

추진시스템 검증을 위한 추진시스템 장비 모델 및 시뮬레이터 개발

손나영¹ · 이현석² · 오진석[†]

(Received December 12, 2018 ; Revised January 10, 2019 ; Accepted January 28, 2019)

Development of propulsion equipment model and simulator for verification of propulsion system

Na-Young Son¹ · Hun-Seok Lee² · Jin-Seok Oh[†]

요약: 전력변환기술의 발달로 추진모터를 사용하는 하이브리드 추진시스템이 최근 군함에 적용되어지고 있다. 이러한 하이브리드 추진시스템은 기계식 추진체계에 비해 대잠능력, 생존능력 및 에너지 효율과 같은 장점을 지닌다. 그러나 하이브리드 추진시스템은 설계 및 생산이 복잡하고 연동장비의 수가 증가함에 따라 연동과정에서 발생할 수 있는 많은 문제점으로 인하여 추진시스템의 검증은 필수적이다. 즉, 안정적인 함정 운용을 위해 추진시스템 제어·감시 장비인 ECS(Engineering Control System)의 신뢰성은 매우 중요하다. 이러한 이유로 군함에 적용되어지고 있는 ECS는 L3, SEASTEMA와 같은 해외 전문회사에 의존하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 RT-HILS(Real-Time Hardware In the loop System)기반의 ECS를 검증하기 위한 시뮬레이터를 구성한다. 시뮬레이터는 가스터빈, 추진모터, 감속기어, 가변피치 프로펠러에 대한 모델을 개발하여 적용하였으며, 개발된 시뮬레이터와 실제 장비의 데이터 값을 비교·분석하였다. 시뮬레이션 결과, 가스터빈 및 추진전동기 개발 모델과 실제 데이터 간의 오차는 5% 이내로 확인되었다. 개발 시뮬레이션 모델은 미래 통합형 추진시스템 구축단계 이전에 성능 및 신뢰성 검증에 활용될 수 있다.

주제어: 통합기관제어, 가스터빈, 추진전동기, 감속기어, 가변피치프로펠러, HILS (Hardware In the Loop System)

Abstract: With the development of the power conversion industry and technology, a hybrid propulsion system using a propulsion motor such as CODLOG (COMbined Diesel-eLEctric Or Gas turbine), CODLAD (COMbined Diesel-eLEctric And Diesel) has been applied to recently warship. Compared to mechanical propulsion system, these Hybrid propulsion system has advantages such as anti-submarine ability, viability and energy efficiency. However, the hybrid propulsion system is complicated in design and production, and as the number of interlocked devices increases, there are many problems that may occur in the interlocking process, And verification of the propulsion system and countermeasures are necessary. These hybrid propulsion system must be equipped with reliable the ECS (Engineering Control System) for stable battleship operation. An ECS is a very important equipment for battleship operation, and it controls and monitors the propulsion system. Therefore, reliability is the most important thing for the ECS. For this reason, the ECS of a warship equipped with a hybrid propulsion system depends on foreign professional companies such as L3, SEASTEMA. In this research, we intend to develop herein a RT-HIL (Real-Time Hardware In the Loop) simulator that validates the ECS using NI's cRIO and LabVIEW. Theses model was developed based of system identification technique for four types of equipment: gas turbine, propulsion motor, reduction gear and Controllable. The developed simulator was designed based on the CODLOG propulsion system and compared and analyzed the actual equipment data with the developed simulator data As a result of the simulation, the error between the actual data of the gas turbine and the electric propulsion motor and the model has an error within 5%. This simulation can be used for validation and performance verification before the construction phase of the combined - type propulsion system in the future.

Keywords: ECS (Engineering control system), Gas turbine, Propulsion motor, CPP (Controllable pitch propeller), HILS (Hardware in the loop system)

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3627-476X>): Professor, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: ojs@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4283

1 Junior Engineer, Hanwha system, korea, E-mail: sny3569@naver.com, Tel: 054-460-8711

2 Ph.D candidate, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: gar4153@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4866

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

과거 해군의 전투력은 인간의 노동력이나 화약무기를 바탕으로 구성되어 왔으나 과학기술의 발달에 따라 미사일 기반의 무기체계를 갖추면서 전자 장비를 이용한 무기체계로 변화되어왔다[1].

이러한 변화는 최첨단 탐지체계 및 고성능 전자 장비 등의 무기와 센서를 지원할 수 있는 전력 체계의 발달을 야기한다. 미 해군의 차세대 해군 함정 로드맵에 따르면 기계식 추진체계기반에서 복합식 추진체계 이후, 통합전력시스템(IPS, Integrated Power System)을 적용할 것으로 보인다. 이는 함정의 소요전력 증가에 따라 그 필요성이 높아지고 있는 것으로 보인다[2][3].

최근 전력변환사업 및 기술의 발달에 따라 추진전동기(EPM, Electric Propulsion Motor)를 이용한 복합식 추진체계 및 전기식 추진체계 추진방식이 적용되어지고 있다[4][5]. 이러한 추진전동기를 적용한 추진체계를 사용함으로써 기존의 기계식 추진체계에 비하여 가지는 장점으로 수중방사소음의 절감으로 인한 대잠능력, 생존력 강화 및 전력운영의 유연함 등이 있다. 또한 함정의 경우 작전 및 훈련 상황에 따라 25노트 이상의 높은 속력을 요구하지만 고속으로 운항하는 시간 및 빈도가 매우 낮은 반면 10~20노트의 저속에서 운항하는 빈도는 매우 높다[6][7]. 내연기관 엔진 및 가스터빈만을 추진 장비로 사용하는 단일 기계식 추진체계의 경우 저속에서 효율이 저조하지만 전기추진모터를 적용한 하이브리드 추진체계에서는 모든 속도구간에서 높은 효율로 운항이 가능하다.

그러나 이러한 하이브리드 추진시스템은 기계식 추진시스템에 비해 설계 및 생산이 복잡하고 연동 장비의 수가 증가함에 따라 연동 공정에서 발행할 수 있는 문제점이 많아 추진시스템에 대한 검증이 필수적이다. 특히 통합기관제어장치인 ECS(Engineering Control System)는 함정 운용에 매우 중요한 장비로 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 이유로 현재 하이브리드 추진시스템이 적용된 함정에 적용되는 통합기관제어장치는 L3, SEASTEMA와 같은 외국 전문 회사에 의지하고 있는 실정이다. 이러한 주요 기술의 국외 의존도는 국내 함정기술의 발달을 저하시키고 있으며 나아가 국내 함정 기밀정보의 해외유출로 인한 보안 문제도 함께 발생할 수 있다.

본 연구에서는 cRIO 및 LabVIEW를 활용하여 주요 추진 장비 Modeling을 통한 CODLAG(COMBINED DIESSEL-eLECTRIC OR Gas turbine) 추진체계의 ECS 검증 및 함정의 건조 이전에 발생할 수 있는 문제점을 사전에 분석 및 검증하기 위한 RT-HILS(Real-Time Hardware In the Loop System) 기반의 시뮬레이터를 개발한다.

2. 함정의 추진체계

함정의 추진체계는 추진기관의 조합에 따라 다양한 형태를 갖춘다. 디젤엔진이나 가스터빈과 같이 기계식 추진 장비 중 하나의 추진 장비를 적용한 추진체계를 단일 기계식

추진체계라 하며, 두 개 이상의 기계식 추진체계 또는 기계식 추진체계와 전기모터 등의 전기식 추진체계를 혼용하여 적용한 것을 복합식 추진체계 그리고 추진 장비로 전기모터를 사용하며 복수의 발전기 또는 배터리 등을 이용한 추진체계를 완전전기추진체계 또는 통합전력시스템이라 한다. 복합식 추진체계는 추진 장비의 구성에 따라 아래 Table 1과 같이 분류할 수 있다.

Table 1: Types of hybrid propulsion system

Hybrid Propulsion System
CODOG(COMBINED Diesel engine Or Gas turbine)
CODAG(COMBINED Diesel engine And Gas turbine)
COGAG(COMBINED Gas turbine And Gas turbine)
CODAD(COMBINED Diesel engine And Diesel engine)
CODLAG(COMBINED Diesel-eLECTric And Gas turbine)
CODLOG(COMBINED Diesel-eLECTric Or Gas turbine)

과거 해상 전투에 있어 높은 기동성은 함정의 생존성을 높여주었으나 현대의 전투에서는 최첨단 탐지체계를 활용하여 전투를 수행하므로 적에게 발각 위험을 낮추는 수중방사소음 저감이 함정의 속도만큼 중요하게 되었다[2]. 또한, 첨단 장비의 탑재는 함정의 소요 전력량을 높이기 됨에 따라 여유전력을 확보할 필요가 있어 추진전동기를 탑재한 복합식 추진체계의 필요성은 더욱 높아지고 있다.

본 논문에서 개발하고자 하는 추진체계 장비 모델 및 시뮬레이터는 대구급 호위함인 FFX(Future Frigate eXperimental)함을 CODLOG 추진체계기반의 가상함정을 대상으로 한다. 대상함정은 가스터빈 1기, 추진전동기 2기, 클러치 2기, 가변피치프로펠러 2기로 구성되어 Figure 1과 같이 구성되며 주요 장비 사양은 Table 2와 같다.

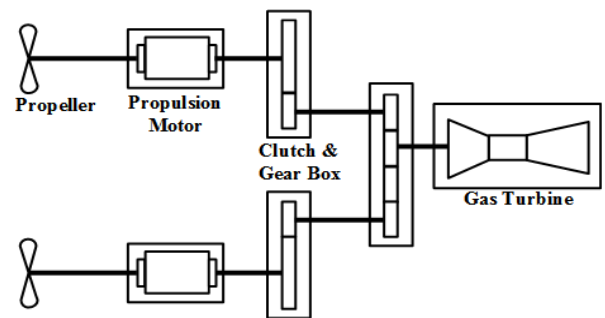


Figure 1: Configuration of propulsion system (CODLOG)

Table 2: Specification of FFX_III [8]

FFX-III Specification	
Displacement Full	3,592 ton
Displacement Light	2,800 ton
Max Speed	30 knot(55.5km/h)
Gas turbine	Rolls-Royce MT30 1EA
Propulsion Motor	unknown 3.5MW 2EA

3. 추진 장비 모델링

함정 및 함정 추진체계의 모든 동특성을 모델링하기 위해서는 모든 장비 및 특성에 대한 자료가 확보되어야 한다. 이러한 주요 장비의 자료는 제조사의 보안상 문제로 확보의 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 시스템 동정(SI, System Identification)을 이용하여 비교적 적은 데이터로 시뮬레이션 모델을 구현하고자 한다. 시스템 동정은 모델 종류에 따라 White box model, Gray box model, Black box model로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 Figure 2와 같이 black box model을 적용하여 구현한다.

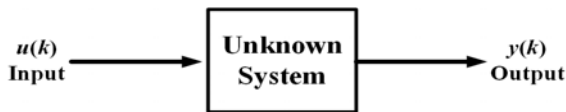


Figure 2: Black box model (system identification)

시스템 동정의 black box model은 입력($u(k)$) 데이터와 출력($y(k)$) 데이터의 응답특성으로 시간 영역에 대한 모델을 알아낼 수 있다.

3.1 선속 모델

함정의 속력은 대상 함정인 FFX-Batch III의 ROC (Requirement Of Concept)에 따라 35,000 kW에서 최대 속도 30 knot이상의 속력을 가질 수 있도록 모델을 설계한다. 함속과 출력의 관계는 Froude 상사법칙과 Reynold 상사법칙을 적용하여 식 (1) 및 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 함정의 저항성분 중 조파저항과 와류저항 및 공기저항은 무시하였다.

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

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

여기서 R_f 는 마찰저항, f 는 실험계수, S 는 함정의 침수 표면적, V 는 함속, IHP 는 지시마력, D 는 함정의 배수량을 나타낸다. 즉, 함정의 마찰저항은 선속의 거듭제곱에 비례하며 침수표면적의 경우 배수량의 2/3승에 비례한다.

Figure 3은 대상 모델선박의 속력에 따른 필요 출력을 나타낸다.

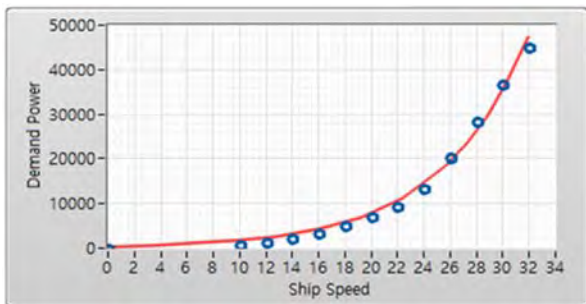


Figure 3: Ship speed-power curve

3.2 가스터빈 모델

본 논문에서는 Rolls-royce사의 MT30을 대상으로 가스터빈 모델을 시뮬레이션 하였다. MT30 가스터빈은 최대 3,600 rpm에서 약 40 MW의 출력을 내며 군함 및 항공기 등 다양하게 적용된다[8], 또한, MT30 가스터빈의 출력은 본 논문에 적용하고자 하는 함정의 최대속력에 필요한 출력을 갖추므로 적합하다. Table 3는 MT30 가스터빈의 특성을 나타내며, Figure 4은 가스터빈의 출력 관계를 나타낸다.

Table 3: MT30 gas turbine model factors and coefficients

Input factors	Value
ECS power demand	0~100 [%]
Internal power demand	0~40 [MW]
Feedback power	0~40 [MW]
Feedback GT rpm	0~3,500 [rpm]
CPP P/D	0~100 [%]
Output factors	Value
External power	0~40 [MW]
Shaft torque	0~500 [kNm]
GT RPM	0~3,500 [rpm]
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	

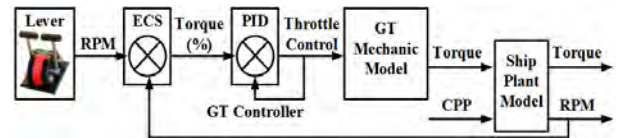


Figure 4: Gas turbine power diagram

가스터빈 모델은 ECS로부터 내려오는 TIC(Throttle Input Command)입력신호에 따라 가스터빈 출력을 변환시킨다. 이러한 가스터빈 출력은 함정 모델 및 가변피치프로펠러의 P/D(Pitch/Diameter ratio)값에 따라 축토크 및 축회전수를 도출한다. 가스터빈의 출력-축속도-토크의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P[W] = T[Nm] \times w[rad/sec] \quad (3)$$

$$= T[Nm] \times n[rpm] \times \frac{2\pi}{60}$$

식 (3)을 기본수식으로 하여 가스터빈 TIC 값에 따른 지연 PID제어기를 설계하여 토크 및 축회전수, 출력을 나타내는 가스터빈 모델을 적용하였다. 토크[T]는 가스터빈에서 발생하는 토크와 프로펠러 피치 각에 의해 발생하는 토크를 고려하여 수학적 모델을 구현하였으며 가스터빈과 축의 기어비는 15.54를 적용하였다. Figure 5는 가스터빈의 블록 다이어그램을 나타낸다.

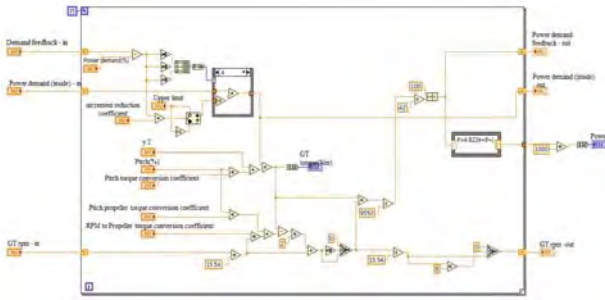


Figure 5: Gas turbine model block diagram

3.3 추진전동기 모델

대상 함정인 FFX Batch-II 함정모델의 경우 2축 2기의 추진전동기를 탑재하는 모델을 구현하여야 하나, 본 논문에서는 시뮬레이션의 단순화를 위해 1대의 추진전동기에 대하여 모델을 구현하되 두 배의 설계출력을 갖는 추진전동기를 모델을 적용하였다. Figure 6과 Figure 7은 추진전동기 모델 추력 및 블록 다이어그램을 나타낸다.

Table 4: Propulsion motor specification

Item	Specification
Type	3,592 ton
Rating Power	2,800 ton

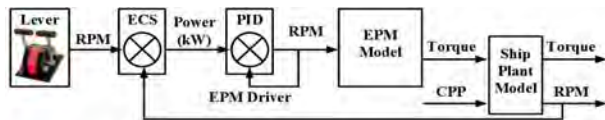


Figure 6: EPM power diagram

추진전동기 모델은 ECS로부터 출력명령을 받아 축 속도 및 축 토크를 출력하도록 하며 출력범위는 0 ~ 3,600 kW이며, 축 속도는 0 ~ 110 rpm, 토크범위는 0 ~ 340 kNm로 적용하였다.

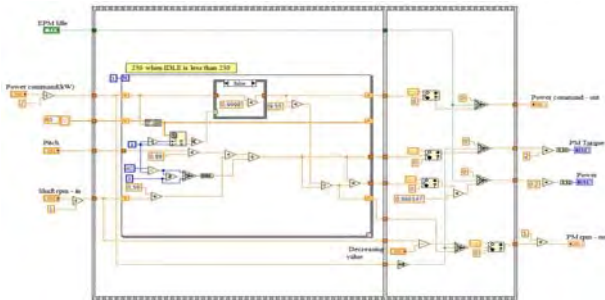


Figure 7: EPM model block diagram

가스터빈과 추진전동기는 각 장비의 연동 특성을 예측하기 위해 열역학적 모델이 아닌 제어 값에 따른 제어동작 및 출력 특성을 반영하도록 단순화된 모델을 적용하였다. 또한 제어 명령에 따른 기계 및 전기적 지연을 위해 PID제어를 이용한 내부 제어기 모델을 적용하여 출력 및 속도변화를 시간에 따른 모델로 구현한다.

3.4 가변피치 프로펠러

프로펠러는 추진기관으로부터 나오는 출력을 축계 및 함체에 전달하여 추력을 얻도록 한다. 프로펠러의 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($\rho[kg/m^3]$)로 식 (4), 식 (5), 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[9]-[11].

$$P_p = 2\pi Q_p = 2\pi K_Q \rho D^5 N_p^2 \quad (4)$$

$$T_p = K_T \rho D^4 N_p^2 \quad (5)$$

$$Q_p = K_Q \rho D^5 N_p^2 \quad (6)$$

이러한 프로펠러의 특성은 아래 매개 변수에 의해 결정된다. 여기서 V_A 는 함정의 전진속력이다. 가변피치프로펠러의 경우 차원계수 K_P 와 K_Q 는 전진계수 J 와 프로펠러 블레이드의 방향각 P 에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$\text{Forward coefficient}[J] = V_A / (N_p D) \quad (7)$$

$$\text{Trust coefficient}[K_T] = T_p / (\rho N_p^2 D^4) \quad (8)$$

$$\text{Torque coefficient}[K_Q] = Q_p / (\rho N_p^2 D^5) \quad (9)$$

$$\text{Propeller efficiency}[n_p] = V_A T_p / 2\pi N_p Q_p = J / 2\pi (K_T / K_Q) \quad (10)$$

$$K_Q = K_Q(J, P) \quad (11)$$

$$K_T = K_T(J, P) \quad (12)$$

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 따라 J 와 프로펠러의 회전속도에 따라 지속적으로 변화하게 된다. 따라서 본 논문에서는 가변피치프로펠러의 특성을 Table 5 및 Figure 8과 같이 가정하여 시뮬레이션을 진행한다.

Table 5: Controllable pitch propeller specification

Item	Specification
Type	CPP
Number of blade	5
Propeller diameter	4.3 m
Pitch to diameter ration	1.8
Area ration	0.57

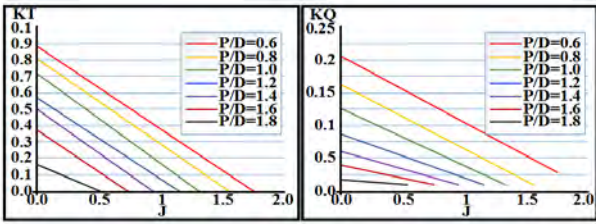


Figure 8: CPP characteristic curve

Figure 9는 토크와 속도, P/D를 출력하는 가변피치 프로펠러의 블록다이아그램이다.

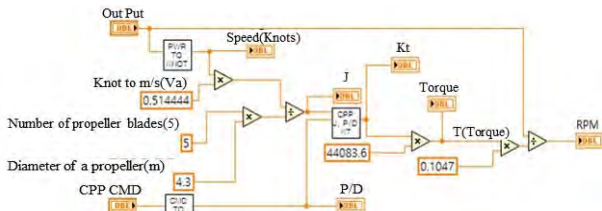
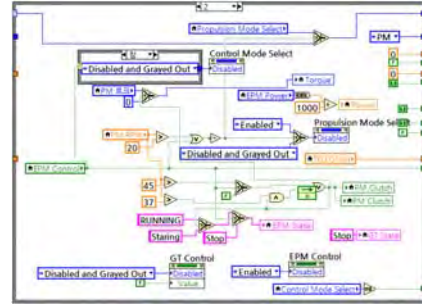


Figure 9: CPP model block diagram

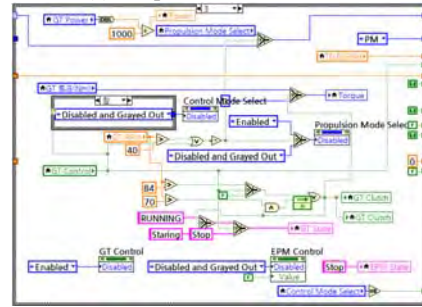
3.5 감속기어 및 클러치

감속기어는 주 추진기관의 동력전달 및 동력전환 등의 기능을 수행한다. 또한 함정의 경우 프로펠러의 회전수가 낮을 때 효율이 높으므로 중속 및 고속기관의 속력을 낮추고 토크를 높이는 역할을 수행한다.

최근 개발되는 감속기어의 경우 저속구간을 제외한 대부분의 구간에서 98%이상의 에너지 전달효율을 가지므로 본 논문에서는 전달효율을 100%로 가정하여 모델을 적용한다. 또한 하이브리드 추진기관이 적용됨에 따라 함정 추진 장비의 안정적인 전환을 위해 SSS-Clutch 동작절차를 모델링하여 적용한다.



(c) Propulsion motor mode



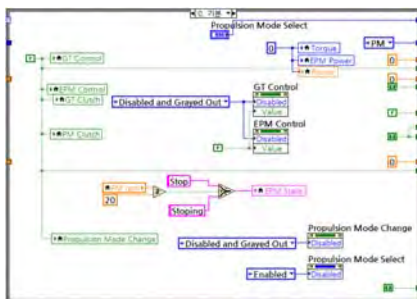
(d) Gas turbine mode

Figure 10: SSS-clutch model block diagram

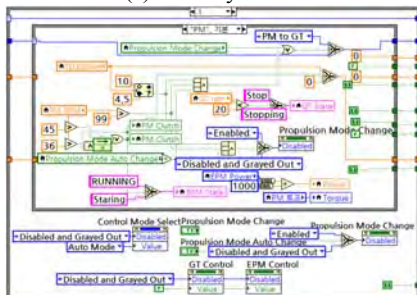
Figure 10은 SSS-clutch모델의 운전 모드별 블록다이아그램을 나타낸다.

4. 추진체계 시뮬레이션

본 논문에서는 함정 추진체계의 검증 및 ECS 검증을 위한 가상의 함정 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션은 함정의 추진 장비모델과 추진체계를 가시적으로 보여줄 수 있는 하드웨어 유닛과 가상의 ECS로 Figure 11과 같이 구성한다.



(a) Standby mode



(b) Hybrid mode

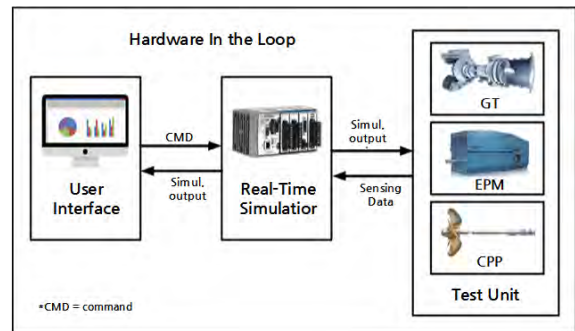


Figure 11: Propulsion system simulator layout

Table 6: Propulsion system simulator hardware specification

Model	Name	EA	Description
ECS& Propulsion equipment	NI Crio-9035	1	1.3GHz, 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
Gas turbine	MY1020ZXFH	2	24V 450W DC motor
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

시뮬레이션 및 시뮬레이터의 제작은 NI사의 LabVIEW와 Real-Time기반의 OS를 활용한 CRIO를 활용하여 진행하였다. 시뮬레이터 사양은 Table 6과 같다.

시뮬레이션의 제어명령을 받는 각 추진 장비 및 합체 모델은 합정의 축회전수, 토크, 함속 등을 나타내게 되며 신호 및 추력의 전달체계는 Figure 12과 같다.

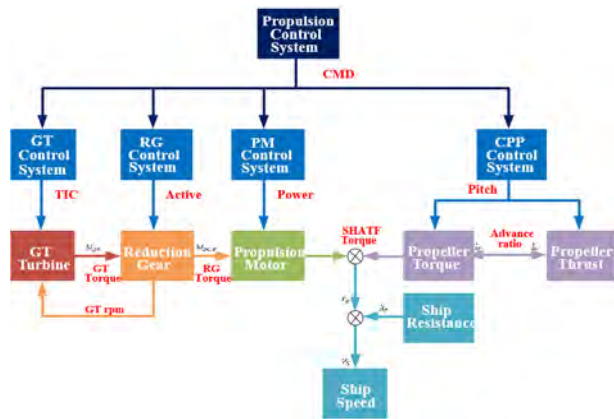


Figure 12: Propulsion

본 논문에서는 개발한 추진체계 장비 모델 및 시뮬레이터의 성능을 시험하기 위해 시뮬레이션을 통한 장비 특성과 시뮬레이터의 특성을 비교 및 분석한다. 실제 합정의 동특성을 분석하기 위해서는 열역학적, 동역학적 모델이 필요하다. 그러나 모델의 구현을 위해 많은 변수들에 대한 정확한 값을 알아야 하며 시뮬레이션에 많은 시간이 필요하여 실시간 시뮬레이션에 적용하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 시스템 동정기법(SI)의 Black box 모델을 활용하여 실제 추진 장비의 입력 및 출력 값을 바탕으로 전달함수의 신뢰성을 높이고 모델을 단순화하여 실시간 운영체제에 적합하도록 개발하였다.

개발한 시뮬레이션은 가스터빈 기본모델, 가스터빈 내부 제어기 모델, 추진전동기 기본모델, 추진전동기 내부 제어기 모델, 가변피치프로펠러 모델, 기관통합제어장치(ECS)

모델, 데이터 측정 및 저장 프로그램으로 구성되며, 이를 하드웨어적으로 표현하기 위해 전동기 2대, 전자식 클러치 1대, 베벨기어 2대, 포토센서, 베어링 등으로 Figure 11과 같이 구성하였다. 시뮬레이션 루프 속도는 실제 합정시간의 1/10 scale로 진행하여 사용자가 보다 빨리 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있도록 구현하였다.

5. 시뮬레이션 결과

5.1 가스터빈 자동모드

가스터빈 자동모드의 경우 최대 함속 30 knot 이상을 낼 수 있으며 시뮬레이션 결과 장비 데이터와 유사한 출력 특성을 나타냄을 확인하였다.

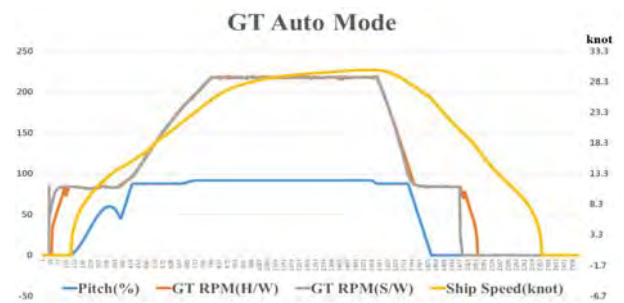


Figure 13: Gas turbine auto mode simulation results

가스터빈의 시뮬레이션 결과인 Figure 13을 보면 가스터빈 가동 후 20,000 ms후에 가스터빈 설정 Idle 속도인 85 rpm으로 실제 장비 데이터와 유사한 출력 속도로 증가하였으며, 시뮬레이터의 가스터빈과 축계를 연결하는 전자식 클러치가 붙으면서 추력이 합정으로 전달됨을 확인하였다. 또한 본 논문에서 개발한 시뮬레이터의 경우 전자식 클러치가 붙게 되면 모터에 급격한 부하 증가로 인하여 회전수가 다소 감소하지만 곧 회복하는 특성을 확인할 수 있다. 또한 사용자가 합정의 정지를 위해 텔레그래프(TIC) 신호를 '0'으로 주었을 때 합정의 관성 및 외부저항에 따라 함속이 점차 감소함을 확인할 수 있다.

5.2 가스터빈 수동모드

가스터빈 수동모드는 자동모드와 달리 사용자가 가스터빈의 출력과 가변피치프로펠러의 각을 임의로 제어하는 모드이다. 일반적인 상황에서 사용자의 실수로 인하여 과토크 및 과속도로 인한 장비의 손상을 유발할 수 있기 때문에 특별한 경우가 아니면 함정에서 잘 사용되지 않는 모드이나 수동 제어에 따른 상태 확인을 위해 시뮬레이션을 진행하였다.

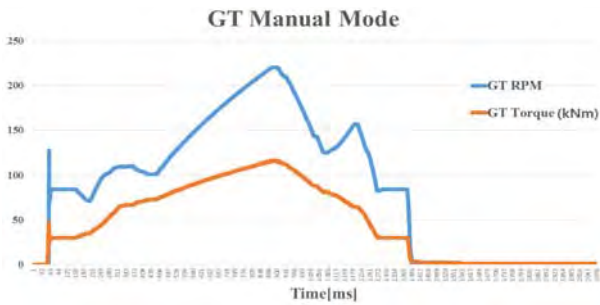


Figure 14: Gas turbine manual mode simulation results

Figure 14와 같이 가스터빈 수동모드의 시뮬레이션 결과 동일한 가스터빈 출력에서 프로펠러의 피치 값이 높아지면 회전수가 감소하며 토크가 높아지고, 피치가 고정된 상태에서 가스터빈의 출력을 높이거나 낮추면 토크와 축회전수가 함께 증감됨을 확인할 수 있다.

5.3 추진전동기 자동모드

추진전동기의 경우 가스터빈에 비하여 낮은 출력을 가지므로 최대 약 15 knot까지 운항할 수 있다. 자동모드의 경우 가스터빈과 동일하게 텔레그래프 값에 따라 자동으로 추진전동기의 회전수 및 가변피치프로펠러의 각을 제어하게 된다.

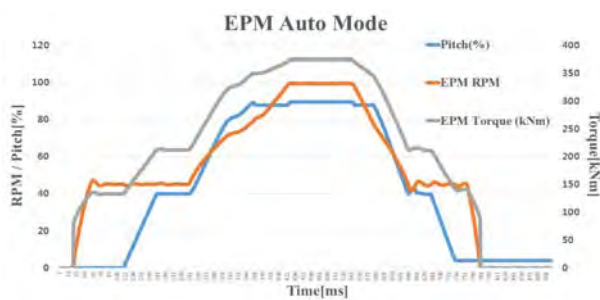


Figure 15: Propulsion motor auto mode simulation

Figure 15의 시뮬레이션 결과를 보면, 추진전동기의 자동모드의 경우 Idle 속도는 45 rpm이며 최대 100 rpm에서 가변피치프로펠러의 피치 각이 87.7 %일 때 최대토크인 315 kNm를 내어 15 knot의 함속을 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

5.4 추진전동기 수동모드

추진전동기의 수동모드의 경우 가스터빈의 수동모드와 동일하게 사용자가 추진전동기의 출력 및 프로펠러의 피치각을 임의로 제어할 수 있는 모드이다.

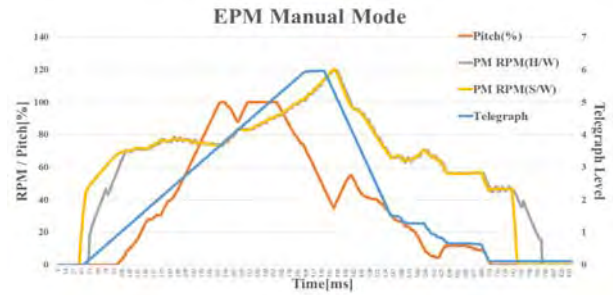


Figure 16: Propulsion motor manual mode simulation

추진전동기가 85 rpm일 때 프로펠러의 피치를 100 %로 올리게 되면 자동모드일 때의 최대토크인 315 kNm를 넘어 380 kNm까지 상승함을 확인할 수 있다. 프로펠러축에 걸리는 380 kNm 토크는 과토크 범위를 넘지 않으므로 안정적으로 함정의 운항이 가능함을 확인할 수 있다.

5.5 복합추진모드

최근 함정의 수중방사소음 저감 및 연료유 효율성 향상을 위해 복합식 추진체계가 탑재되고 있다[2][6]. 이러한 복합식 추진체계에 탑재되어지는 추진전동기는 가스터빈 및 디젤엔진에 비하여 출력차이가 크기 때문에 연동에 많은 주의가 필요하다.

본 논문에서는 시뮬레이션 및 시뮬레이터를 이용하여 추진장비의 전환에 따른 토크 및 함속의 변화 등을 확인하였다. 시뮬레이션은 텔레그래프의 레버 값이 0 ~ 4.5 사이의 경우 저속운항 구간으로 추진전동기를 주 추진 장비로 사용하며, 텔레그래프 레버를 5 이상으로 올렸을 때 자동으로 가스터빈 모드로 전환되도록 하였다.

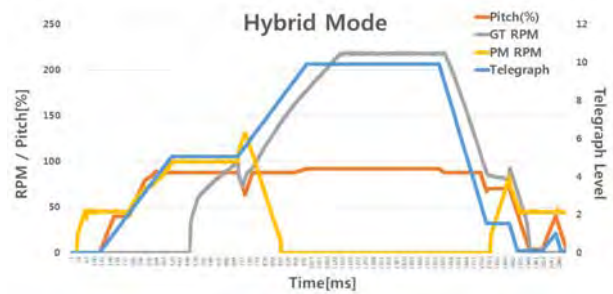


Figure 17: Hybrid mode simulation

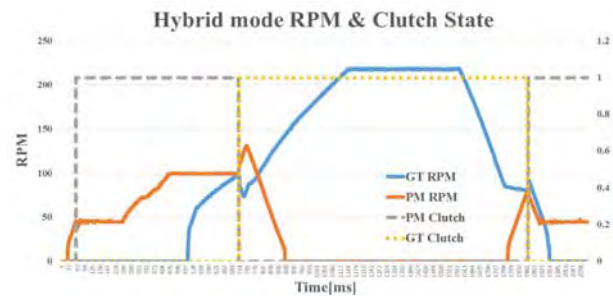


Figure 18: Hybrid mode simulation RPM & clutch state

복합모드에서는 피치 각을 사용자가 임의로 변경할 수 없도록 하여 전환 과정에서 발생할 수 있는 문제를 예방하도록 하였다. 특히 추진전동기와 가스터빈은 출력차가 크기 때문에 같은 회전속도에서 다른 토크를 내기 위해 프로펠러 피치 각의 차이가 많이 난다. 이러한 피치 각의 차이는 전환 시 여러 문제를 야기할 수 있기 때문에 안정적인 전환 절차를 수행하기 위해 시뮬레이션을 통해 안정적인 값을 찾아갈 수 있도록 하였다.

6. 결 론

해외의 경우 함정의 선도함 건조 및 LBTS (Land Based Test Site) 등을 이용하여 함정의 추진체계를 검증하거나 HILS (Hardware In the Loop System)를 이용하여 함정 추진체계를 검증하고 있으나, 국내의 경우 예산 및 기술의 해외 의존으로 인하여 복합식 추진체계의 검증에 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 복합식 추진 함정의 추진체계검증을 위하여 추진 장비에 대한 물리적 특성 값 확보가 어려움에 따라 시스템 동정을 이용한 추진 장비 모델을 구현하여 추진체계 및 통합기관제어장치의 특성을 검증 할 수 있도록 구현하였다.

Figure 13과 Figure 17는 실제 장비를 바탕으로 SI기법을 활용한 시뮬레이션 결과와 하드웨어 기반의 시뮬레이터 모델의 결과를 나타낸다. 실제 장비의 데이터의 값과 시뮬레이션 결과 값을 비교하여 가스터빈과 추진전동기의 실제 데이터와 추진 장비 모델 간의 오차는 각각 3.04 %와 3.26 %임을 확인하였으며, 하드웨어 기반 시뮬레이터 모델과 시뮬레이션 결과와의 오차는 가스터빈 2.97 %, 추진전동기 3.38 %의 평균 오차율로 실제 장비 데이터와 유사한 결과 값을 가짐을 확인하였다. 본 시뮬레이터는 해군 함정의 설계 단계에서 추진 성능을 예측할 수 있도록 하여 함정 추진체계의 분석 및 최적화와 통합기관제어장치 제어기의 성능 및 신뢰도 검증 등의 핵심기술을 확보할 수 있는 기반기술로 활용할 수 있다. 추후 추진 장비 모델의 정밀도 향상을 위해 추진 장비 모델의 최적화 및 함정 선형 모델연동, 전력 계통 모델과의 연동에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2018년 대한민국 교육부와 한국연구재단(NRF-2018R1D1A1B07049361)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 손나영의 석사 학위논문(“HILS를 이용한 함정 추진체계검증 시뮬레이터 개발”)을 개선한 것이다.

Author Contributions

The following statements should be used “Methodology, J. S. Oh; Conceptualization, J. S. Oh and N. Y. Son; Software and Hardware, H. S. Lee; Investigation, H. S. Lee; Writing—Original Draft Preparation, H. S. Lee; Visualization, N. Y. Son; Data Curation, N. Y. Son; Writing—Review & Editing, H.

S. Lee; Resources, J. S. Oh and N. Y. Son; Supervision, J. S. Oh; Validation, J. S. Oh; Project Administration, J. S. Oh”.

References

- [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] Y. P. Hong, A Study on the Arrangement of Efficient Power System for a Warship, M.S. Thesis, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2015 (in Korean).
- [3] Electric Ships Office, Naval Power Systems Technology Development Roadmap, Naval Sea Systems Command, p. 95, 2013 (ASIN : B00EB3QUT2).
- [4] H. M. Lee and B. J. Jo, “Analysis of development trend for the integrated power system of naval vessels to perform the high-power and energy mission load platform,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 6, pp. 796-801, 2011 (in Korean).
- [5] G. M. Jebsen, “Electric warship technology overview,” Office of Naval Research Presentation Conference, USA, 2001.
- [6] M. Kim, A Study on Fuel Consumption of Combat Support Ship according to Propulsion System, M. S. Thesis, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2016 (in Korean).
- [7] H. M. Beak, A Study on the Arrangement of Integrated Power System for Warship, M. S. Thesis, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2016 (in Korean).
- [8] C. R. Holsonback, Dynamic Thermal-mechanical Electrical Modeling of the Integrated Power System of a Notional All-electric Naval Surface Ship, M.S. Thesis, Science in Engineering, The University of Texas at Austin: Science in Engineering, USA, 2007.
- [9] F. Balsamo, F. De Luca, and C. Pensa, “Continuous optimization of controllable pitch propellers for fast ferries,” IX HSMV Naples 25 - 27 May, 2011
- [10] A. T. Karlsen, On Modeling of a Ship Propulsion System for Control Purposes, M.S. Thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2012.
- [11] MAN Diesel & Turbo, Basic principles of ship propulsion, Dec. 2011.