우 최대 함속 30[knot]이상을 낼 수 있으며 시뮬레이션 결과 자동모드에서 유사한 출력특성을 가짐을 확인하였다. 시뮬레이터 텔레그래프 신호를 시간에 따른 그래프로 그림 44와 같이 변경시켰을 시, 가스터빈의 회전수와 가변피치 프로펠러의 변화는 그림 45와 같다.

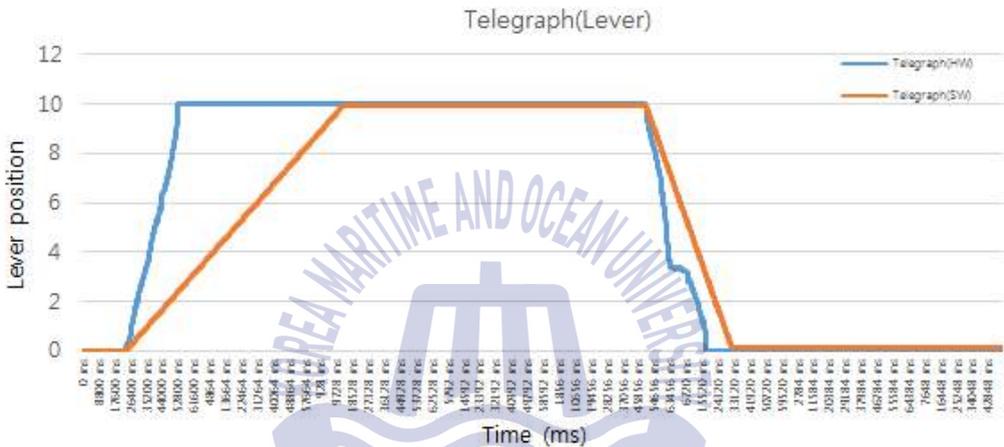


Fig. 44 GT auto mode telegraph signal

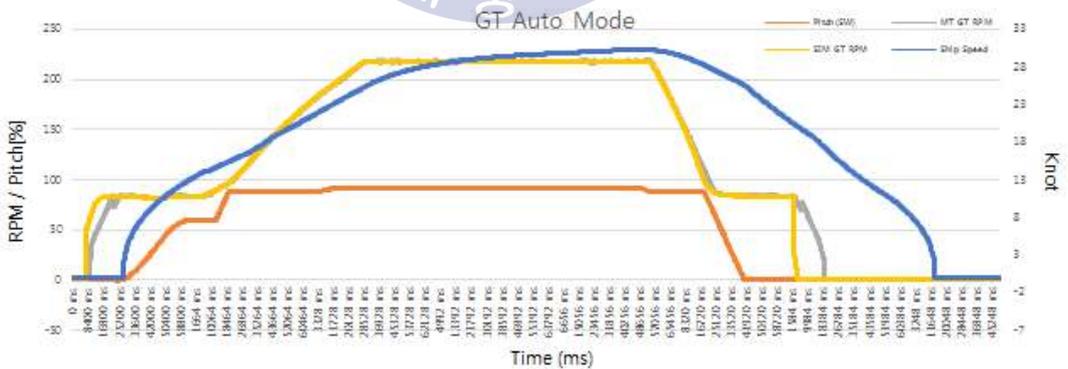
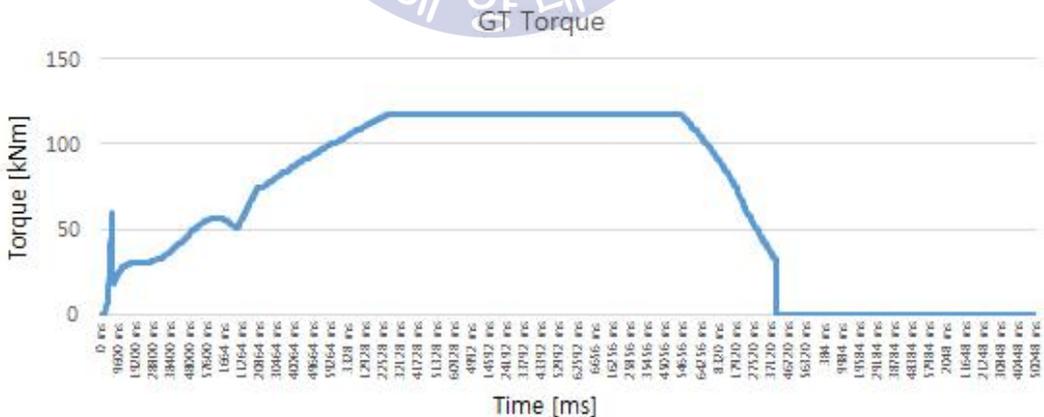


Fig. 45 GT auto mode simulation results

그림 46은 가스터빈 자동모드에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 데이터 저장은 200[ms]단위로 진행하였으므로, 실제 함정의 경우 약 2초 단위로 데이터 저장을 한 것과 동일하다. 본 시뮬레이션에서는 함정이 Standby상태로 가정한 후 3,600[ms]에 가스터빈모드를 가동한다. 가스터빈 가동 후 20,000ms에서 가스터빈의 설정 Idle 속도인 85[rpm]으로 회전하며, 시뮬레이터의 실제 가스터빈 모터도 동일하게 85[rpm]으로 유사한 출력 속도로 증가하였다. 이후, 시뮬레이터의 가스터빈축의 전자식 클러치가 붙으면서 추력이 함정으로 전달되어지게 된다. 본 연구에서 개발한 시뮬레이터의 경우 전자식 클러치가 붙게 되어 모터에 급격한 부하 증가로 회전수가 다소 감소 후 회복하는 특성을 확인 할 수 있다. 가스터빈의 Idle 속도 확보 및 클러치가 붙은 후 텔레그래프 신호에 따라 함정에 추력을 전달하기 위해 가변피치프로펠러의 피치 각이 높아지면서 함정의 속도가 함께 증가함을 확인할 수 있다. 피치 각이 약 87.7[%]이상에서 다시 가스터빈의 회전속도가 증가하면서 함속이 최대함속을 향해 높아짐을 확인할 수 있다. 또한, 사용자가 함정의 정지를 위해 텔레그래프 신호를 '0'으로 주었을 때 관성으로 인해서 함정의 추진속도가 낮아지지 않다가 외부저항에 따라 속도가 감소함을 확인할 수 있다. 아래 그림 46은 GT 자동모드에서의 축 토크[kNm]를 나타낸다.



5.3 가스터빈 수동모드

가스터빈 수동모드의 경우 자동모드와 달리 사용자가 가스터빈의 출력(%)과 가변피치프로펠러의 각(P/D)를 임의로 제어하는 모드를 의미한다. 일반적인 상황에서 사용자의 실수로 인하여 과토크 및 과속도로 장비에 무리가 될 수 있으므로 특별한 경우가 아니면 함정에서도 잘 사용하지 않는 모드이다. 사용자가 임의로 그림 47과 같이 제어하였을 때 가스터빈의 출력 및 토크는 그림 48과 같다.

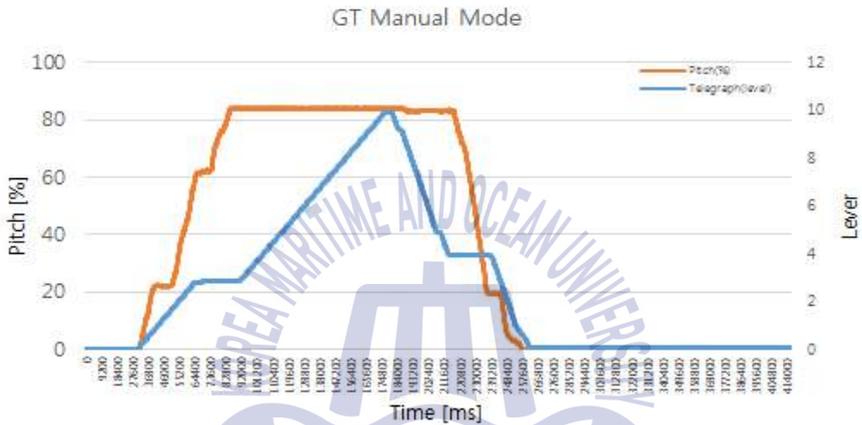


Fig. 47 GT manual mode control signal

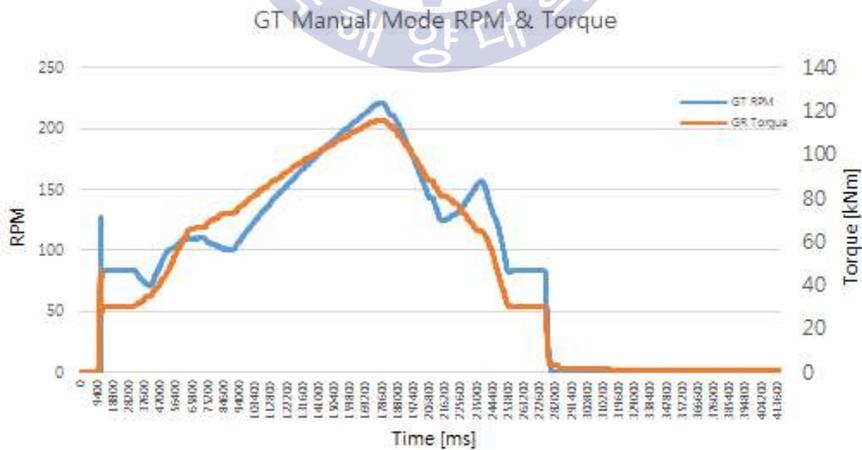


Fig. 48 GT manual mode RPM - Torque curve

시뮬레이션 결과 동일한 가스터빈 출력에서 프로펠러의 피치 값이 높아지면 회전수가 감소하며 토크가 높아지고, 피치가 고정된 상태에서 가스터빈의 출력을 높이거나 낮추면 토크와 축 회전수가 함께 증감됨을 확인 할 수 있다.

5.3 전기추진전동기 자동모드

가스터빈 모드와 동일하게 전기추진전동기의 제어모드 또한 자동모드와 수동모드가 있다. 전기추진전동기는 가스터빈에 비하여 출력이 현저히 낮음으로 저속에서 운항되어 최고속도 약 15[knot]까지 운항가능하다. 그림 49는 전기추진전동기 자동모드에서 피치 각[%], 전기추진전동기 회전수[rpm], 전기추진전동기 토크[kNm]를 나타낸다.

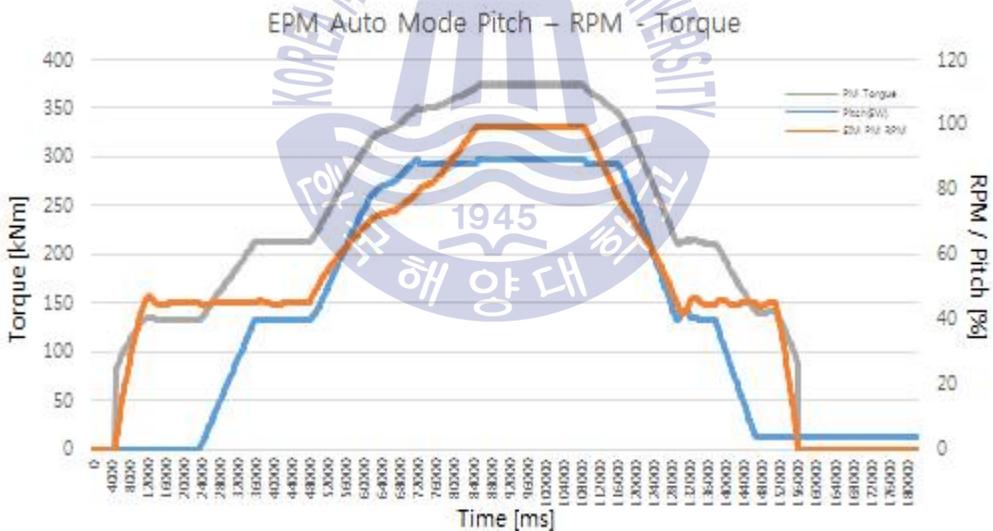


Fig. 49 EPM auto mode Pitch - RPM - Torque curve

전기추진전동기의 경우 Idle 속도는 45[rpm]이며 최대 100[rpm]에서 피치가 87.7[%]일 때 최대토크 약 315[kNm]를 내어 15[knot]이상의 함속을 나옴을 확인할 수 있다.

5.4 전기추진전동기 수동모드

전기추진전동기 수동모드는 가스터빈과 동일하게 전기추진전동기의 출력 [kW]과 프로펠러 피치각[%]을 각각 제어하는 모드이다. 그림 50은 전기추진전동기 수동모드에서 임의의 제어 값에 따른 전기추진전동기의 회전수 및 토크 그래프이다.

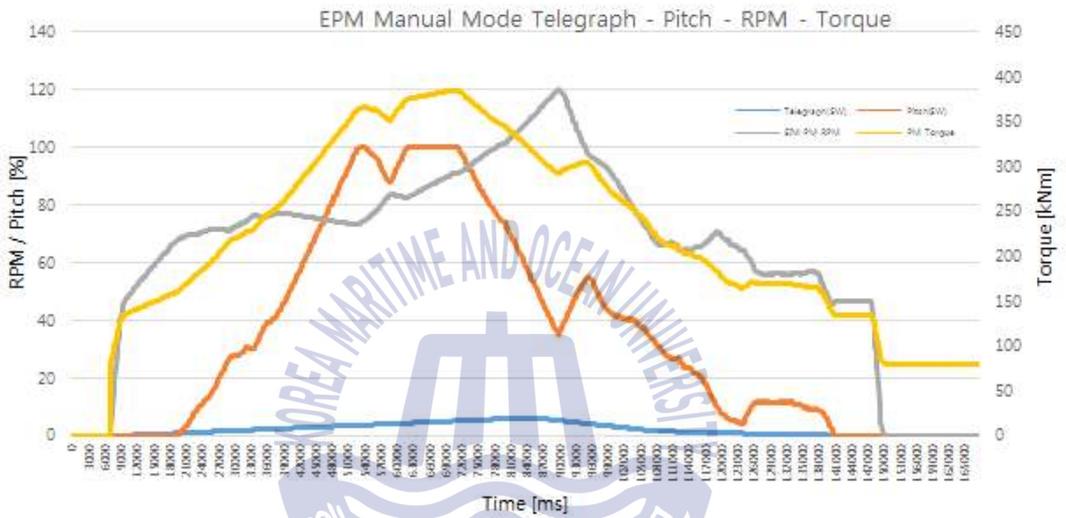


Fig. 50 EPM manual mode Pitch - RPM - Torque curve

그림 50을 보면 자동모드와 달리 사용자가 임의로 전기추진전동기의 출력 [kW]와 프로펠러 피치를 변화시키므로 전기추진전동기 회전수가 약 85[rpm] 일 때 프로펠러의 피치를 100[%]로 올리게 되면 자동모드일 때 최대 토크인 315[kNm]를 넘어 380[kNm]까지 상승함을 확인할 수 있다. 이는 전기추진전동기의 출력이 가스터빈에 비하여 작아 과토크 현상이 발생하지 않았으나, 가스터빈의 경우 고속에서 토크를 현저히 올렸을 때 과토크가 발생할 수 있는 위험이 존재하게 된다.

5.5 복합모드

최근 함정이 복합식 추진체계가 탑재되기 시작하면서 추진체계간의 결합 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 특히 전기추진전동기와 가스터빈, 전기추진전동기와 디젤엔진 등 추진 장비의 출력차이가 클 경우 안정성 등을 고려하여 사용하여야 한다.

일반적으로 전기추진전동기의 경우 정속성을 요하는 대잠모드나 훈련이나 이동 중 연료유 절감을 위해 사용된다. 저속 운항 중에 고속운항으로 전환이 필요할 때 사용자가 전기추진전동기 모드 종료 후 가스터빈 모드로 전환하는 것은 비효율적이며 전환시간 또한 많이 소모하게 된다.

본 연구에서 개발한 시뮬레이터의 경우 레버의 위치값이 0~4.5사이의 저속운항 구간일 경우 전기추진전동기를 사용하다가, 사용자가 텔레그래프를 5이상으로 올렸을 시 자동으로 가스터빈 모드로 변경되도록 제어프로그램을 개발하였다. 그림 51은 복합모드에서의 장비 전환 과정을 나타낸다.

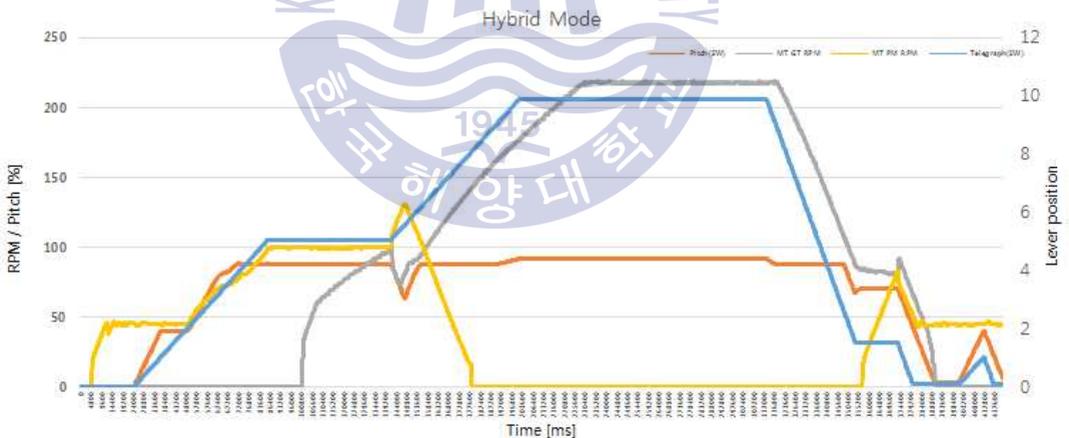


Fig. 51 Propulsion system hybrid mode curve

복합모드에서는 피치 각을 사용자가 임의로 변경할 수 없도록 구현하여 전환 과정에서 발생할 수 있는 문제를 예방하도록 하였다. 특히 전기추진전

동기와 가스터빈은 출력차이가 크게 남으로 같은 회전속도에서 프로펠러의 피치 각의 차이가 많이 나게 된다. 이는 전기추진전동기를 이용하여 추진 중 가스터빈이 전기추진전동기의 회전수와 동일하거나 같은 속도로 클러치가 붙게 되면 전기추진전동기 내부로 토크가 역으로 걸려 전기추진전동기의 파손이나 고장이 날 수 있다. 특히 가스터빈으로 운항 중 전기추진전동기로 전환하는 반대의 경우 동일 회전수에서 가스터빈이 가지는 프로펠러 피치 각이 전기추진전동기의 피치 각보다 높기 때문에 더 높은 주의가 필요하다. 그림 52는 각 추진 장비의 회전수와 클러치의 상태를 나타낸다.

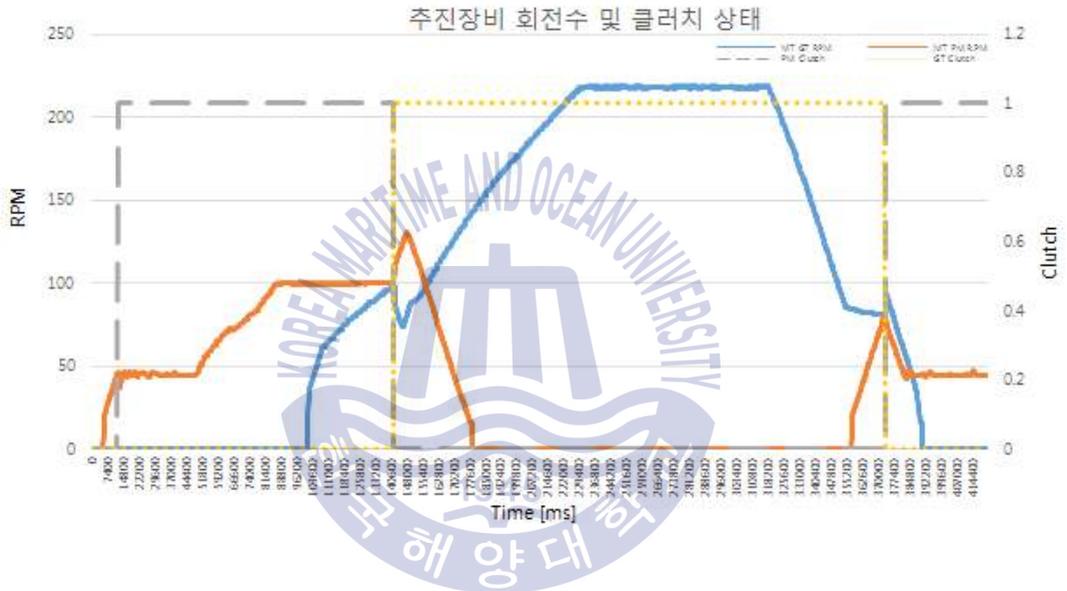


Fig. 52 Hybrid mode propulsion machine RPM & clutch state

그림 52를 보면 전기추진전동기 Idle 속도인 45[rpm]에서 전기추진전동기 클러치가 붙으면서 갑작스런 부하 증가로 인한 전기추진전동기 회전수가 감소한 후 원래 속도로 찾아가는 것을 확인할 수 있다. 이후 피치 값이 증가하면서 출력 증가로 함속이 증가 후 전기추진전동기 함속 14[knot]이상에서 가스터빈이 서서히 회전속도를 올리는 것을 확인할 수 있다.

시뮬레이션의 SSS-Clutch에 동작 원리에 따라 가스터빈의 축 회전수가 전

기추진전동기의 축 회전수 보다 빠를 때 전기추진전동기의 클러치는 개방되며 약 0.2초 이후 가스터빈의 클러치가 단락되어 동력전달이 전기추진전동기에서 가스터빈으로 바뀌게 된다. 이때 그림 53을 보면 전기추진전동기의 부하가 급격하게 사라지면서 순간 전기추진전동기의 회전수는 오르며, 반대로 가스터빈의 경우 부하가 급격하게 증가하게 되면서 가스터빈의 회전수가 순간 느려짐을 확인할 수 있다. 이때 함속의 변화는 그림 53과 같다.



Fig. 53 Hybrid mode vessel speed

그림 53에서 보면 가스터빈이 완전한 시동상태에 들어가기까지 전기추진전동기를 지속적으로 운영함으로써 전환 시간을 최소화하여 함속의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다.

제 6 장 결 론

본 논문에서는 복합식 추진 함정의 추진체계 검증을 위한 연구를 수행하였다. 해외의 경우 함정의 선도함이나 LBTS 등을 이용하여 함정의 추진체계를 검증하거나 HILS를 이용하여 함정추진체계를 검증하고 있으나, 국내의 경우 정부 예산 및 기술의 해외의존으로 인하여 복합식 추진체계에 대하여 검증이 제대로 이루어지지 못하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 추진체계 장비의 모델링을 통한 시뮬레이션과 추진기관의 출력이 구현된 장비를 이용한 시뮬레이터를 제안함으로써 복합식 추진체계의 검증도구로 활용하는 방안에 대하여 제시하였다.

함정 추진체계 시뮬레이션은 추진 장비에 대한 물리적 특성값 확보가 어려움으로 시스템 동정 중 black box 모델을 이용하여 각 추진 장비의 입력과 출력의 관계함수로 구성하였다. 또한 주요 장비의 응답성 및 내부 제어기의 특성을 구분하여 적용할 수 있도록 내부 제어기 모델을 개발하였다. 이는 추후 추진 장비가 변경되더라도 추진 장비 기본 모델 및 내부 제어기 모델을 변경하여 여러 추진체계 검증에 활용할 수 있도록 구성하였다.

시뮬레이션 결과, 가스터빈과 전기추진전동기의 실제 데이터와 추진 장비 모델 간의 오차는 각각 3.04%와 3.26%이며, 하드웨어 플랜트 모델의 시뮬레이션 결과와 실제 데이터 간의 오차는 가스터빈은 2.97%, 전기추진전동기는 3.38%의 평균 오차율을 가짐을 확인하였다.

본 시뮬레이터는 해군 함정의 설계 단계에서 추진성능을 예측함으로써 함정 추진체계 설계의 적절성 분석 및 최적화, 통합기관제어장치 제어기의 성능 및 추진체계 결합방법 최적화 등의 함정 건조 핵심기술을 확보할 수

있는 기반 기술로 활용할 수 있다.

추후 추진 장비 모델의 정밀도 향상을 위하여 본 시뮬레이터를 기반으로 함정 건조기술 및 추진성능 향상을 위해, 모델 최적화 및 함정 선형 모델 연동, 전력 계통 모델 연동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.



참고문헌

- [1] D. H. Kie, and C. Usn, A Vision For Directed Energy and Electric Weapons in the Current and Future Navy, NAVSEA (Naval Sea Systems Command), 2007.
- [2] 군함의 효율적인 동력 시스템 구성에 관한 연구, 홍용표, 2015.02, 석사 학위논문
- [3] Naval Power Systems Technology Development Roadmap (ASN-RDA-ESO-PMS 320)
- [4] H.M Back, K.S Jung, M.H Lee, C.S Cho, “A Study on the arrangement of integrated power system for warship” . *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 38, No. 9, pp. 1070-1074, 2014
- [5] 고출력 에너지 사용 체계 플랫폼 실현을 위한 해군함정의 통합 동력 시스템 발전 경향 분석
- [6] Jebsen. G.M., 2001, “Electric Warship Technology Overview” , *ONR Conference*.
- [7] Hodge. C.G. et al., 2005, “The Electric Warship” , *Transaction of IMaEE*, Vol. 108, pp.109-125.
- [8] Korea Defense Industry Association, “Defence & Technology” , *Korea Defense Industry Association*, pp.10-11, 2010
- [9] H.M Lee, “Combined Propulsion System Analysis for Naval Combatant vessels using Diesel and Gas Turbine Engine,” *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 16-21, 2011.

- [10] Dr.Timothy J. McCoy, PE, 2011, “*Naval Energy forum*”
- [11] M Altosole, G Benvenuto, M Figari & U Campora, “Real-time simulation of a COGAG naval ship propulsion system” , *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, Vol. 223, pp. 47-61, 2009
- [12] M. Altosole & M. Figari, “Effective simple methods for numerical modelling of marine engines in ship propulsion control system design” , *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, Vol. 2, pp. 129-147, 2011
- [13] 군함의 효율적인 동력 시스템 구성에 관한 연구, 홍용표, 2015.02, 석사 학위논문
- [14] 함정사업 체계공학 지침서(안), 방위사업청
- [15] 해군의 함정획득사업 개선방안:연구개발절차를 중심으로, 김종하, 2011.12, 한국방위산업학회
- [16] Dynamic Propulsion Symulation, <http://www.seastema.it/en/products.php>
- [17] HILS의 검증 <http://blog.naver.com/suresofttech/220772067577>
- [18] <http://www.etnews.com/20170817000127>
- [19] <http://www.etnews.com/20150810000234>
- [20] M.Martelli, M.F., Real-Time model-based design for CODLAG propulsion control strategies, *Ocean Engineering*, Volume 141, 1 September 2017, Pages 265-276
- [21] “Hardware-in-the-loop Simulation of Marine Electric Propulsion System” , *IEEE Conference Publications*, 2015, Zhiguo Lin, H.C, H.G, K.Z
- [22] M Altosole, G.B, M.F., Real-time simulation of a COGAG naval ship propulsion system, U.C, 2008. 11
- [23] “SIMULATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF A CODLAG PROPULSION PLANT” , *Warship 2010: Advanced Technologies in Naval*

Design and Construction, London, UK , 2010.06, M.Altosole, M.F, M.V, S.M, A.M

[24]<https://namu.wiki/w/%EB%8C%80%EA%B5%AC%EA%B8%89%20%ED%98%B8%EC%9C%84%ED%95%A8>

[25] 조권희, 2016. 해기사를 위한 造船工學

[26] Christopher Ryan Holsonback, B.S., 2007, Dynamic thermal-mechanical electrical modeling of the integrated power system of a notional all-electric naval surface ship, master, The University of Texas at Austin: Science in Engineering

[27] Andreas Torp Karlsen, 2012. On modeling of a ship propulsion system for control purposes, *NTNU*

[28] F. Balsamo , F. De Luca , C. Pensa , “Continuous Optimization of Controllable Pitch Propellers for Fast Ferries ” , *IX HSMV Naples* 25 - 27 May, 2011

[29] Andreas Torp Karlsen, 2012. On modeling of a ship propulsion system for control purposes, *NTNU*

[30] MAN Diesel & Turbo, Basic principles of ship propulsion, Dec. 2011

[31] <http://www.instrumentation.co.za/article.aspx?pkarticleid=4108>

감사의 글

설렘과 두려움으로 시작한 석사과정, 학부 4학년부터 근 3년간의 연구실 생활에 도움을 주셨던 분들께 이 짧은 여백을 빌려 감사의 마음을 전하고자 합니다.

학문적으로 미숙한 저를 제자로 받아주시고, 연구실에서 다양한 경험을 쌓을 수 있도록 도와주신 오진석 교수님 진심으로 감사드립니다. 제자들에게 많은 기회와 지원을 아끼지 않으시고, 때때로 타이르고 꾸짖으시며 부족한 저를 이끌어 주신 우리 지도교수님. 앞으로 건강 챙기셔서 교수님의 열정적인 모습을 오래 봤으면 좋겠습니다.

또한, 본 논문이 완성되기까지 세심한 검토와 아낌없는 피드백을 주신 유희한 교수님, 소명옥 교수님. 심사과정에 있어 사고도 치고, 부족한 논문을 드렸지만 항상 밝은 웃음으로 격려해주셔서 감사합니다. 그리고 연구실 생활 하는데 있어 많은 도움이 된 기본 소양을 쌓아주신 제어과 교수님들 감사합니다.

연구실에 처음 들어왔을 때 기본적인 이론들을 세미나해주시고, 실험도 참여시킬 뿐만 아니라 늦은 밤까지 연구하는 실원들을 위해 간식과 야식으로 몸과 뇌를 살찌우게 해주신 이현석 실장님. 처음 서브로 과제에 참여하며 함께 연구를 진행하면서 옆에서 배울 점이 많았던 재희언니. 굶은 일 마다하지 않고, 특히 힘쓰는 일은 도맡아 했던 민욱선배. 연구실에 대한 열정으로 후배를 성심껏 지도한 영민이. 1년동안 룸메로 같이 지내면서 내 푸념과 고민을 들어주고, 함께 고민해준 민지. 구미 출장에서 많은 의지가 되고 항상 후배에 대한 사랑이 가득한 성영선배. 졸업 후에도 학문의 끈을 놓지 않고 주말마다 연구실에서 실험하고 알고있는 것을 후배들에게 알려주시려고 하는 지윤선배. 3년동안 연구실 생활 잘 하도록 도와주시고, 항상 밝게 인사해주신 양향권 선배님, 함연재 선배님을 비롯하여 졸업하신 선배님들,

지금의 실원들, E2E 친목회 선배님들께 감사의 인사를 드립니다. 논문 작성하는데 있어 해군에 대한 지식을 쌓을 수 있도록 함께 연구를 진행한 한화분들 너무 고생하셨고 감사합니다.

전화 한 통이면 술 한잔하러 나와주고 연구실 생활에 있어 든든한 버팀목이었고 항상 웃게 해준 용제, 우리 제어과 친구들. 주정받아주고 헛소리하면 맞받아치며 웃음 많은 우리 12학번 기린선아, 짱구인석, 다크환우. 영도에 있느라 자주 보지 못해서 보고싶고, 항상 내편 들어준 고등학교 친구들. 다들 너무너무 고맙고 사랑합니다.

마지막으로 우리 사랑하는 가족. 장녀로써 집에 도움되지 못해도 학업이 끝날 때까지 묵묵히 기다리고, 지원해주셔서 감사합니다. 힘든 기색내지 않고 고군분투하시는 아빠. 그런 아빠를 힘낼 수 있도록 서포트해주고 공부하는 딸의 뒷바라지까지 해주신 엄마. 툭툭거리면서 내 부탁 들어주는 성격 좋은 하영이. 한창 클 때 가족 품이 아닌 제주도에서 홀로 커가고 있는 막내 태현이. 해운대에서 영도까지 전화 한통에 손녀와 점심먹으러 와주신 외할아버지. 자주 전화드리진 못했지만 매번 반갑게 맞아주신 친할머니. 막상 애살 있게 다가가지 못하는 저 대신 먼저 안부 묻고 하는 일 잘 되게 빌어주신 외가. 친가 식구들 다들 너무 감사드립니다.

이 외에도 많은 분들의 도움을 받아 이 논문을 마칠 수 있었지만 일일이 감사의 인사를 드리지 못하지만 그동안 연구과제를 무사히 잘 진행되도록 도와주시고, 저를 야끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한번 감사드립니다.