



Bond Graph를 이용한 선박 에너지 시스템 모델링 연구

문상원·유원선[†]

충남대학교 자율운항시스템공학과

A Study on the Modeling of Ship Energy System Using Bond Graph

Sang-Won Moon · Won-Sun Ruy[†]

Department of Autonomous Vehicle system Engineering, Chungnam National University

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.

Environmental regulations are becoming more stringent in response to climate change, especially concerning marine pollution caused by ship emissions. Large ships are adjusting by integrating technologies to reduce pollutant emissions and transitioning to eco-friendly fuels such as low-sulfur oil and LNG. However, small ships face space constraints for installing LNG propulsion systems and the risk of power depletion with pure electric propulsion. Consequently, there's growing interest in researching hybrid propulsion methods that combine electricity and diesel for smaller vessels. Hybrid propulsion systems utilize diverse energy sources, requiring an effective method for evaluating their efficiency. This study proposes employing Bond graph modeling to comprehensively analyze energy dynamics within hybrid propulsion systems, facilitating better understanding and optimization of their efficiency. Modeling of the ship's energy system using Bond graphs will be able to provide a framework for integrating various energy sources and evaluating their effects.

Keywords : Bond graph(본드 그래프), Hybrid propulsion(하이브리드 추진), Ship efficiency(선박효율), Energy system modelling(에너지 시스템 모델링), Green ship(친환경선박)

1. 서론

최근 기후변화 등에 따라 탄소중립과 같이 환경규제는 강화되는 추세이며, 이러한 흐름은 선박에도 적용되고 있다. 이에 따라, 국제해사기구(IMO)의 해양환경보호위원회(MEPC)를 중심으로 NOx, SOx 에서 CO₂에 이르기까지 선박배출물에 대한 Rule & Regulation이 강화되거나 신설되고 있다. 이러한 시대적 요구에 따라 선박은 친환경 연료를 이용한 추진방식으로 건조 추세가 변화되고 있다. 그 흐름을 살펴보면, 초기에는 SOx 배출 제한 등에 관한 Rule & Regulation을 만족시키기 위해 현존선에 Scrubber와 같은 설비를 추가하거나, 신조선에 저황유를 적용한 엔진을 탑재하는 방식으로 나타났다. 그리고 LNG 운반선의 BOG(Boil Off Gas)를 추진연료로 사용하는 방식에서 순수한 LNG 추진 선박으로 확대되어왔다. 최근에는 LPG, DME 및 암모니아와 같이 새로운 연료를 발굴하고 선박에 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나 이러한 친환경 선박으로의 전환은 중대형 선박에 집중되어 진행되고 있다. 이러한 이유는 소형선박의 기술개발을 위한 산업기반이 상대적으로 빈약한 이유도 있으나, 주요한 이유는 선

박의 규모에 기인한다. 기존의 중유(벙커C油) 대비 새로운 연료의 체적당 에너지밀도가 작기 때문에 연료탱크의 크기는 증가할 수밖에 없고 공간의 제약이 있는 소형선박에서는 적용에 한계가 있기 때문이다. 특히, 우리나라의 7만 2천여 척의 선박 중 대부분을 차지하는 어선(6만 4천여 척)은 수산자원의 남획을 방지하기 위해 법률에서 규모를 제한하고 있고, 그 중 연안어선(6만 1천여 척)은 10톤(Tonnage)을 초과하여 건조할 수 없다. 또한 어선은 상선과 달리 해상에서 조업 활동이 필요하여서 해양작업선의 특징을 갖는다. 즉, 어선은 조업을 위해 가능한 한 넓은 작업공간을 갖고자 하는 주문주의 요구를 고려할 때 갑판 위에 LNG 탱크를 설치하는 등의 설계는 현장 수용성이 낮다. 소형어선은 이와 같은 규모의 제한과 조업을 위한 작업공간의 필요성 외에도 중대형 선박과는 대비되는 특징들이 있다. 어법에 따른 40여 개 업종의 선박이 동·서·남해 해역 특성에 맞게 다양한 형태로 존재한다. 따라서 주문주의 요구 역시 다양하며, 이는 건조 시 제약조건으로 작용한다. 그리고 연간 2천여 척이 새롭게 건조되는 등 탄탄한 내수시장을 가지고 있어 국내 조선 산업에서 중요한 부분을 차지하고 있으나, 대부분 영세한 소형조선소에서 건조되어 자체적인 연구 및 개발은 어려운 실정이다.

이러한 상황에서 친환경 어선으로 전환하기 위해 전기 추진방식을 고려할 수 있다. 하지만 조업 시 양망기(fishing gear)와 같은 조업 설비를 운용하고, 항차당 1~2일이 소요되는 점을 감안할 때 배터리 소진 시 조난의 위험이 있어 적용에는 한계가 있다. 따라서 현재 국책연구로 10톤 미만 소형어선에 대해 기존 디젤 엔진에 전기배터리가 접목된 하이브리드 추진방식을 적용하는 연구가 진행되고 있다.

하이브리드 추진방식이 적용됨에 따라 추진계통은 더욱 복잡해지고 설계관점에서 또 다른 문제를 발생시킨다. 기존에는 목표 선속에 따른 저항을 추정하고, 이에 맞는 주기관을 선정하는 방식으로 설계를 진행했지만, 하이브리드 추진방식이 적용되는 순간 운항 시나리오별로 어떠한 모드를 적용해야 하는지에 대한 새로운 문제가 나타난다. 예를 들면, 항내와 조업시 이동 시 목표 선속이 다르고 이때 하이브리드 추진방식 중 어떠한 추진방식을 채택할지 또는 함께 사용할지에 관한 결정이 필요하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 각 운항 시나리오별 모드에 대해 효율을 측정함으로써 결정의 판단 근거로 사용할 수 있다. 현재 효율에 대해서는 선박에너지효율설계지수(EEDI)와 같이 선박의 운송능력 대비 CO₂ 배출량을 고려하는 방식 (You and Park, 2018)이 있으나, 설계 초기 바로 활용되기에는 어려움이 있다. 또한 선박의 지시동력 대비 유효동력의 비율로 선박의 효율을 검토할 수 있으나, 2가지 에너지원이 접목 된 하이브리드 방식의 동력전환 과정을 계산하기에는 까다로움이 존재한다. 따라서 다양한 에너지원을 갖는 하이브리드 추진방식을 통합적으로 모델링하고, 에너지흐름 등을 효과적으로 분석할 수 있는 방법론이 고려될 필요가 있다. 선행연구로 발전기(generator engine) 및 배터리가 단일 motor로 연결된 선박에 대해 bond graph를 접목하여 voltage와 power 등의 변화를 분석한 연구가 있다 (Pramod et al., 2020; Pramod et al., 2021). 해당 연구는 사실상 전기만을 에너지원으로 하는 선박에 관한 연구로서 디젤엔진 및 전기배터리와 연결된 motor로 추진하는 선박에 관한 연구와는 차별성을 갖는다. 정리해보면 bond graph를 선박의 추진시스템에 적용한 연구는 많지 않으며, 유사 선행연구는 디젤엔진과 전기배터리가 적용된 하이브리드 추진선박에 적용이 어렵고, 효율추정에 대한 접근도 나타나 있지 않다. 그러나 선행연구 등에서 사용된 bond graph 방법은 기계, 전기, 유압 등 다양한 영역의 대상을 통합적으로 모델링 할 수 있어 디젤엔진 및 전기배터리를 통해 motor로 추진하는 선박의 에너지 시스템을 효과적으로 모델링 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 bond graph를 이용하여 9.77톤급 하이브리드 추진(디젤엔진 + 전기모터) 연안자망 어선의 추진계통에 대한 에너지 시스템을 모델링하고, 에너지 흐름에 대해 분석할 수 있는 방법론으로 유용성을 판단해보고자 한다. 그리고 나아가 하이브리드 추진 선박의 각 추진계통의 최적 운항 조합(비율)을 찾는 연구에 기반을 제시하고자 한다. 참고로, 9.77톤급 연안자망 어선의 일반적인 내용과 관련하여 어법에 관한 부분은 국립수산과학원(www.nifs.go.kr)에서 연안자망을 검색하여 확인할 수 있고, 어선에 대해서는 국립수산과학원에서 발간한 “우리나라 연근해 어선도감(2018년)”을 통해 확인할 수 있다 (Jung et al., 2018).

2. Bond graph의 개념 및 주요내용

2.1 Bond graph 개요

Bond graph는 1959년 Prof. Paynter에 의해 제안된 방법으로 분석 대상의 각 요소(element)를 power로 연결(bond)하여 구조화하는 방법이다 (Retrieved from <https://www.scribd.com/document/48821925/Samantaray-2001-www-bondgraphs-com-about>). 각 요소(element) 간에 power 교환 및 흐름을 bond graph로 정의하는 것에서 시작되어 발전되어 왔다.

Bond graph의 핵심 원리는 에너지보존법칙(conservation law)에 기반한 에너지변환(energy exchanging)이라 할 수 있다. 에너지는 형태가 변형될 뿐 보존되기 때문에 기계, 전기, 열 및 유압 등 다양한 영역(domain)에 대해 통합적으로 표기할 수 있는 표기법(notation)과 효과적으로 에너지의 변환을 다루는 방법을 제시하는 것이 bond graph라 할 수 있다. 이러한 핵심 원리를 기반으로 bond graph를 효과적으로 이해하기 위해서는 bond graph를 구성하고 있는 변수(variable), 요소(element), 변수 간의 인과관계(causality) 및 표기법을 이해할 필요가 있다 (Rochdi et al., 2013; Wolfgang, 2010).

2.2 Bond graph의 변수

Bond graph를 구성하는 변수는 power 변수와 energy 변수로 구분된다. Power 변수는 다시 effort(e)와 flow(f)로 구분되며, energy 변수는 momentum(p)와 displacement(q)로 구분된다.

Power 변수는 각 요소(element)를 연결하는 bond의 구성 변수이다. 모든 요소(element)는 bond로 연결되어 있고 bond는 effort(e)와 flow(f)로 구성된다. 그리고 power는 effort(e)와 flow(f)의 곱으로 정의된다.

$$Power = Effort(e) \times Flow(f) \quad (1)$$

Bond graph에서 effort(e)와 flow(f)로 변수를 새롭게 정의하는 이유는 다양한 영역(domain)의 대상에 대해 power를 구성하는 변수를 effort(e)와 flow(f)로 통일하여 구분하기 위함이다. 몇 가지 예로써 각 영역(domain)에 대해 변수를 effort(e)와 flow(f)로 구분하면 다음 표와 같다.

Table 1 Power variable of various domain

Domain	Effort(e)	Flow(f)
Mechanics translational	Force F [N]	Velocity v [m/s]
Mechanics rotational	Angular moment M [N·m]	Angular velocity ω [rad/s]
Electronics	Voltage u [V]	Current i [A]
Hydraulic	Pressure P [N/m ²]	Volume flow Q [m ³ /s]

Table 2 Energy variable of various domain

Domain	Generalized Momentum(p)	Generalized Displacement(q)
Mechanics Translational	Momentum P [N·s]	Displacement x [m]
Mechanics Rotational	Angular Momentum $p\omega$ [N·ms]	Angle θ [rad]
Electronics	Linkage flux λ [V·s]	Charge q [A·s]
Hydraulic	Pressure Momentum p_p [N/m ² s]	Volume V [m ³]

Energy 변수를 momentum(p)와 displacement(q)로 구분하는 이유는 effort(e)와 flow(f)간에 변환을 위해서이다. Bond graph로 모델링 한 뒤에는 모든 연결(bond)에서의 effort(e)와 flow(f) 값을 계산해야 한다. 이때, effort(e)와 flow(f) 중 각 요소(element)의 사양에 관한 값은 기지항(known)이 되고, 에너지 저장 요소(element)는 시간에 따라 변화하기 때문에 변수(variable)로써 미지항(unknown)이 된다. 따라서 기지항(known)을 통해서 미지항(unknown)을 찾을 수 있어야 하며, 이 과정에서 effort(e)와 flow(f)간의 변환이 필요하게 된다. 이러한 변환 과정에서 사용되는 변수가 energy 변수인 momentum(p)와 displacement(q)이다. 각각의 정의는 다음과 같고 상세한 변환 과정은 변수간의 인과관계(causality)에서 설명하기로 한다.

<Generalized momentum(p)>

$$p(t) = p(t)_0 + \int_0^t e(t)dt \quad (2)$$

<Generalized displacement(q)>

$$q(t) = q(t)_0 + \int_0^t f(t)dt \quad (3)$$

Power 변수와 같이 영역(domain)별 변수를 momentum(p)와 displacement(q)로 구분하면 다음 표와 같다.

2.3 Bond graph의 요소

Bond graph에서는 요소(element)를 source, storage, transform, convert, dissipator 및 distribute로 구분하고 있다. 각 각을 살펴보면 다음과 같다.

Source(S_e, S_f)는 전체 시스템에 power를 공급하는 요소로서 엔진의 토크(effort), 배터리 전류(flow) 등을 예로 들 수 있다.

Storage(I, C)는 power를 저장하는 요소로서 회전관성을 저장하는 inertia, 전기력에 관한 capacitance 등이 있다.

Transform(TF)는 effort와 effort, flow와 flow 간에 일정한 비율로 변환시키는 요소이며 대표적인 예로 gear를 들 수 있다. Transform(TF)에 의한 effort(e)와 flow(f)의 변화는 다음과 같다.

$$e_1 = TF \times e_2, f_2 = TF \times f_1 \quad (4)$$

Convert(GY)는 effort와 flow, flow와 effort 간에 일정한 비율로 변환시키는 요소이다. Motor를 이상화하면 이에 해당한다고 할 수 있다. Convert(GY)에 의한 effort(e)와 flow(f)의 변화는 다음으로 정의된다.

$$e_1 = GY \times f_2, e_2 = GY \times f_1 \quad (5)$$

Dissipator(R)은 저항요소로서 전체 시스템에서 에너지 손실을 일으키는 요소이다. 대표적인 예로 전기저항 또는 마찰손실 등이 있다.

Distribute는 앞선 요소들을 연결하고 power를 분배하는 요소이다. 0 junction과 1 junction으로 구분되며 0 junction에 연결된 모든 요소는 effort가 같고, 1 junction에 연결된 모든 요소는 flow가 같다.

2.4 Bond graph의 인과관계

Bond graph의 변수 간 변환은 인과관계 할당(causality)을 따른다. 인과관계는 적분형과 미분형으로 구분되며 변수 간의 변환을 도식화하여 나타내면 다음과 같다. 주의할 점은 effort 및 flow 계산 시 적분형 또는 미분형을 모델 특성에 맞게 적용하되 혼용하지 않고 일률적으로 적용하여야 한다 (Kim and Park, 1993).

2.5 Bond graph의 표기법

Bond graph의 연결(bond)을 표기하는 방법은 Fig. 1, 2와 같고, power, effort 및 flow의 흐름방향을 함께 나타낸다. 반쪽 화살표(half arrow)는 power의 방향을, 수직 막대표시(vertical bar)는 flow의 흐름방향을 나타낸다(effort의 흐름방향은 flow의 역방향이다). 그리고 연결(bond) 위아래에 effort(e) 및 flow(f)를 나타낸다(e, f 의 표시는 생략하기도 한다) (Jijia et al, 2021).

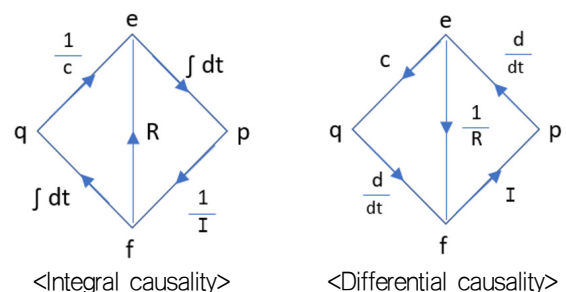


Fig. 1 Integral causality vs Differential causality

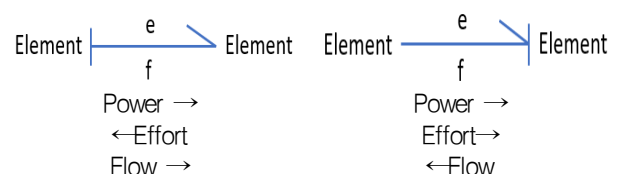


Fig. 2 Mark of bond on bond graph

3. 대상선박 분석

3.1 연구 대상 선박 개요

연구 대상 선박은 9.77톤 급 연안자망 어선으로 다음의 주요한 특징을 갖는다. 국내 7만 2천여 척 중 어선은 6만 4천여 척을 차지하고 그중 연안어선(6만 1천여 척)은 국내법인 「수산업법」에 따라 수산자원 보호 등을 위해 최대 10톤(tonnage)까지 건조할 수 있다. 즉, 규모는 작지만, 대부분의 국내 선박은 본 연구 대상 선박의 톤급 이하로 건조되고 있다. 또한 자망은 그물에 꽂혀 어획하는 어법으로 그물 인양을 위한 양승기 등이 요구된다. 일반적으로 FRP재질로 건조되며 10~12노트로 1항차 당 1일가량이 소요되며 승선원은 2~3명 수준이다. 현재 친환경 어선으로 전환을 위해 디젤 및 전기복합 추진 어선의 개발이 진행 중인 상황이다 (해양수산부, 에너지 절감형 친환경 어선 개발 연구 사업, '21~'25년). 본 연구는 개발 중인 어선을 바탕으로 bond graph를 활용하여 에너지 시스템을 모델링 했다.

3.2 연구 대상 선박의 운항시나리오

연구 대상 선박의 에너지 시스템을 모델링 하기 위해서 선박의 1항차를 기준으로 운항 시나리오를 분석하여 필요로 하는 동력을 파악했다. 항차 당 운항 시나리오는 크게 항내 운항, 조업지로 이동시 운항 및 조업 시 운항으로 구분할 수 있다. 그리고 어선은 별도의 ballasting을 하지 않기 때문에 귀항 시에는 연료 및 청수 등의 소비와 어획물 증가를 고려하여 출항 시의 역과정으로 가정한다. 즉, 운항 시나리오는 3개(항내 운항, 조업지로 이동 시 운항 및 조업 시 운항)로 가정한다. 운항 시나리오별 부하는 Table 3과 같다.

3.3 연구 대상 선박의 추진모드

연구 대상 선박은 배터리로부터 전력을 공급받은 전기모터와 디젤엔진으로 추진하는 하이브리드 추진방식이다. 기본적으로 엔진추진, 전기모터추진, 엔진-전기모터 복합추진방식이 존재할 수 있다. 그러나 육상에서 배터리를 충전한 만큼만 전기모터추진을 사용하게 되면 전기모터추진 사용 시간이 제한되기 때문에 디젤 엔진 추진 시 운항 시나리오별 소요 동력을 고려하여 배터리를

Table 3 Load cases according to operation scenario

Operation scenario	Torque[$N \cdot m$] (A)	RPS (B)	Torque/RPS (A/B)
In port	5787.60	38.88	148.87
Transfer form port to fishing ground	10403.40	53.83	193.27
Working (Fishing)	8292.99	44.86	184.88

Table 4 Equipment specification for bond graph modeling

Description	Mechanical	Electrical
Source (S)	S_e (Engine Torque) : 2461.6 [$N \cdot m$]	S_e (Battery Voltage) : 671.6 [V]
Storage (I)	J_F (Inertia of engine flywheel) : 1.612 [$kg \cdot m^2$] J_R (Inertia of motor rotor) : 0.84 [$kg \cdot m^2$]	L (Inductance on PT1) : 0.000659 [H] * Power Take In of motor
Resister (R)	T (Load according to operation scenario) : Refer to 'Torque/PRS' on Table3 α (Load of battery charging) : 6.516 [$N \cdot m / (rad/s)$] β (Resistance of stern tube) : $T \times 0.005^*$ [$N \cdot m / (rad/s)$] * Friction coefficient γ (Resistance of motor bearing) : 0.0038 [$N \cdot m / (rad/s)$]	R_E (Resistance of motor coil on PT1) : 0.162 [Ω] R_C (Resistance of converter coil) : 0.145 [Ω]
Transformer (TF)	TF (Gear ratio) : 1:3.5 ($N_2 > N_1, N_1 = m_1, N_2 = m_2$)	
Gyrator (GY)	KC (Converter) : 3.86* * 671.6 battery voltage (effort) change to 174 converter ampere (flow) $\Rightarrow 671.6 / 174 = 3.86$	KM (Motor) : 3.23* * 172.4 motor ampere (flow) changed to 557 motor torque (effort) $\Rightarrow 557 / 172.4 = 3.23$

충전을 할 수 있어야 한다. 따라서 연구 대상 선박은 엔진과 모터를 함께 사용하는 하이브리드모드, 엔진모드, 모터모드 및 충전모드 4가지 Mode cases가 존재하게 된다.

3.4 연구 대상 선박의 제원분석

연구 대상 선박은 개발 중인 디젤 및 전기복합추진 어선의 제원을 토대로 미확정 정보는 기존 유사 선박의 제원을 참고하여 가정하였다. 그리고 조업 중 양승기에 소요되는 동력은 발전기(generator engine)에서 생산하는 전력으로 공급하고 추진을 위한 배터리와는 독립적인 것으로 가정하였다. 연구 대상 선박의 추진계통에 대한 bond graph 모델링을 구성하는 변수를 정리하면 Table 4와 같다.

4. Bond graph를 활용한 모델링

연구 대상 선박의 추진계통을 3D 이미지로 설명하고, bond graph로 모델링 하기 위한 scheme 및 bond graph 모델링 결과를 순차적으로 설명하면 다음과 같다. 아래는 연구 대상 선박의 추진계통을 3D 이미지로 표현한 것으로, 효과적인 설명을 위한 이미지일 뿐 본 연구에 사용되는 실제 정보는 아님을 밝힌다.

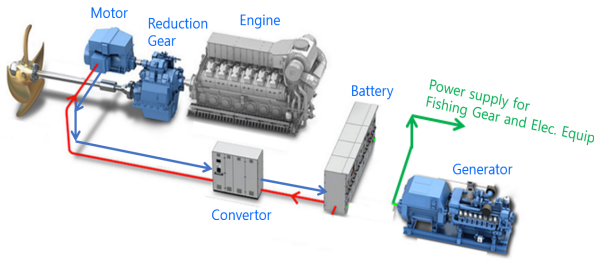


Fig. 3 3D Modeling of energy system
(It is not real information of objected ship and just only reference image)

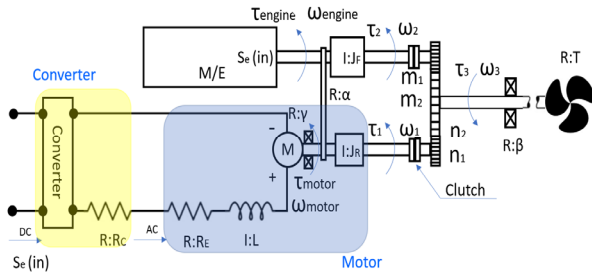


Fig. 4 Scheme of energy system for bond graph modeling

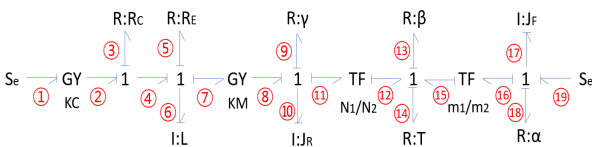


Fig. 5 Bond graph modeling of energy system

Fig. 3의 상태에서 bond graph로 바로 모델링 하는 것은 어렵기 때문에 engine 및 battery에서 propeller에 이르기까지 각 부품(component)을 bond graph 모델링을 위한 요소(element)로 변환하여 아래와 같이 scheme을 작성한다 (Tom, 2009).

위 scheme을 바탕으로 대상 선박의 추진계통을 bond graph로 이상화하여 모델링 하면 아래와 같은 결과를 갖는다 (Gerardo et al., 2022).

5. 에너지 흐름계산

Fig. 5와 같이 연구 대상 선박의 추진계통을 bond graph로 모델링 했다. 다음으로 Fig. 5의 모델링에 따른 각 bond의 effort 및 flow를 계산하여 에너지 변화를 파악할 수 있도록 한다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 storage element의 energy 변수를 상태변수(state variable)로 설정하여 미지항(unknown)을 기지항(known)으로 가정하는 것이다. 이후 상태변수(state variable)에 대해 식을 정리하면 연립 상미분방정식으로 귀결된다. 이때, 초기 값을 대입하여 해를 구하면 모든 bond의 effort 및 flow를 구할 수 있다. 대상 선박의 운용 모드 중 가장 복잡한 하이브리드 모드에 대해 계산하면 아래와 같다. e 및 f 의 아래 첨자인 숫자는 각 bond의 number이다. Bond 1에서 19까지 순차적으로 계산하면 다음과 같다.

$$e_1 = Se_{(Battery)} \tag{6}$$

$$f_1 : e_2 = KC \times f_1, f_1 = \frac{e_2}{KC}$$

$$= \frac{1}{KC} (R_C \times \frac{p_6}{L} + R_E \times \frac{p_6}{L} + \dot{p}_6 + KM \times \frac{p_{10}}{J_R})$$

$$e_2 = e_3 + e_4 \tag{7}$$

$$= R_C \times \frac{p_6}{L} + R_E \times \frac{p_6}{L} + \dot{p}_6 + KM \times \frac{p_{10}}{J_R}$$

$$f_2 = \frac{p_6}{L} (\because f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = f_6 = f_7)$$

$$f_2 = \frac{e_1}{KC} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC} (\because e_1 = KC \times f_2)$$

$$e_3 = R \times f_3 = R_C \times \frac{p_6}{L} \tag{8}$$

$$f_3 = \frac{p_6}{L} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC}$$

$$e_4 = e_5 + e_6 + e_7 = R_C \times \frac{p_6}{L} + \dot{p}_6 + KM \times \frac{p_{10}}{J_R} \tag{9}$$

$$f_4 = \frac{p_6}{L} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC}$$

$$e_5 = R \times f_5 = R_E \times \frac{p_6}{L} \tag{10}$$

$$f_5 = \frac{p_6}{L} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC}$$

$$e_6 = \dot{p}_6 \tag{11}$$

$$f_6 = \frac{p_6}{I} = \frac{p_6}{L} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC}$$

$$e_7 = KM \times f_8 = KM \times \frac{p_{10}}{J_R} \tag{12}$$

$$f_7 = \frac{p_6}{L} = \frac{Se_{(Battery)}}{KC}$$

$$e_8 = KM \times f_7 = KM \times \frac{p_6}{L} \tag{13}$$

$$f_8 = \frac{p_{10}}{J_R} (\because f_8 = f_9 = f_{10} = f_{11})$$

$$e_9 = R \times f_9 = \gamma \times \frac{p_{10}}{J_R} \tag{14}$$

$$f_9 = \frac{p_{10}}{J_R}$$

$$e_{10} = \dot{p}_{10} \tag{15}$$

$$f_{10} = \frac{p_{10}}{I} = \frac{p_{10}}{J_R}$$

$$e_{11} : e_8 = e_9 + e_{10} + e_{11}, e_{11} = e_8 - e_9 - e_{10} \quad (16)$$

$$= KM \times \frac{p_6}{L} - \gamma \times \frac{p_{10}}{J_R} - \dot{p}_{10}$$

$$f_{11} = \frac{p_{10}}{J_R}$$

$$e_{12} = \frac{N_2}{N_1} \times e_{11} = \frac{N_2}{N_1} (KM \times \frac{p_6}{L} - \gamma \times \frac{p_{10}}{J_R} - \dot{p}_{10})$$

$$f_{12} = \frac{N_1}{N_2} \times f_{11} = \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} \quad (\because f_{12} = f_{13} = f_{14} = f_{15}) \quad (17)$$

※ $N_2 > N_1$ ($N_1 = m_1, N_2 = m_2$)

$$N_2 \times e_{11} = N_1 \times e_{12} \rightarrow e_{12} = \frac{N_2}{N_1} \times e_{11}$$

$$N_1 \times f_{11} = N_2 \times f_{12} \rightarrow f_{12} = \frac{N_1}{N_2} \times f_{11}$$

$$e_{13} = R \times f_{13} = \beta \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} \quad (18)$$

$$f_{13} = \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} = \frac{m_1}{m_2} \frac{p_{17}}{J_F}$$

$$e_{14} = R \times f_{14} = T \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} \quad (19)$$

$$f_{14} = \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} = \frac{m_1}{m_2} \frac{p_{17}}{J_F} \quad (\rightarrow \frac{p_{10}}{J_R} = \frac{p_{17}}{J_F})$$

$$e_{19} = Se_{(Engine)} \quad (20)$$

$$f_{19} = \frac{p_{17}}{J_F} \quad (f_{16} = f_{17} = f_{18} = f_{19})$$

$$e_{18} = R \times f_{18} = \alpha \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{17}}{J_F} \quad (21)$$

$$f_{18} = \frac{p_{17}}{J_F}$$

(used to charging mode only)

$$e_{17} = \dot{p}_{17} \quad (22)$$

$$f_{17} = \frac{p_{17}}{I} = \frac{p_{17}}{J_F}$$

$$e_{16} : e_{19} = e_{17} + e_{16}, e_{16} = e_{19} - e_{17} \quad (23)$$

$$= Se_{(Engine)} - \dot{p}_{17}$$

$$f_{16} = \frac{p_{10}}{J_R}$$

$$e_{15} = \frac{m_2}{m_1} \times e_{16} = \frac{m_2}{m_1} (Se_{(Engine)} - \dot{p}_{17}) \quad (24)$$

$$f_{15} = \frac{m_1}{m_2} f_{16} = \frac{m_1}{m_2} \frac{p_{17}}{J_F}$$

$$e_{12} + e_{15} = e_{13} + e_{14}$$

$$\frac{N_2}{N_1} (KM \times \frac{p_6}{L} - \gamma \times \frac{p_{10}}{J_R} - \dot{p}_{10}) + \frac{m_2}{m_1} (Se_{(Engine)} - \dot{p}_{17})$$

$$= \beta \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} + T \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} \quad (25)$$

각 bond의 effort 및 flow 계산식 (6)~(25)을 바탕으로 상태 변수(state variable)에 대해 식을 정리하여(식 (26)~(28)) 최종적으로 matrix 형태의 연립 상미분방정식(식 (29))을 도출한다.

상태변수(state variable) p_{10} 과 p_{17} 의 관계식을 식 (25)를 통해 유도한다.

$$e_{12} + e_{15} = e_{13} + e_{14}$$

$$\frac{N_2}{N_1} (KM \times \frac{p_6}{L} - \gamma \times \frac{p_{10}}{J_R} - \dot{p}_{10}) + \frac{N_2}{N_1} (Se_{(Engine)} - \dot{p}_{17})$$

$$= \beta \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} + T \frac{N_1}{N_2} \frac{p_{10}}{J_R} \quad (\because N_1 = m_1, N_2 = m_2) \quad (26)$$

식 (26)을 p_{10} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{p}_{10} = \left(\frac{1}{1 + J_F/J_R} \right) \frac{KM}{KC} Se_{(Battery)} \quad (27)$$

$$- \left(\frac{1}{1 + J_F/J_R} \right) \frac{1}{J_R} [\gamma + (\beta + T) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2] p_{10}$$

$$+ \left(\frac{1}{1 + J_F/J_R} \right) Se_{(Engine)}$$

식 (26)을 p_{17} 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{p}_{17} = \left(\frac{1}{J_R/J_F + 1} \right) \frac{KM}{KC} Se_{(Battery)} \quad (28)$$

$$- \left(\frac{1}{J_R/J_F + 1} \right) \frac{1}{J_R} [\gamma + (\beta + T) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2] p_{10}$$

$$+ \left(\frac{1}{J_R/J_F + 1} \right) Se_{(Engine)}$$

식 (27) 및 식 (28)을 Matrix 형태의 연립 상미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_{10} \\ \dot{p}_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{(1 + J_F/J_R)J_R} [\gamma + (\beta + T) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2] & 0 \\ -\frac{1}{(J_R/J_F + 1)J_R} [\gamma + (\beta + T) \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{10} \\ p_{17} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{(1 + J_F/J_R)KC} & \frac{1}{(1 + J_F/J_R)} \\ \frac{1}{(J_R/J_F + 1)KC} & \frac{1}{(J_R/J_F + 1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Se_{(Battery)} \\ Se_{(Engine)} \end{bmatrix} \quad (29)$$

엔진 및 모터는 초기조건이 정지상태임으로 time t 에 대해 초기 값을 0으로 하여 연립 상미분방정식을 풀이하면 그 해가 상태 변수(state variable)의 값이 된다. 이로써 모든 bond의 effort 및 flow 값을 구했기 때문에 각 bond의 power를 알 수 있다. 즉, 연구 대상 선박의 추진계통에 대한 에너지 변화를 알 수 있음을 의미한다. 하이브리드 모드, 엔진모드, 모터모드 및 충전모드의 모델링 결과는 다음과 같고 앞의 계산과 동일한 방식으로 각 모드에 대해 계산한다. 단, 각 모드에서 운항 시나리오별 부하가 다르기 때문에 4개 모드(하이브리드 모드, 엔진모드, 모터모드 및 충전모드) \times 3개 운항 시나리오(항내 운항, 조업지로 이동 시 운항 및 조업 시 운항) = 총 12개의 cases가 존재하게 된다. 하이브리드 모드, 엔진모드, 모터모드 및 충전모드에 대해 bond graph로 modeling 한 결과는 각각 다음 Figs. 6~9와 같다.

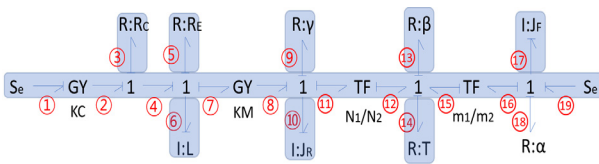


Fig. 6 Bond graph modeling of hybrid mode

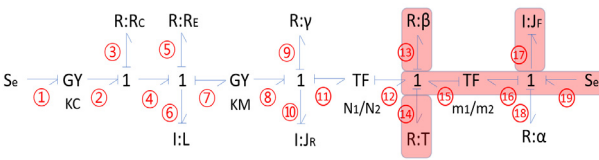


Fig. 7 Bond graph modeling of engine mode

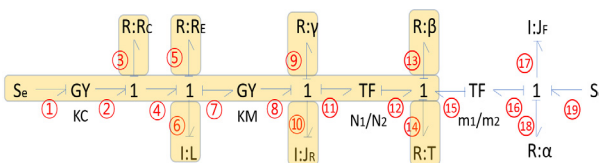


Fig. 8 Bond graph modeling of motor mode

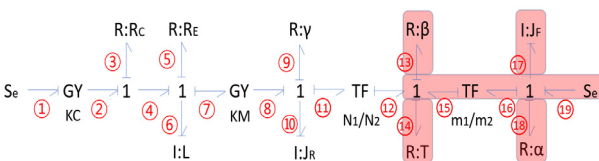


Fig. 9 Bond graph modeling of charging mode

6. 계산검증 및 결과분석

다음으로 앞선 bond graph 모델링 계산 결과를 검증한다. 검증 방법은 상용프로그램인 “20-sim 5.0”를 활용하여 동일하게

모델링하고 상태변수(state variable)값을 비교하여 판단한다. 다만, 계산검증에서 앞서 본 연구과 상용프로그램에 대한 차별성을 밝힌다. 상용프로그램은 2장 bond graph의 개념 및 주요 내용에서 소개한 요소(element)를 조합하여 모델링 할 수 있는 환경을 제공할 뿐 연구 대상 선박에 대한 Fig. 4의 scheme을 작성하거나, Fig. 5와 같은 모델링을 제공하지 않는다. 상용프로그램은 범용적으로 사용할 수 있지만, 하이브리드 선박에 전문화된 모델링 체계나 구체적인 분석적인 분석결과를 제공하지는 않는다. 따라서 본 연구에서는 bond graph modeling 결과를 활용하여 효율 추정 및 에너지 흐름을 계산하여 하이브리드 선박전용 초기설계에 활용할 수 있도록 한다. 상용프로그램 대비 본 연구에서 얻는 의미는 결과분석에서 다시 설명하기로 한다.

다음 Fig. 10은 4가지 모드 중 “20-sim 5.0”을 활용하여 하이브리드 모드에 대해 모델링 한 결과이다.

조업지로 이동시 하이브리드 모드를 사용한 경우에 대해 “20-sim 5.0”을 통해 계산된 상태변수(state variable)값과 5장에서 소개한 에너지 흐름계산을 거쳐 도출된 연립 상미분방정식을 풀이(Runge-Kutta 4th order method로 구현된 scipy package를 이용한 연구결과를 비교하면 Fig 11, 12와 같다.

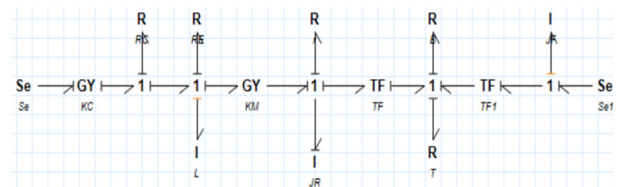


Fig. 10 Bond graph modeling of hybrid mode by 20-sim 5.0

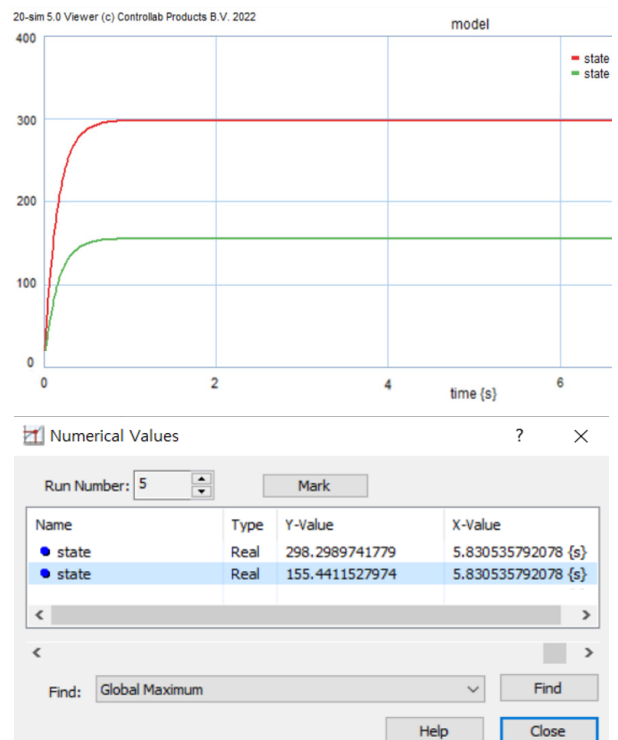
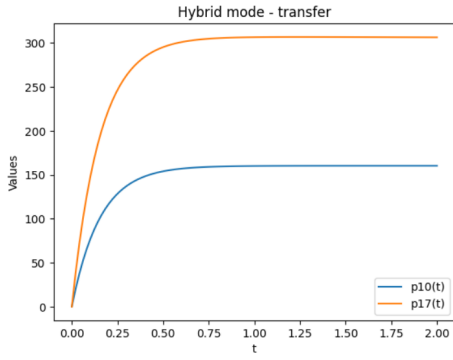


Fig. 11 Result of 20-sim 5.0



160.3397497896482 306.41027120267523

Fig. 12 Result of study for bond graph modeling

상태변수(state variable)는 bond 17의 변수(p_{17})와 bond 10의 변수(p_{10})가 해당이 되고, 물리적 의미는 각각 엔진 플라이휠의 회전관성에 저장되는 에너지와 모터 로터의 회전관성에 의해 저장되는 에너지를 의미한다.

“20-sim 5.0”의 결과로 bond 17(p_{17})는 「298.3」, bond 10(p_{10})는 「155.4」이며, 본 연구의 bond graph 모델링 결과는 각각 bond 17(p_{17}) 「306.4」, bond 10(p_{10}) 「160.3」로 나타났다.

하이브리드 모드, 엔진모드, 모터모드 및 충전모드에 대해 각 사탕운항 시나리오(항내 운항, 조업지로 이동 시 운항 및 조업 시 운항)의 부하 조건을 대입하여 “20-sim 5.0”과 본 연구의 결과값을 비교하면 다음과 같다. Table 5를 보면 전체 12개 cases에 대한 평균 오차는 2.8% 수준이다.

Table 5 Comparison of “20-sim 5.0” and study result

Mode	Operation	Energy variable Nb.	20-sim	Study result	Error (%)
Hybrid	in port	p_{10}	201.8	208.2	3.2%
	transfer	p_{10}	155.4	160.3	3.2%
	working	p_{10}	162.5	167.6	3.1%
	in port	p_{17}	387.3	398.2	2.8%
	transfer	p_{17}	298.3	306.4	2.7%
	working	p_{17}	311.8	320.3	2.7%
Engine	in port	p_{17}	315.4	324.9	3.0%
	transfer	p_{17}	242.9	250.3	3.0%
	working	p_{17}	253.9	261.6	3.0%
Motor	in port	p_{10}	37.5	38.6	2.9%
	transfer	p_{10}	28.9	29.8	3.1%
	working	p_{10}	30.2	31.1	3.0%
Charging	in port	p_{17}	207.8	211.9	2.0%
	transfer	p_{17}	173.6	177.4	2.2%
	working	p_{17}	179.2	183.0	2.1%
Average					2.8%

다음으로 도출된 결과를 분석해본다. Bond graph를 활용하여 연구 대상 선박의 추진계통에 대한 에너지 시스템을 모델링 하였고, 각 요소(element)의 사양 및 운항시나리오별 부하(load) 정보를 입력하여 각 요소를 잇는 bond에서의 effort 및 flow를 계산하였다(Table 5의 상태변수 값을 식 (6) ~ 식 (24)에 대입하면 각 bond의 effort 및 flow 값이 도출된다). 그리고 이러한 연구 결과는 다음의 의미를 갖는다.

각 bond에서의 effort와 flow 값을 계산했기 때문에 식 (1)에 따라 effort와 flow 값의 곱으로 각 bond에서의 power를 알 수 있다. 즉, 추진계통을 하나의 계(system)로 볼 때 내부 에너지 변화를 알 수 있다. 또한, 선박의 효율을 출력/입력으로 정의하면, 엔진, 배터리와 같은 입력 측 bond에서의 Power와 각 운항 시나리오별 부하(load)의 비율로 효율(eficiency)을 계산할 수 있다. 위의 관점에서 연구 대상 선박에 관한 결과를 도출해보면, 내부 에너지 변화를 알 수 있으므로 각 운항 시나리오별 모드에 대한 배터리의 전류, 엔진의 RPS, 각 저항요소(모터 베어링 및 선미관 베어링 저항 등)에서의 power 손실(loss)을 도출할 수 있다. 앞서 5장 에너지 흐름 계산에서 살펴본 하이브리드 모드를 이용하여 조업지로 이동하는 경우를 예로 위의 값을 표(Table)로 정리하면 다음과 같다.

위 값들을 이용한 활용방안으로 배터리의 사양 정보 중 전기량(Ah)을 배터리에 발생하는 전류(current)로 나누어 주게 되면 배터리 잔여시간을 예측할 수 있다. 또한, 부하(load)를 달리할 때 엔진의 RPS를 알 수 있어서 원하는 출력을 얻고자 할 때 엔진의 RPS를 어떻게 변화시켜야 할지 관계를 추정할 수 있다. 그리고 stern tube에서의 마찰손실을 계산할 수 있으므로 stern tube의 변경에 따른 에너지 손실(loss)을 예측할 수 있다. 이는 단편적인 예시이며, 시스템 내부의 에너지 흐름을 알 수 있기에 다양한 형태로 원하는 정보를 얻을 수 있다.

다음으로 효율을 출력/입력으로 정의하고, 운항 시나리오(항내 운항, 조업지로 이동 시 운항 및 조업 시 운항) 별 각 모드에서의 효율 계산 결과를 Table 6, 7로 정리하면 다음과 같다. 참고로 출력은 각 운항 시나리오별 부하(load) 즉, 요구 동력(power 14)을 기준으로 하고, 입력은 에너지가 공급되는 배터리(power 1)와 엔진(power 19)의 bond 값을 기준으로 하였다. 그리고 각 운항시나리오별 부하는 개발 중인 연구대상 선박(해양수산부, 에너지 절감형 친환경 여선 개발 연구 사업, '21~'25년)의 설계 값을 적용 하였다.

위 결과를 보면, 효율(eficiency)이 1을 넘는 경우는 출력이 입력 보다 큰 경우로 해당 운항 시나리오에서 요구되는 동력이

Table 6 Effort and Flow of major bond on hybrid mode for transfer to destination

Bond No.	Description	Effort	Flow
1	Battery	671.6 [V]	171.7 [A]
19	Engine	2461.1 [N · m]	190.4 [rad/s]
13	Resistance of Stern tube	0.27 [N · m]	54.3 [rad/s]

Table 7 Efficiency of various operation scenario with mode

Hybrid mode				
Description		In port [kW]	Transfer [kW]	Working [kW]
Output (Required load)	power14 (Element)	225	560	372
Input	power1 (Bond)	608.071	467.888	489.114
	power19 (Bond)	148.578	116.533	121.417
Efficiency		0.297	0.958	0.609
Engine mode				
Description		In port [kW]	Transfer [kW]	Working [kW]
Output (Required load)	power14 (Element)	225	560	372
Input	power19 (bond)	496.139	382.221	399.476
Efficiency		0.453	1.465	0.931
Motor mode				
Description		In port [kW]	Transfer [kW]	Working [kW]
Output (Required load)	power14 (Element)	225	560	372
Input	power1 (Bond)	35.117	29.230	30.099
Efficiency		6.407	19.159	12.359
Charging mode				
Description		In port [kW]	Transfer [kW]	Working [kW]
Output (Required load)	power14 (Element)	225	560	372
Input	power19 (Bond)	323.582	270.899	279.450
Efficiency		0.695	2.067	1.331

공급되는 동력보다 큰 경우로 사용이 불가능한 경우이다. 따라서 항내 이동 시에는 충전모드, 조업지 이동 시에는 하이브리드 모드가 그리고 조업 시에는 엔진모드를 사용하는 것이 효율적인 것을 알 수 있다. 모터모드는 효율이 1을 넘기 때문에 요구 부하(load)를 만족할 수 없어 하이브리드 모드에서 엔진의 보조 수단으로 사용되어야 함을 알 수 있다.

7. 결론 및 고찰

앞서 서론에서 언급한 바와 같이 소형 선박(소형어선)은 국내 선박의 대부분을 차지하고 있고 친환경 선박으로 전환이 요구되고 있다. 그러나 국내 법령인 「수산업법」에 따라 수산자원 보호

를 위해 선박의 규모를 제한하고 있고, 상갑판 위 조업을 위한 작업 공간의 필요성 등 공간적 제약에 따라 LNG와 같은 대규모 설비가 요구되는 친환경 연료 추진 방식으로 전환에는 한계가 있다. 이에, 대안으로 디젤과 전기추진이 혼합된 형태의 추진 방식이 연구되고 있다(해양수산부, 에너지 절감형 친환경 어선 개발 연구 사업, '21~'25년). 이러한 연구가 끝나면 기존 선박은 점진적으로 디젤-전기 복합 추진 방식으로 대체될 것으로 예측된다. 본 연구에서는 현재 개발 중인 디젤-전기 하이브리드 추진 어선을 토대로 bond graph를 통해 추진계통의 에너지 시스템을 모델링했고, 이를 통해 내부 에너지 변화 및 효율을 추정했다. 본 연구를 통해 확보된 에너지 시스템 모델링을 활용하여 원하는 요소(element)의 사양을 변화 시켜가며 내부 에너지 흐름과 효율을 손쉽게 추정해 볼 수 있을 것이다. 특히, 이러한 연구는 동일한 추진 시스템을 갖는 선박의 초기 설계 시 부품의 사양 결정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

끝으로 향후 연구에 대한 계획으로 각 운항 시나리오 별 효율을 계산하는 것에서 나아가 전체 운항 시나리오를 고려하여 엔진과 모터의 최적운항 비율을 찾는 연구를 하고자 한다. 이번 연구는 엔진과 모터의 사양이 결정된 상태에서 에너지 시스템을 계산한 것이라면, 향후 연구는 하이브리드 추진 방식에 있어 엔진과 모터의 최적 운항 비율을 찾는 방법에 관한 연구가 될 것이다.

References

- Bond Graph.com. *About Bond Graph*. URL: <https://www.scribd.com/document/48821925/Samantaray-2001-www-bondgraphs-com-about>. [Accessed 2 September 2023].
- Gerardo, A.J. and Gilberto, G.A., 2022. MOSFET modelling for a three-level inverter circuit: A hybrid bond graph approach. *48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Brussels, Belgium, 17-20 October.
- Jijia, D., Yanxia, S. and Zhipu, Z., 2021. Modeling and matlab simulation of the inverter based on bond graph. *16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2021)*. Chengdu, China, 1-4 August 2021.
- Jung, S.J., Kim, I.O., Park, C.D., Kim, S.H. and Jeong G.L., 2018. *Illustration of Korea Fishing Vessels(2018)*. National Fisheries Research and Development Institute
- Kim, J.S. and Park, J.S., 1993. Basic concepts of bond graph modeling techniques and it's applications. *Journal of The Korean society of mechanical engineers*, (33), pp.22-32.
- Pramod, G., Mehdi, Z., Eilif, P. and Jarle, T., 2021. Dynamic modeling, simulation, and testing of a marine DC hybrid

power system. *IEEE Transactions on transportation electrification*, 7(2), JUNE 2021, pp.905–919.

Pramod, G., Namireddy P.R., Mehdi, K.Z., Eilif, P. and Jarle T., 2020. Dynamic modeling and real-time simulation of a ship hybrid power system using a mixed-modeling approach. *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. originally scheduled Chicago, Illinois(Location: Virtual), USA. 23–26 June 2020.

Rochdi, M., Arun, K.S., Pushparaj, M.P. and Belkacem, O.B., 2013. *Intelligent mechatronic systems modeling, control and diagnosis*. Springer.

Tom, A.P., 2009. *Bond Graph Modeling of MarinePower Systems*, Ph.D. : Norwegian University of Science and Technology.

You, Y.J. and Park, H.R., 2018. Development of a framework to estimate the EEOI of a ship considering the hydrodynamic characteristics and engine mode. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 55(6), pp.457–465.

Wolfgang, B., 2010. *Bond graph methodology delopment and analysis of multidisciplinary dynamic system models*. Springer.



문상원

유원선