



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

에너지 저장장치를 이용한 선박 에너지
효율 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Ship Energy Efficiency through
ESS(Energy Storage System)



2013 年 09 月

韓國海洋大學校 大學院

기관공학과

李 憲 碩

本 論文을 李憲碩의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



委員長 柳 熙 漢



委 員 蘇 明 玉



委 員 吳 珍 錫



2013 年 12 月 09 日

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Nomenclatures	vi
Abstract	viii
제 1 장 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	4
1.3 연구내용 및 구성	5
제 2 장 에너지 저장장치	6
2.1 에너지 저장장치 개요	6
2.2 울트라 커패시터	8
2.3 플라이휠 배터리	9
2.4 이차전지	10
2.5 에너지 저장장치의 비교	12
제 3 장 선박 전력시스템	14
3.1 선박 운항 특성 분석	14
3.1.1 운항모드별 운항 비율	15
3.1.2 선종별 제원 특성	17
3.1.3 운항모드별 전력소비량	19
3.1.4 운항모드별 중부하 사용시간	23
3.2 전력관리시스템	24
3.2.1 부하분담 시작 및 정지 기능	25
3.2.2 비 필수부하 제어	30
3.2.3 중부하 관리	30
3.3 이차전지 연동형 전력관리시스템	32

제 4 장 시뮬레이션	36
4.1 시뮬레이션 개요	36
4.2 시뮬레이션	37
4.2.1 선박 전력부하	37
4.2.2 발전기	42
4.2.3 이차전지	44
4.2.4 연료소비율	47
4.3 시뮬레이션 프로그램 구성	48
제 5 장 시뮬레이션 결과 분석	53
5.1 Payback	53
5.2 4,600TEU 컨테이너선	56
5.2.1 환경조건	56
5.2.2 데이터 분석	56
5.3 8,600TEU 컨테이너선	58
5.3.1 환경조건	58
5.3.2 데이터 분석	59
5.4 LNGC	61
5.4.1 환경조건	61
5.4.2 데이터 분석	62
제 6 장 결 론	64

List of Tables

Table 1.1 Green ship technologies	2
Table 2.1 Ultra capacitor specificity	9
Table 2.2 Flywheel battery specificity	10
Table 2.3 Secondary battery specificity	11
Table 2.4 Specification of energy storage module	13
Table 3.1 4,600TEU container ship specification	17
Table 3.2 8,600TEU container ship specification	17
Table 3.3 LNGC ship specification	18
Table 3.4 Car carrier ship specification	19
Table 3.5 Ship power analysis at seagoing	20
Table 3.6 Ship power analysis at arrival and departure	21
Table 3.7 Ship power analysis at harbor anchorage	22
Table 3.8 Time of heavy consumer used by arrival and departure	23
Table 4.1 Ship power analysis	36
Table 4.2 Ship operation characteristics	37
Table 4.3 Ship Operating Rate	37
Table 4.4 ICR18650-30A nominal specifications	44
Table 5.1 4,600TEU containership simulation results	56
Table 5.2 8,600TEU containership simulation results	58
Table 5.3 8,600TEU containership simulation results	59
Table 5.4 LNGC simulation results	61

List of Figures

Fig 1.1 Hybrid car carrier ‘Emerald Ace’	4
Fig 2.1 Energy storage power characteristics	7
Fig 2.2 Diesel generator SFC curve	12
Fig 3.1 Ship operation characteristics	16
Fig 3.2 Generator load-dependent start	25
Fig 3.3 Generator load-dependent start flow chart	26
Fig 3.4 Generator load-dependent stop	27
Fig 3.5 Generator load-dependent stop flow chart	28
Fig 3.6 Generator load-dependent of PMS	28
Fig 3.7 Heavy consumer management system	30
Fig 3.8 Battery-linked power management system flow chart	32
Fig 3.9 BLPMS Heavy consumption control flow chart	33
Fig 3.10 Typical power system	34
Fig 3.11 Proposed battery-linked power system	34
Fig 4.1 Ship load simulation block diagram	38
Fig 4.2 Sip load simulation front panel	39
Fig 4.3 Bow thruster use timer	40
Fig 4.4 4,600TEU container ship load simulation	41
Fig 4.5 Charging-discharging hysteresis of the LIB	43
Fig 4.6 Setting of the generator front panel	43
Fig 4.7 Lithium-iron battery modeling	45
Fig 4.8 Diesel Generator SFC Curve[23]	46
Fig 4.9 Diesel generator SFC curve simulation	47
Fig 4.10 Simulation data saving program	48
Fig 4.11 Ship energy efficiency improvement simulation block diagram	49
Fig 4.12 Ship energy efficiency improvement simulation front panel(1)	50
Fig 4.13 Ship energy efficiency improvement simulation front panel(2)	51
Fig 5.1 Li-ion battery cost forecasts	53
Fig 5.2 MG-380 diesel oil price	54
Fig 5.3 4,600TEU containership environmental condition	55

Fig 5.4 4,600TEU SFC example of comparison chart56
Fig 5.5 8,600TEU containership environmental condition57
Fig 5.6 LIB charging-discharging hysteresis control59
Fig 5.7 LNGC environmental condition60



Nomenclatures

E_C	: 커패시터의 저장에너지[J]
C	: 커패시턴스[F]
V_C	: 커패시터 양단의 전압[V]
E_f	: 로터의 관성에너지[J]
I_f	: 로터의 회전 관성모멘트[$kg \cdot m^2$]
w	: 로터의 회전속도[rad/s]
m_f	: 로터의 질량[Kg]
R_i	: 로터의 내부반경[m]
R_o	: 로터의 외부반경[m]
E_B	: 배터리의 저장에너지[J]
V_B	: 배터리의 전압[V]
Ah	: 배터리가 가지고 있는 총 전기량[Ah]
G_{Set}	: 발전기 운전대수[대]
P_A	: 발전기 여유전력[W]
P_N	: 발전기 정격전력[W]
P_T	: 발전기 총 생산전력[W]($P_N \times G_{Set}$)
P_P	: 발전기 생산전력[W]
$PG1$: 정상시 부하용량으로부터의 출력[kVA]
$PG2$: 과도시 최대 전압강하로부터 출력[kVA]
$PG3$: 과도시 단시간 내량으로부터의 출력[kVA]
P_L	: 동력부하정격 출력(전체 운전동력부하)[kW]
α	: 부하율, 수용률(설계기준으로 계산)
P'_L	: 비상전등, 전열부하 출력[kVA]
β	: 전동기출력 1kW당 기동출력[kVA]

- ΔV : 허용전압 강하율
 P_m : 전체부하 중 가장 큰 용량의 전동기 출력[kW]
 η_L : 전동기 부하효율
 P_S : P_m 기동시 필요한 전력(kVA)($P_m \times C \times \beta$)[kVA]
 η_G : 발전기 효율
 P_O : 전체부하 중 P_m 부하가 제외된 부하[kW]
 η_G' : 과도시 발전기 효율
 PF_L : 전동기 정상부하역률
 X_d : 발전기 정수
 PF_S : 전동기 기동부하역률
 K_G : 원동기 과부하 내량(Overload capacity)
 $\cos\theta$: 발전기 역률
 K_1 : PG2 산출식의 계수
 C : 기동계수
 G_{SFC} : 발전기 연료소비율[g/kWh]
 w : 초당 엔진 샤프트 각속도[rad/s]
 τ : 엔진 샤프트 토크[N·m]
 T_{SFC} : 기존 선박 연료소비량[MT]
 T_{BLSFC} : 이차전지 연동형 선박 연료소비량[MT]

A Study on the Improvement of Ship Energy-Efficiency through ESS(Energy Storage System)

Hun-seok, Lee

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

The watermark is a circular logo for Korea Maritime University. It features a central emblem with a stylized ship or structure, surrounded by the university's name in Korean and English. The year '1945' is also visible within the logo.

Abstract

This paper deals with the ship power management system using energy storage system. Energy storage device is used for the improving energy efficiency and improving power quality and energy shifting etc. Representative examples of the energy storage device is a ultra-capacitors, flywheel battery and secondary battery. In order to select the most appropriate energy storage device to the ship, Comparing the energy storage device and analyzed. Among the comparison results of energy storage system, middle-large secondary battery was deemed most appropriate in conjunction with a ship power management system linked energy storage system is proposed.

The Purposed of this paper is the capacity selection of secondary battery

and generator suitable ship for energy efficiency improvements of ship with applied the secondary battery.

Analyzed the operational data of each ship type in the actual operation date for capacity calculation of the secondary battery and generator suitable for ship. Analysis ship type is car carrier, container ship, LNGC and ship operation data such as a ship power consumption, operation mode time, heavy consumption usage time were analyzed. The simulation was performed using the LabVIEW program based graphic user interface and modeling the ship electric load was modeled through the analysis of ship power load. To improve the reliability of ship load modeling was added 10% of margin power load. Re-selecting the capacity of the generator based on the power date that analysis, it was established the capacity of the secondary required to this.

The simulation result shows quantitatively by comparing the ship power management system linked battery and exiting power management system using diesel generator specific fuel oil consumption. As a results, the ship power management system applying secondary battery can improved by 2% of ship electric energy efficiency was confirmed.

KEY WORDS: PMS(Power Management System) 전원 관리시스템; Rechargeable Battery 이차전지; Generator efficiency 발전기 효율; Ship Energy 선박에너지; ESS(Energy Storage System) 에너지 저장장치

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

산업혁명 이후 산업경기가 활발히 성장하면서 화석연료의 소비가 빠르게 증가해 왔다. 세계경제의 발달과 함께 시작된 무분별한 화석연료의 사용은 온실가스로 인한 전 세계적인 지구온난화 문제를 야기하였을 뿐만 아니라 화석연료 매장량의 감소로 고유가의 시대를 맞이하게 되었다. 환경문제와 고유가로 인한 문제를 해결하기 위해 많은 논의가 진행 중에 있으며 해결방안으로 신재생에너지의 활용, 온실가스(GHG, Green House Gas) 배출 저감을 위한 탄소가스 배출 규제, 친환경적이며 효율적으로 에너지 사용을 위한 연구 등이 진행되고 있다.

선박은 대량의 자재를 운송 가능하다는 우위적 특성을 기반으로 세계 교역발전의 핵심수단으로 이용되고 있다. 전 세계 물류운송의 약 80%를 해상운송을 통해 운송하고 있으며, 계속해서 선복량은 증가하고 있는 추세이다. 이러한 이유로 그동안 국제사회는 해상운송을 위해 선박의 운항과정에서 발생하는 배기가스로 인한 환경오염 문제를 목인해 왔다. 그러나 선박으로부터 나오는 배기가스 양은 항공기에서 배출되는 배기가스의 약 2배, 세계적으로 총 온실가스 배출량의 약 4.5% 차지한다. 이에 따라 ‘해양오염방지협약(MARPOL)의 부속서 VI’에 따라 NOx, SOx 등 대기오염물질과 이산화탄소 배출을 규제하게 됨에 따라 선박 배출가스 규제는 불가피하게 되었다. 또한 기술적으로는 EEDI(Energy Efficiency Design Index)규제가 2013년부터 1월부터 의무적으로 채택되었으며, 운항 측면에서는 SEEMP(Ship Energy Efficiency Management Plan)의 선내 의무비치가 강화되며 방법으로는 EEOI(Energy Efficiency Operation Indicator)가 권고되고 있다[1,2,3].

선박은 화석연료를 이용하여 운항을 함으로 전 세계 해운업계는 화석연료의

가격 급증과 선박의 탄소가스 배출규제 등으로 인해 선박 운항을 위한 유지비 증가, 탄소배출의 저감을 위한 부가적 추가 장비 탑재 등으로 많은 난항을 겪고 있다. 이에 따라 선박 운항의 효율성 증대 및 운항 원가 절감이 해운업계의 중요 핵심쟁점으로 떠오르고 있다. 이러한 환경규제는 조선 산업의 연비기술 및 친환경 기술 경쟁을 촉발시키고 있다. 프로펠러 최적화를 통한 에너지 효율 개선 방법[4], 발전기 최적화를 통한 에너지 효율 개선 방법[5], 해운업계의 필요에 맞추어 선박의 운항속도에 따른 추진 에너지 절감 방법[6], 폐열 등을 이용한 운항 중 에너지효율 증가 방법[7], 하이브리드 선박을 이용한 연료 저감 방법[8], 온실가스 저감 방법 등을 위한 기술개발이 활발히 진행 중이다. 아래 표 1.1은 조선업계에서 기술개발 추진 중인 기술을 나타낸다. 표 1.1과 같은 기술들을 통한 비용절감 효과는 각 기술별로 상이하나 지속적인 규제와 화석연료 가격의 상승으로부터 해운업계의 생존을 위해 필수가 되었다[1].

Table 1.1 Green ship technologies

구분	분야	기술
에너지 효율향상	선형	구조최적화, 선체 경량화
		조파저항 감소 : 선수부 최적화
		마찰저항 감소 : 선체도료 개발, Air bubble 공기저항 감소 : 상부구조 최적화
	추진성능	고효율 추진기 개발 : 상반회전 프로펠러, 가변 피치 프로펠러, 보스캠핀, 덕트형 프로펠러 부가물에 의한 추진효율 개선
		보조 동력
	기관	Dual Fuel, 하이브리드 등
	전력 효율화	폐열회수 시스템 등
운항 효율화	운항최적화 등	
온실가스저감		이산화탄소(CO_2)포집, 연소가스 후처리
신추진동력	화석연료	가스연료(LNG) 추진 선박
	비화석연료	연료전지, 핵추진 선박

선박의 주 추진기관의 용량 및 발전기의 용량은 선박의 운항 특성, 선박에 탑재되는 장비에 따라 결정되게 된다. 이에 따라 주 추진기관은 선박의 항해

속도에 따라 용량이 결정되어지게 된다. 선박에 탑재되는 발전기용량은 선박전기설비기준에 따라 선박의 주요 전기기기에 전력을 충분히 공급할 수 있는 상용발전설비(주 발전기)를 설치하도록 권고되어 있다. 그러나 발전기용량 선정에 대한 명확한 기준이 정립되지 않았으며, 선내전력 안전을 위해 일반적으로 주 발전기 대수는 충분한 전력을 공급 할 수 있도록 설계하며, 전력소요량 및 사용조건에 따라 경제적인 운전이 가능하도록 2대~4대를 설치한다. 대형 상선의 경우 입항 또는 출항 시 사용하는 전기기기의 사용과 바우 스러스터(B/T, Bow Thruster)의 사용에 따라 많은 전력을 필요로 한다. 따라서 선박 전체 수명주기 중 짧은 기간인 입항 또는 출항 시 필요한 전력을 충분히 공급할 수 있도록 비교적 큰 용량의 발전기를 선박에 탑재하여 사용하고 있다. 이러한 큰 용량의 발전기는 선박 전체 수명주기 중 가장 긴 시간인 항해기간동안 낮은 부하율에서 발전기가 운전되게 되어 발전기 효율 및 수명주기에 좋지 않은 영향을 미치게 된다[9].

이러한 문제점을 방지하고 선박 전체 전력효율을 증가시키기 위하여 에너지 저장장치(ESS, Energy Storage System)을 이용한 에너지 효율 향상 및 전력 안정성 향상에 관한 연구가 이루어지고 있다. 특히 차세대 선박으로 각광받고 있는 All-Electric 선박, 고유가와 육상의 화석연료의 고갈로 인해 수요가 증가하고 있는 해양플랜트 및 해군 함정 등에 에너지 저장장치 적용에 관한 연구 및 선박 전력관리시스템에 관한 연구가 진행되어져 왔다.[10-14] 이러한 특수 선박의 공통점은 큰 전력을 필요로 한다는 것으로 추후 전기기기의 발달로 인하여 대용량의 전기기기의 적용이 광범위해질 것으로 예상되며, 이에 따라 에너지 저장장치 적용 기술은 더욱 각광 받을 것으로 파악된다.

따라서 본 연구에서 대형 상선(컨테이너선, LNGC선)을 대상으로 실제 선박들의 운항데이터를 활용하여 발전기 운용특성을 파악하고 이를 바탕으로 선박 내 전력 운용 효율 개선을 위해 에너지 저장장치를 이용한 알고리즘 개발 및 에너지 저장장치 적용방안에 대하여 연구를 진행하였다.

1.2 연구동향

최근 환경규제에 따른 이산화탄소 배출 규제와 증가하는 화석연료의 가격 및 대용량 전기기기를 이용한 산업이 증가함에 따라 에너지 효율 향상 및 안정적인 전력공급을 위하여 에너지 저장장치 적용 방안에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 대부분의 연구는 에너지 저장장치의 공간적, 가격적 측면의 문제로 소형 시스템에 국한됨에 따라서 대부분의 에너지 저장장치에 대한 연구는 중, 소형 배터리를 이용한 하이브리드 자동차[15]에 국한되어 왔다. 이외에는 특수한 상황에서 사용되는 시스템으로 이차전지를 이용한 차세대 군함[12], 플라이휠 배터리를 이용한 해양플랜트[14] 등에 관한 연구가 진행 중이다.

특히 대형 선박의 에너지 저장장치의 적용에 관한 연구는 미비한 실정이나 대표적인 예로 MOL(Mitsui O.S.K Line)과 Panasonic에서 공동 연구되었던 하이브리드 시스템을 적용한 대형 자동차 운반선 ‘Emerald Ace’를 예로 들 수 있다[16]. ‘Emerald Ace’ 선은 2.2MWh의 대용량 이차전지를 적용한 선박으로 대형 상선에 에너지 저장장치를 적용한 최초의 선박으로 볼 수 있다. ‘Emerald Ace’ 선은 항해시 탄소배출 저감효과가 있으며, 정박시 배기가스를 배출하지 않는다. 그림 1.1은 ‘Emerald Ace’ 나타낸다.



Fig 1.1 Hybrid car carrier ‘Emerald Ace’

1.3 연구내용 및 구성

본 논문에서는 대형 상선에 에너지 저장장치를 이용하여 선박 에너지 효율 개선 방안에 대하여 연구한다. 타당한 에너지 저장장치의 적용을 위하여 실 운항중인 선박의 운항 데이터 및 전력 데이터를 분석하였으며 대형 선박에 적합한 에너지 저장장치를 도출하기 위해 에너지 저장장치의 특성을 비교, 분석하였다. 선박 운항 특성 및 에너지 저장장치의 분석을 바탕으로 선내에 적합한 발전기 및 에너지 저장장치를 적용함으로써 발전기 효율개선과 선내부하에 따라 발전기와 에너지 저장장치를 함께 사용하는 에너지 저장장치 연동형 전력관리 시스템(PMS, Power Management System)을 제안한다.

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있으며 각 장의 내용은 다음과 같다.

제 1 장에서는 선박 에너지 효율 개선을 위한 연구배경을 설명하고, 에너지 저장장치의 연구 동향에 대해 기술한다.

제 2 장에서는 에너지 저장장치의 종류에 대하여 기술하며, 에너지 저장장치를 비교, 분석하고 특징에 대하여 서술한다.

제 3 장에서는 기존 선박의 전력 관리시스템과 선박 운항 특성을 분석하여 서술하며, 에너지 저장장치를 연계한 전력 관리시스템을 제안한다.

제 4 장에서는 제안하는 선박의 전력 시스템과 기존 선박의 전력시스템을 비교하여 시뮬레이션을 진행하고 시뮬레이션 결과에 대하여 설명한다.

제 6 장에서는 시뮬레이션의 결과를 토대로 에너지 저장장치 적용의 개선방안과 향후 활용 방안에 대하여 서술한다.

제 2 장 에너지 저장장치

2.1 에너지 저장장치 개요

전기는 다른 에너지원과 달리 저장에 어려움이 있기 때문에 전력 생산과 동시에 소비가 이루어져야 된다는 특성이 있다. 에너지 저장장치(ESS, Energy Storage System)란 발전원으로부터 생산된 전력을 저장하였다가 전력이 필요한 시기에 전력을 공급하는 시스템을 말한다. 이러한 에너지 저장장치는 세 가지 주요 역할을 한다. 첫째, 에너지 저장장치는 전기소비 피크 시간대에 사용을 위해 오프 피크 시간에 전기에너지를 저장하여 피크 시간대 전력을 사용함으로써 보다 효율적인 전력사용으로 에너지 효율을 높일 수 있다. 둘째, 전력공급의 신뢰성을 높일 수 있다. 비상 및 발전 장애로 인해 전원공급이 원활하지 않을 때 에너지 저장장치를 이용하여 전력공급이 가능하다. 셋째, 에너지 저장장치를 이용함으로써 주파수와 전압을 유지하고 전력품질개선이 가능하다. 이러한 목적으로 현재 사용되고 있는 에너지 저장장치의 경우 출력변동이 심한 태양광, 풍력 등과 같은 신재생에너지(RE, Renewable Energy)의 출력전력을 고품질의 전력으로 전환하여 신뢰성을 확보한다. 또한, 에너지 효율증가 및 배기가스로부터 환경오염 문제를 해결하기 위해 하이브리드 자동차, 전기자동차, 소형 레저선박 등 소형 독립전원 시스템에 사용되고 있다[15,18,19]. 그러나 에너지 저장장치의 공간적 문제와 가격적 측면에 따라 대형 독립전원 시스템에 사용한 경우는 극히 드물다. 대형 독립전원 시스템에 에너지 저장장치가 적용된 경우는 군함과 같은 특수선에 초점이 맞춰져 있으며 특수선의 에너지 저장장치의 설치 목적은 급격한 전력사용으로부터 선내전력을 안정적으로 공급하기 위해 사용된다[20-23]. 그 외에 대형 상선에 에너지 저장장치를 적용에 관한 연구가 소수 이루어진 바 있다[24].

위와 같이 에너지 저장장치는 사용 목적 및 시스템의 크기에 따라 수 kW에서 수십 MW까지 다양하게 이용되고 있으며, 그 종류도 다양하다. 그림 2.1은 에너지 저장장치별 전력 특성을 나타낸다[17].

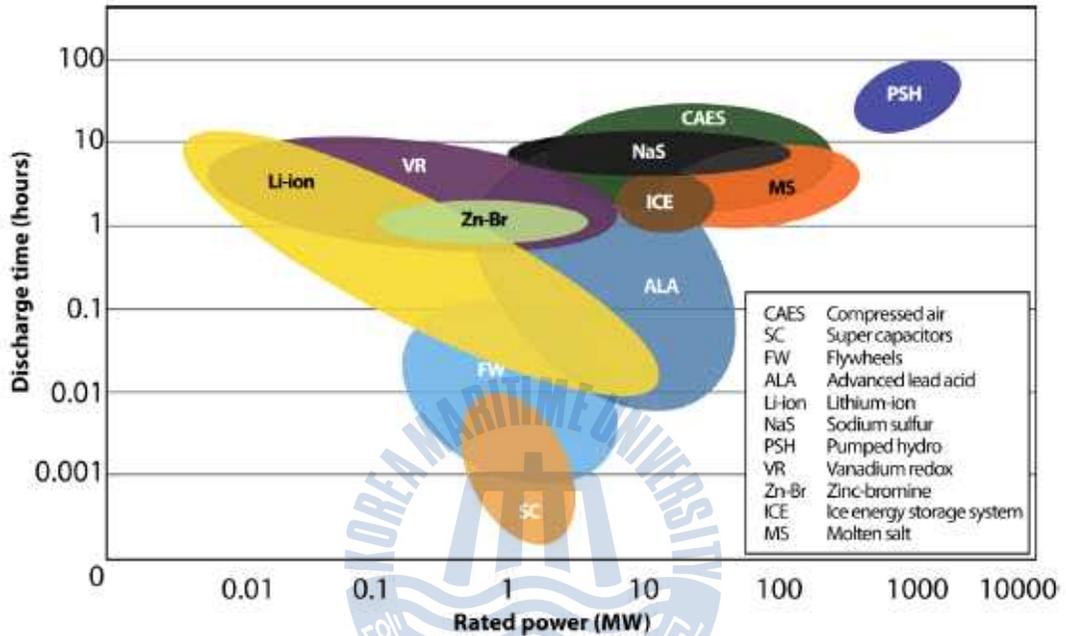


Fig 2.1 Energy storage power characteristics

현재 대형 선박 및 해양 분야와 같은 대용량 전력시스템에 적용된 에너지 저장장치는 울트라 커패시터(ultra capacitor), 플라이휠 배터리(flywheel battery), 이차전지(rechargeable battery)로 크게 세 종류로 나눌 수 있다.

에너지 저장장치는 종류에 따라 에너지 저장밀도, 출력 등의 차이가 있다. 따라서 사용 목적에 가장 적합한 에너지 저장장치를 선정할 필요가 있다. 본 장에서는 에너지 저장장치의 특성을 비교, 분석을 통하여 선박의 잉여 에너지 저장, 에너지 효율 향상, 발전기용량 최적화 등에 가장 적합한 에너지 저장장치를 선정하여 선박 전체 에너지 효율 개선에 관한 연구를 진행하였다.

2.2 울트라 커패시터

커패시터(capacitor)는 화학반응을 이용한 배터리와 달리 두 도체판(극판) 사이 전극간에 절연체를 넣어 직류 전압을 걸면 음극에는 (-)전하가, 양극에는 (+) 전하가 모이는 원리를 이용하여 소재 표면에 대전되는 형태로 전력을 저장한다. 이에 따라 급속 충전 및 방전이 가능하고 높은 효율 및 반영구적인 사이클 수명 특성으로 보조배터리나 배터리 대체용으로 사용될 수 있는 차세대 에너지 저장장치로 각광받고 있다. 커패시터에 저장되는 에너지 E_C [J]는 다음 식 (2.1) 과 같이 나타낼 수 있다. C 는 커패시터의 커패시턴스[F], V_C 는 커패시터 양단의 전압[V]을 나타낸다.

$$E_C = \frac{1}{2} CV_C^2 \quad (2.1)$$

기존의 소용량 커패시터는 정보, 통신기기 및 각종 전자제품에서 사용되는 기초부품으로 전기의 충전 및 방전 기능을 이용하여 회로 내 전기흐름의 안정화 기능을 해왔다. 이러한 커패시터의 용량은 아주 작은 단위인 [μ F] 및 [pF]의 단위를 사용하는 작은 용량을 가진다. 반면에 배터리(battery)는 상당한 양의 에너지를 저장하지만 충전이나 방전에서 커패시터에 비해 상대적으로 오랜 시간이 필요로 한다. 그러나 최근 울트라 커패시터의 개발로 배터리의 에너지 저장 기능과 커패시터의 충전 및 방전 특성을 합한 중간적 성질을 조합한 5,000[F] 이상의 초고용량 제품인 울트라 커패시터가 제시되고 있다. 그러나 개발된 울트라 커패시터는 배터리에 비하여 저장 가능한 에너지가 작은 단점을 가지나 짧은 시간 동안 배터리의 10배 이상의 높은 출력을 낼 수 있다. 울트라 커패시터의 특성은 다음 표 2.1과 같다.

이러한 울트라 커패시터는 낮은 에너지 밀도로 인하여 초고용량을 필요로 하는 분야에 적용이 어려우며, 최근 비교적 중·소형 용량의 하이브리드 자동차 및 잠수함 엔진의 기동용, 국방관련 프로젝트 등에 이차전지 대응 시스템으로

울트라 커패시터 적용기술을 개발 중이다.

Table 2.1 Ultra capacitor specificity

장 점	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 효율(낮은 임피던스) - 긴 수명(10,000회 이상) - 높은 출력밀도(10-300W/Kg) - 짧은 충전시간(3-30분)
단 점	<ul style="list-style-type: none"> - 낮은 에너지 밀도(일반적 배터리의 1/10, 2-4Wh/kg) - 짧은 출력 지속시간 - 고가의 가격과 용량의 한계 - 온도에 민감하여 고온에서 효율 및 안정성 저하

2.3 플라이휠 배터리

플라이휠 배터리(FWB, FlyWheel Battery)는 대용량의 회전체를 무접촉 상태로 부양한 후 고속으로 회전하는 로터의 관성에너지의 형태로 에너지를 저장한다. 플라이휠 배터리에 에너지 저장 시에는 전기에너지를 이용하여 토크로 변환 후 로터(rotor)의 회전을 가속하여 로터의 관성에너지로 변환 저장한다. 반대로 방전 시에는 전기모터를 발전기로 전환하여 이용함으로써 로터의 관성에너지를 전기에너지로 변환시킨다. 내부반경이 R_i , 외부반경이 R_o 인 속이 빈 원통형의 균일한 재질로 이루어진 로터의 경우 관성에너지는 다음 식 (2.2)과 같다 [26].

$$E_f = \frac{1}{2} I_f w^2 \tag{2.2}$$

$$I_f = \frac{1}{2} m_f (R_o^2 + R_i^2)$$

E_f 는 로터의 관성에너지[J], I_f 는 로터의 회전 관성모멘트[$Kg \cdot m^2$], w 는 로터의 회전속도[rad/s], m_f 는 로터의 질량[kg]이다. 즉, 관성에너지는 질량에 비례

하며 로터의 크기(반경)의 제곱과 회전속도의 제곱에 비례한다고 볼 수 있다. 플라이휠 배터리의 로터는 일반적으로 수천에서 수만 [rpm]으로 회전하며 에너지 충·방전 기능을 수행한다. 로터의 에너지를 방전할 시 로터의 최고 회전속도의 약 25%에서 50% 정도까지 사용한다. 로터의 에너지 총량은 로터 회전속도의 제곱에 비례하므로 최고 회전속도의 25%까지 에너지를 방전할 시 로터 총 에너지의 94% 까지 이론적으로 가능하나, 회전속도의 50%정도까지 사용할 시 총 에너지의 75%까지 에너지를 방전될 수 있다. 그러나 너무 낮은 회전속도에서 발전기의 주파수가 낮아져 토크가 증가하여 출력한계도 감소하게 된다.

Table 2.2 Flywheel battery specificity

장 점	<ul style="list-style-type: none"> - 낮은 유지보수 비용 - 수만 회 사이클 사용가능한 긴 수명 - 높은 에너지 효율(75~94%) - 단위 용량당 저 비용
단 점	<ul style="list-style-type: none"> - 짧은 출력 지속시간(수 초~수 분) - 초기 구축비용이 비교적 고가 - 낮은 에너지밀도 - 낮은 에너지 변환 효율

2.4 이차전지

전지(battery)는 전해질과 전해질에 담겨져 있는 양극과 음극으로 분류되는 활물질(Active material) 그리고 분리 막으로 구성되며 내부 활물질의 화학에너지를 화학적 반응에 의해 생산되는 전자를 도선을 통해 외부로 빠져나갈 수 있도록 구조를 만들어 전력을 공급하도록 하는 장치이다. 배터리는 비교적 적은 중량과 부피로 많은 에너지를 저장할 수 있으며 다양한 출력을 낼 수 있어 다양한 분야의 에너지 저장장치에 사용되고 있다. 이러한 전지는 일차전지와 이차전지로 분류할 수 있다. 일차전지란 1회 사용이 가능한 전지를 뜻하는 반면 이차전지는 충전 및 방전을 반복하여 사용할 수 있는 전지를 뜻한다. 그러나

사용 후 다시 사용하는 이차전지라 하여도 영구적으로 사용할 수 없다. 어느 정도의 충전 및 방전 횟수를 사용하게 되면, 전지의 성능이 처음 상태에 비해 떨어져 사용할 수 없게 되며, 이를 전지의 수명 또는 충전 및 방전 사이클이라 한다. 이론적으로 충전 및 방전은 가역적으로 진행되어 영구적으로 사용할 수 있지만 실제로는 완전 가역반응이 일어나지 않아 영구적으로 사용할 수 없게 된다. 이러한 단점에도 불구하고 배터리는 자동차 및 소형 선박의 보조 에너지원으로 가장 많이 사용되고 있다. 배터리에 저장되는 에너지는 다음 식 (2.3)과 같다. 일반적으로 배터리에 저장되는 에너지는 [Wh]를 사용하지만 다른 에너지 저장장치와 비교를 위하여 [J]단위로 변환하였다.

$$E_B = 3600 \times V_B \times Ah \quad (2.3)$$

이러한 이차전지는 양극, 음극 및 전해질의 종류에 따라 Ni-Cd전지, Ni-MH전지, Li-ion 전지 등으로 나뉘며 그 특성도 차이가 난다. 다음 표 2.3은 이차전지의 구성에 따른 특성을 나타낸다.

Table 2.3 Secondary battery specificity

특성	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion	Li-Ion Polymer
평균전압(V)	1.2	1.2	3.7	3.7
에너지밀도(Wh/L)	160	240	300-350	250-300
수명(회)	2,000	2,000	3,000	2,000
자가방전율(%/월)	25	20-25	<10	<<10
정격 전력	1kW-10MW	1kW-10MW	1kW-10MW	1kW-10MW

본 연구에서는 이차전지 중 비교적 에너지 밀도가 높으며 수명도 긴 리튬이온 전지(LIB, Lithium Ion Battery)를 선정하여 다른 에너지 저장장치와 비교하고자 한다. 리튬이온전지는 같은 에너지 용량을 가지는 납축전지의 1/4의 부피

로 만들 수 있으며 출력밀도도 높아 1/5정도의 중량으로 가능함으로 최근 활용도가 높아지고 있다.

2.5 에너지 저장장치의 비교

대형 선박은 입항 및 출항 시 중부하사용에 따라 선박 내 안정적인 전력공급을 위하여 큰 용량의 발전기를 탑재한다. 이러한 큰 용량의 발전기는 선박의 항해 및 정박 시 발전기가 낮은 부하율로 운전되게 된다. 디젤 발전기는 저부하에서 운전하게 되면 발전기 자체 수명에 좋지 않은 영향을 미칠 뿐 아니라 그림 2.2의 디젤 발전기의 연료소비 곡선(SFC, Specific Fuel Consumption)과 같이 연료소비 효율이 저하되어 에너지 효율에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 그림 2,2를 보면 디젤 발전기의 용량이 차이나더라도 연료소비 곡선은 비슷한 형태를 가지며 발전기 부하가 떨어질수록 에너지 효율이 좋지 않음을 확인할 수 있다[27].

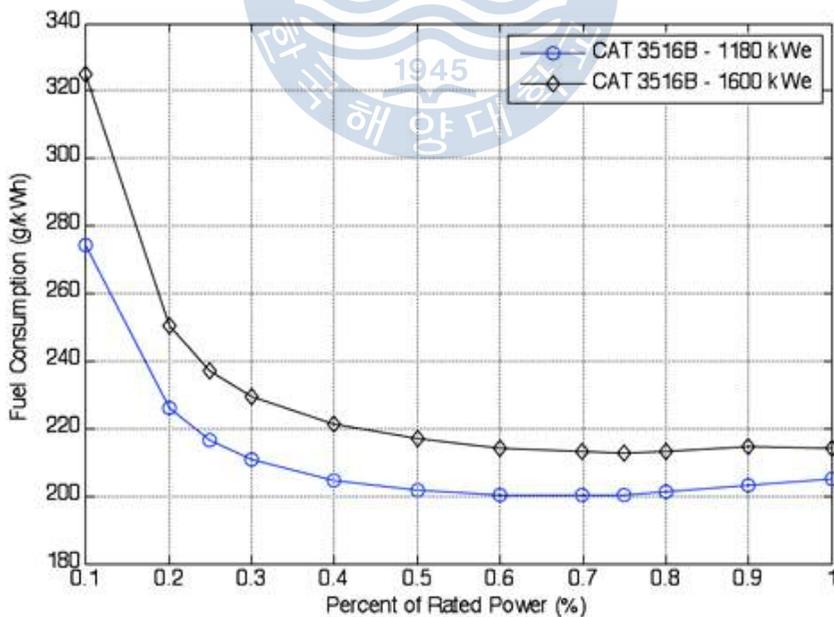


Fig 2.2 Diesel generator SFC curve

선내 발전기 에너지 효율을 높이기 위해 선박에 탑재되는 발전기의 용량을 줄이고 이에 따른 부족한 전력을 에너지 저장장치를 적용하여 전력공급을 공급함으로써 선박 전체 전력 에너지 효율을 개선할 수 있다. 에너지 저장장치의 비교를 위해 에너지 저장장치 시스템의 특징을 표 2.4와 같이 비교하였다.

Table 2.4 Specification of energy storage module

	울트라 커패시터	플라이 휠	이차전지(LIB)
에너지 밀도(Wh/kg)	10	30	350
출력 밀도(W/kg)	10,000	-	1,000
전력변환효율	90%	85%	95%
정격 전력	~100kW	5kW ~ 1.5MW	1kW ~ 10MW
출력 시간	1초 ~ 1분	15초 ~ 15분	1분 ~ 3시간
수 명(Cycle)	500,000	100,000	3,000
제어 응답성	매우 빠름	매우 빠름	빠름

울트라 커패시터와 플라이휠 배터리는 빠른 충전 및 방전이 가능하나 단시간 사용되는 고출력 시스템에 적합하므로 일반적인 대형 상선이 입항 및 출항 시 소요되는 시간을 약 1시간으로 고려하였을 때 에너지 저장장치로 적합하지 않다. 이에 반해 리튬이온전지의 경우 비교적 빠른 응답성과 에너지 전환의 용이성, 비교적 긴 출력지속시간 등으로 인하여 선박 에너지 저장장치로 적합할 것으로 판단된다. 이에 따라 울트라 커패시터의 경우 응답성이 가장 빠른 장치이므로 이차전지 또는 다른 에너지 저장장치와 하이브리드 시스템을 구축하여 피크전력 보상장치로 사용된다[8]. 그러나 이러한 울트라 커패시터는 가격적 측면과 부피적인 문제로 인하여 대용량 시스템에 적용이 불가능하다.

본 연구에서는 선내전력 보상시스템으로 가장 적합한 에너지 저장장치인 이차전지를 적용하고자 연구를 진행한다. 이를 위해 선박 운항특성을 분석하여 적용 타당성을 갖추는 이차전지 시스템 및 발전기용량 등을 선정하고자 한다.

제 3 장 선박 전력시스템

3.1 선박 운항 특성 분석

선박의 전력시스템에 있어 발전기는 매우 중요한 부분이다. 선박에 탑재되는 발전기의 수량 및 용량은 선박 전력시스템에 안정적인 전력공급을 위해 선박의 종류에 따라 다르다. 선박에 발전기 탑재 시 선박 운항특성에 따라 발전기 종류, 발전용량 및 설치 수량 등이 고려되어야 한다. 발전기에서 생산된 전력은 선박 내 선원 거주구역, 항해에 필요한 항해장비, 기관실의 각종 펌프 및 보조 기계의 구동을 위해 사용된다.

선박의 발전기용량 및 설치 수량을 결정하기 위해 선박 전력시스템 설계 시 선박 전력부하분석(Electric power load analysis), 여유부하(Load margin), 발전기 안정성(수시 및 과도현상에 대한 분석) 및 선내부하에 대비한 발전기 적정 운전율 등을 종합적으로 반영하여 발전기용량을 선정한다. 그러나 발전기용량 및 수량 선정 시 정확한 선박 운항 특성 반영의 어려움에 따라 단순한 계산식에 의해 결정된 발전기용량 및 수량에 여유부하를 함하여 적용하고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 발전기용량 선정 및 에너지 효율 개선을 위한 이차전지 적용을 위해 선박 전력 분석 및 운항특성을 분석하고자 한다. 선박 전력시스템 분석을 위해 선박 내 각종 장비에 대한 모델링이 필요하나, 수학적 모델링의 한계를 극복하기 위해 현재 운항 중에 있는 선박 전력 계측 데이터를 바탕으로 분석하였다.

선박 전력소비량은 선박의 운항조건 및 장비 운전 상황에 따라 달라진다. 선박 내 전력 소비처는 선내 거주구역에 필요한 장비(환풍 시스템, 선내, 외 전 등, 세탁기, 선원 개인용품), 주 추진기 및 항해에 필요한 각종 항해 통신장비, 펌프 및 보조기기, 입항 및 출항에 따른 바우 스텔러스터(B/T) 모터, 선종에 따라

컨테이너선의 경우 냉동컨테이너(REF, reefer container), 탱커선(tanker, 유조선 및 LNG, LPG 운반선)의 경우 카고 펌프(cargo pump)등이 있다. 이 중 선내 거주구역 및 항상 가동되는 보조기기, 펌프 등으로 인한 전력 소비량 변동은 매우 작으며 전체 선내부하에서 차지하는 비율이 일정함으로 발전기 부하율 변동에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 선내전력 분석 시 입항 및 출항에 따라 사용되는 중부하 장비 및 항해 시 소비되는 전력을 중점으로 데이터를 분석하였다. 전력 분석은 총 18척(4,600TEU 컨테이너선 6척, 8,600TEU 컨테이너선 6척, LNGC 4척, 자동차 운반선 2척)에 대하여 1개월 이상 데이터 수집 및 조사를 통하여 분석을 진행하였다. 같은 크기의 선박의 선박 내 주요 제원(발전기, 대형 펌프 등)은 모두 비슷하거나 동일하였다. 또한 각 선박의 항로 차이는 있었으나 소비 전력 및 운항시간은 다소 차이가 있을 뿐 대부분 동일하였다. 이에 따라 본 장에서는 선박 내 발전기용량 및 이차전지 용량 선정을 위하여 각 선종별 운항 데이터를 일반화하기 위해 분석하고자 한다.

3.1.1 운항모드별 운항 비율

선박은 선박의 종류에 따라 항차동안 여러 운항모드가 있다. 선박에 적용할 발전기 및 이차전지의 용량은 선박의 운항특성과 소비전력에 따라 적용된다. 이에 따라 각 선박 당 30일 내외의 항해기록을 분석하여 선종에 따라 운항특성의 평균을 구하여 다음 그림 3.1과 같이 분석하였다. 선박 운항모드는 대표적으로 원항을 항해하는 항해(seagoing), 항구에 입항(arrival) 또는 출항(departure), 바다 위에 표류(drifting) 및 앵커링(anchoring) 등의 운항모드가 있다. 탱커선의 경우 컨테이너선박과 자동차 운반선과는 달리 항구에 정박 시 화물을 하역 또는 선적하기 위해 고용량의 화물펌프를 운용함으로 하역 및 선적 기간으로 나타내었다. 선박은 운항 목적 및 종류와 무관하게 선박 운항 기간 중 대부분의 시간을 항해하는데 사용하게 된다. 선박의 목적상 물류를 바닷길을 이용하여 다른 지역으로 이송하는데 있어 선속이 다른 이동수단에 비해 느릴 뿐만 아니라 장거리 운송을 함에 따라 바다위에서 항해하는 시간이 선박 운항기간 중 대다수를 차지한다. 입항 및 출항은 선박에 싣고 있는 물류를 하역하거나 이송할 물류를 선적하기 위해 항구에 정박하게 됨을 뜻한다. 선박의 특성상 많은 물건

을 운송해야 하므로 선박 운항에 문제가 없는 한 하역 또는 선적이 완료되면 항구를 출항하게 된다. 따라서 선박 운항기간 중 입항 및 출항은 필수적이나 매우 짧은 시간에 이루어짐을 확인할 수 있다. 항해, 정박, 입항 및 출항을 제외한 운항모드 즉, 협수로 통과, 운하통과, 해적위험 구간 및 황천항해 등을 기타로 칭한다. 이러한 기타 운항모드는 매우 특이한 운항모드로 본 논문에서는 이차전지 및 발전기용량선정에 있어 고려하지 않고 항해기간, 입항 및 출항에 따른 운항 특성을 고려하여 선정하고자 한다.

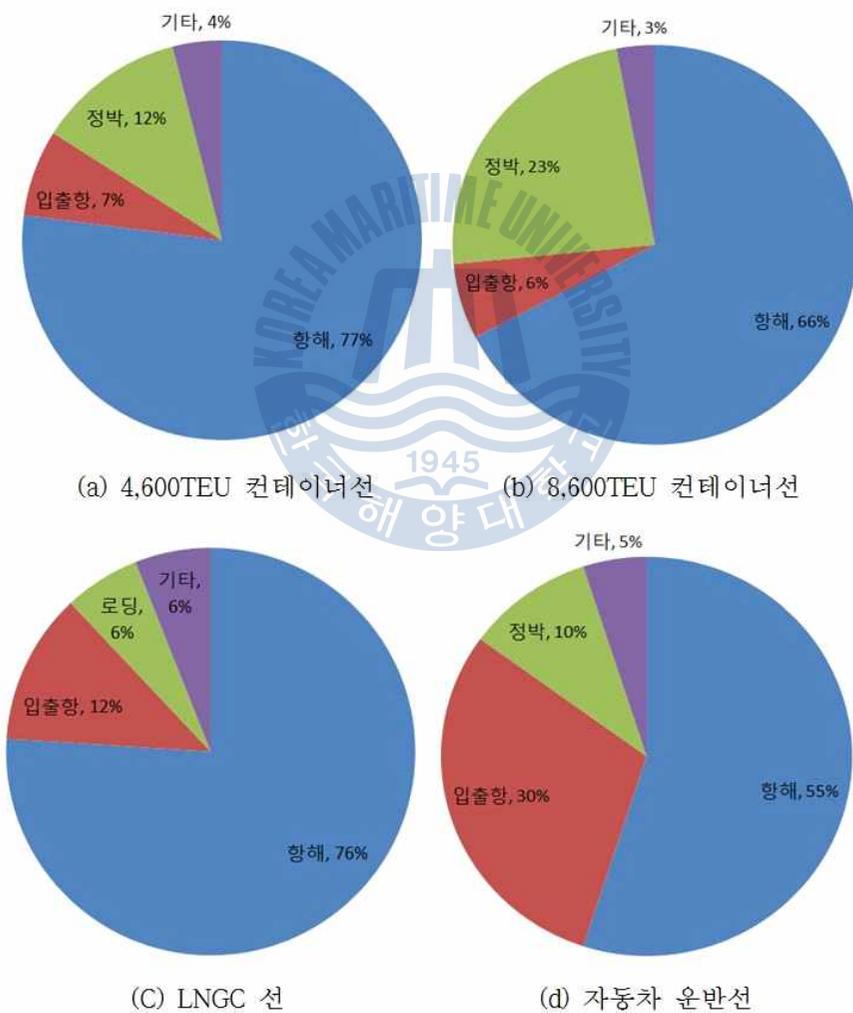


Fig 3.1 Ship operation characteristics

3.1.2 선종별 제원 특성

선박은 운항모드에 따라 사용되는 장비와 장비 구동시간이 변경됨에 따라 선내 전체 전력소비량이 변하게 된다. 이에 따라 선박 내 발전기 선정에 있어 모든 경우의 상황에 선내전력이 부족하지 않게 발전기를 탑재하게 된다. 이에 따라 같은 크기와 같은 종류의 선박의 경우 설치되는 주요 장비의 제원은 같거나 비슷하다. 다음 표 3.1부터 3.4는 선종 및 선박의 크기에 따른 주요제원(발전기 및 바우 스러스터 모터)의 소비전력과 설치대수 그리고 발전기 운전특성을 나타낸다.

Table 3.1 4,600TEU container ship specification

선종	4,600TEU 컨테이너 선박
Bow Thruster (설치대수/Capacity/설치선박 수)	1대 / 2,000kW / 5척 1대 / 1,800kW / 1척
Generator Engine (설치대수/Capacity/설치선박 수)	4대 / 1,700kW / 6척
발전기 운전 특성	항해시 1대의 발전기만 구동 입항 및 출항 시 냉동컨테이너 수량에 따라 3대~4대의 발전기 구동

Table 3.2 8,600TEU container ship specification

선종	8,600TEU 컨테이너 선박
Bow Thruster (설치대수/Capacity/설치선박 수)	1대 / 3,000kW / 6척
Generator Engine (설치대수/Capacity/설치선박 수)	4대 / 3,300kW / 5척 4대 / 3,470kW / 1척
운전 특성	항해시 1대의 발전기만 구동 입항 및 출항 시 냉동컨테이너 수량에 따라 3대~4대의 발전기 구동

컨테이너 선박의 경우 설치되는 바우 스러스터 모터의 용량 및 발전기용량의 차이가 다소 있으나 큰 차이가 없으며 비슷한 발전 용량과 소비 전력을 가진다. 운전 특성은 황천항해나 수에즈 운하 통과 및 해적출몰 구간과 같이 2대의 발전기를 병렬 운전하는 특수한 상황을 제외하면 일반 항해 중 발전기 구동은 1대만 하여 선내에 전력을 공급하며 입항 및 출항 시 선박에 탑재된 냉동컨테이너 수량에 따라 3대 발전기 병렬운전 또는 4대의 발전기를 병렬 운전한다.

Table 3.3 LNGC ship specification

선종	LNG 운반선박
Bow Thruster (설치대수/Capacity/설치선박 수)	1대 / 2,000kW / 4척
Generator Engine (설치대수/Capacity/설치선박 수)	3대 / T/G 3,300kW×2, D/G 3,300kW ×1 / 4척
발전기 운전 특성	항해 시 터빈 발전기(T/G, Turbine Generator) 1대의 발전기만 구동 입항 및 출항 시 2대, unloading시 3대

LNGC선박의 경우 외부 장비를 이용하여 컨테이너를 하역하는 컨테이너선과는 달리 LNG(Liquefied Natural Gas)를 직접 선내 카고 펌프(Cargo pump)를 사용하여 하역함에 따라 Unloading시 많은 전력을 필요로 한다. 입항 및 출항 때 바우 스러스터 사용으로 가장 많은 전력을 필요로 하는 컨테이너선과는 달리 LNGC선의 경우 LNG를 하역하는 카고 펌프사용으로 인하여 입항 및 출항 시 보다 더 많은 전력을 필요로 하므로 발전기를 3대 병렬운전하게 된다. 그러나 선적(loading)시에는 외부의 LNG 이송펌프를 이용하여 선박으로 보냄으로 선박 내 별도의 펌프구동 없어 선내전력부하는 증가하지 않는다. 이러한 LNGC선의 특성상 정박을 선적(loading)과 하역(unloading)으로 구분하여 적용하였다.

Table 3.4 Car carrier ship specification

선종	자동차 운반선
Bow Thruster (설치대수/Capacity/설치선박 수)	1대 / 1,200kW / 1척 1대 / 1,325kW / 1척
Generator Engine (설치대수/Capacity/설치선박 수)	3대 / 730kW / 1척 3대 / 1,180kW / 1척
발전기 운전 특성	항해 시 1대의 발전기만 구동 입항 및 출항 시 3대의 발전기 구동

자동차 운반선은 선박의 목적상 자동차를 운송함에 있어 항구 출입이 컨테이너선 및 탱크선에 비하여 자주 일어나게 된다. 또한 하역물(자동차)이 직접 동력을 이용하여 이동됨으로 선적 및 하역에 따라 별도의 추가 장비 없이 가능하며 하역물의 이동에 소요되는 시간이 매우 짧은 특징을 가진다.

3.1.3 운항모드별 전력소비량

선박 전력 에너지 효율 개선을 위해 발전기 및 이차전지 용량 선정은 필수적이다. 현재 대부분의 선박은 선내전력부하(SEL, Ship Electronic Load) 분석과 부하여유(load margin)를 합하여 발전기용량을 선정한다. 그러나 이러한 방법은 선박 운항특성과 장비사용에 대한 정확한 이해 없이 이루어지므로 실제 선박 전력소비량과 많은 차이가 발생한다. 이에 따라 대부분의 발전기는 항해구간에 있어 발전기 부하율이 낮은 상태로 운전되므로 에너지 효율에 좋지 않은 영향을 가지게 된다. 본 논문에서는 실제 운항중인 각 선박별 전력데이터를 분석하여 전력소비량을 운항모드별로 일반화를 하고자 한다. 일반화를 통한 전력소비량을 기준으로 발전기용량 선정범위를 찾고 이에 따른 이차전지 용량을 선정함으로써 에너지 효율을 개선하고자 한다. 다음 표 3.5는 선박별 항해구간에서의 전력소비량을 나타낸다.

Table 3.5 Ship power analysis at seagoing

선 종	선 박	항해 평균 전력	항해 최대 전력
4,600TEU 컨테이너선박	4,600TEU A	1,079 kW	1,229 kW
	4,600TEU B	1,189 kW	1,440 kW
	4,600TEU C	1,050 kW	1,300 kW
	4,600TEU D	1,074 kW	1,228 kW
	4,600TEU E	977 kW	1,126 kW
8,600TEU 컨테이너선박	8,600TEU A	2,447 kW	2,930 kW
	8,600TEU B	1,700 kW	2,089 kW
	8,600TEU C	1,573 kW	2,008 kW
	8,600TEU D	1,787 kW	2,221 kW
	8,600TEU E	2,041 kW	2,760 kW
LNGC선박	LNGC A	2,236 kW	2,358 kW
	LNGC B	2,194 kW	2,450 kW
	LNGC C	2,199 kW	2,245 kW
	LNGC D	2,204 kW	2,654 kW

대상선박의 경우 항해기간은 선박 운전 중 가장 많은 시간을 보내는 운항모드로 전체 운행기간의 60% 이상을 차지한다. 이러한 항해기간은 선박 전체 에너지 효율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며 현재 운항 중인 선박의 전력 상태를 분석하여 발전기용량 선정을 하고자 한다. 표 3.5와 같이 선종에 따라 항해 중 평균전력의 차이가 있으나 같은 선종일 경우 평균전력이 비슷하게 나타남을 확인할 수 있다. 앞에 조사하였던 선종별 발전기용량과 비교하면 발전기 부하율이 65% 내외로 운전되고 있음을 확인하였다. 이에 따라 선내 발전기용량을 축소함으로써 항해 중 발전기효율 개선이 가능할 것으로 판단된다.

발전기용량 선정 시 선내 에너지 효율을 고려하여 선정해야하며 또한 발전기 생산전력이 충분히 선내에 공급 가능하도록 안전성도 함께 고려하여야 한다. 따라서 발전기용량 선정에 있어 발전기 에너지 효율을 위해 선박운항 중 가장 긴 시간을 운전하는 항해기간이 중요하나, 안전성을 위해 가장 많은 전력을 필요로 하는 입항 및 출항 기간에 소비되는 전력량을 함께 고려하여야 한다. 표 3.6는 선박별 입항 및 출항 구간에서의 전력소비량을 나타낸다.

Table 3.6 Ship power analysis at arrival and departure

선 종	선 박	입·출항 평균 전력 (B/T '0' Pitch)	입·출항 평균 전력 (B/T 'Full' Pitch)
4,600TEU 컨테이너선박	4,600TEU A	3,076 kW	4,256 kW
	4,600TEU B	1,946 kW	3,126 kW
	4,600TEU C	3,115 kW	3,645 kW
	4,600TEU D	1,531 kW	2,711 kW
	4,600TEU E	1,290 kW	2,950 kW
8,600TEU 컨테이너선박	8,600TEU A	2,799 kW	-
	8,600TEU B	2,217 kW	-
	8,600TEU C	1,983 kW	-
	8,600TEU D	-	-
	8,600TEU E	2,500 kW	-
LNGC선박	LNGC A	3,817 kW	5,726 kW
	LNGC B	4,495 kW	8,368 kW
	LNGC C	2,924 kW	4,674 kW
	LNGC D	2,351 kW	4,127 kW

입항 및 출항 시 선박은 선속의 감소로 인하여 보조기기(Aux. blower 등)의 사용 및 항구 접안 및 이안을 위해 사용되는 장비로 인하여 항해 시보다 필요

전력량이 증가하게 된다. 특히, 바우 스러스터(B/T)는 선박 내 단일 장비 중 가장 많은 전력을 소비하는 장치로 바우 스러스터에 안정적인 전력공급을 위한 발전기 설치대수 및 용량을 고려하여야 한다.

선박은 정박 이후 하역 또는 선적 작업을 한다. 이에 따라 하역 또는 선적에 필요한 장비를 제외한 장비를 정지하게 되며 일반적인 항해 기간보다 필요전력이 적으나, LNGC선박의 경우 하역 시 H/D Comp.(High Duty Compressor) 사용으로 입항 및 출항 시보다 많은 전력을 필요로 하는 경우가 있다. 표 3.7는 정박 시 선박의 전력소비량을 나타낸다.

Table 3.7 Ship power analysis at harbor anchorage

선종	선박	정박 평균 전력	정박 최대 전력
4,600TEU 컨테이너선박	4,600TEU A	831 kW	900 kW
	4,600TEU B	852 kW	970 kW
	4,600TEU C	743 kW	880 kW
	4,600TEU D	849 kW	1,106 kW
	4,600TEU E	-	-
8,600TEU 컨테이너선박	8,600TEU A	1,576 kW	1,829 kW
	8,600TEU B	1,091 kW	1,323 kW
	8,600TEU C	877 kW	1,099 kW
	8,600TEU D	976 kW	1,217 kW
	8,600TEU E	833 kW	1,000 kW
LNGC선박 Loading/ Unloading	선박	Loading 전력	Unloading 전력
	LNGC A	3,716 kW	7,368 kW
	LNGC B	-	-
	LNGC C	-	-
	LNGC D	-	-

정박 시 컨테이너선의 경우 항구에 설치되어 있는 외부 크레인을 이용하여 컨테이너를 이송함으로써 필요전력량이 항해 시에 비하여 현저히 낮음을 확인할 수 있다. 그러나 LNGC선박의 경우 선적(Loading)때는 외부의 펌프를 이용하여 LNG를 공급받으나 선적 중 발생하는 BOG(Boiled Oil Gas)를 육상으로 다시 이송하기 위해 화물이송 펌프를 이용함에 따라 추가 전력소비가 발생한다. 또한 하역(Unloading)시에는 선내 LNG를 육상으로 이송하기 위해 고용량의 H/D Comp.를 이용함에 따라 입항 및 출항 시보다 월등히 많은 전력이 요구됨을 확인할 수 있다.

3.1.4 운항모드별 중부하 사용시간

선내 에너지 효율을 개선하기 위해 항해, 입항 및 출항, 정박, 하역 및 선적에 따른 전력요구량을 분석하였고 이를 고려하여 발전기용량 및 대수와 이차전지 용량을 선정하여야 한다. 이차전지는 발전기와 같이 연료를 소비하여 지속적인 출력을 내지 못하며, 저장된 화학적 에너지를 전기에너지로 변환하는 장치로 용량에 따라 지속 가능한 출력시간의 한계가 존재한다. 따라서 선박에 이차전지를 적용하기 위해 각 특수한 상황(입항 및 출항)에 충분한 전력이 공급 가능하도록 이차전지 용량을 선정하여야 한다. 이에 따라 특수한 운항에 따른 소요 시간을 다음 표 3.8과같이 나타내었다.

Table 3.8 Time of heavy consumer used by arrival and departure

선 박	총 입항 및 출항 시간	B/T 사용시간	선적시간	하역시간
컨테이너선박	2시간	30분	-	-
LNGC선박	2시간	30분	8시간	11시간
자동차운반선	1시간 30분	30분	-	-

선박 입항 및 출항시간과 바우 스러스터 사용시간은 항구의 상황과 도선사의 기질에 따라 변동한다. 이에 따라 입항 및 출항 시간을 정의하는 것은 매우 어

렵다. 본 논문에서는 선박 종류별 입항 및 출항시간을 받아 분석하였고 현재 선박 운전자(operator)들의 의견을 수집, 반영하여 일반적인 항구 입항 및 출항 시간과 바우 스러스터 사용시간을 정의하였다. 발전기 및 이차전지 용량선정에 안정성을 높이기 위하여 입항 및 출항 시간에 충분한 여유시간을 포함하여 표 3.8과 같이 나타내었다.

3.1장에서 정확한 선박 운항 상태를 파악하기 위해 실 운항 중인 선박의 전력 및 운항 데이터를 분석하였다. 선박 항차 주기에 따른 운항모드별 운항 비율을 분석하고 선종에 따른 주요 선박 내 제원 특성에 대하여 조사한 후 운항 모드별 선박 전력소비량을 나타내었다. 마지막으로 특수한 운전 조건에서의 중부하 사용 상태에 대하여 분석을 통하여 선박 전력소비량을 나타내었다.

3.2 전력관리시스템

선박 전력관리시스템(PMS)은 선내에 안정적으로 전력을 공급하기 위해 부하 및 발전기 관리를 위해 필수적으로 필요하다. 전력관리시스템은 다중 시스템으로 다중 발전기 제어, 부하에 따른 발전기 시동/정지 제어 등을 수행한다. 본 논문에서는 선박 내 에너지 효율 개선을 위해 발전기 및 이차전지 용량을 제안하고, 이에 따른 이차전지 연동형 전력관리시스템을 제안하고자 한다. 이에 따라 기존 선박에 적용되어 있는 전력관리시스템에의 기능을 다음과 같이 분석하였다.

3.2.1 부하분담 시작 및 정지 기능

부하분담 시작/정지 기능은 전력관리시스템의 여러 기능 중 하나로 자동운전 모드로 전력관리시스템을 선택하였을 시 활성화 된다. 부하분담 시작/정지 기능은 전력관리시스템의 명령을 받아 작동되며, 선내 전원에 안정적인 전력공급을 위하여 전력상황을 판단하여 발전기 병렬운전 또는 운전정지 등을 판별하여 제어한다. 또한 발전기 운전시간을 반영하여 다중 발전기의 운전시간이 동일하도

록 우선순위 기준에 따라 발전기를 제어한다. 이러한 발전기 부하분담 시작/정지 제어 명령은 일반적으로 전력관리시스템에 프로그램 되어 있는 발전기 부하값(kW) 또는 부하율(%)을 비교하여 제어하게 된다.

이는 선박 부하에 따라 발전기가 고부하 또는 저부하에서의 운전을 방지하기 위해 특정 부하에 도달하면 발전기 시작/정지 시퀀스에 따라 우선순위 발전기가 운전/정지하게 된다. 즉, 하나의 발전기가 가동 중일 때 선내 장비 사용으로 부하가 증가하게 되면 발전기 여유전력(P_A)이 감소하게 된다. 발전기 여유전력이 감소하면 발전기 시동정지(Trip) 또는 선내 안정적인 전력공급의 위험이 있으므로 여유전력 확보를 위해 발전기를 병렬 운전하여 부하분담을 하게 된다. 발전기 병렬운전 중 다시 선내부하가 감소하여 여유전력이 증가하게 되면 발전기의 저부하 운전의 위험이 있으므로 이를 방지하기 위해 여유전력이 발전기 정격전력(P_N)이상으로 증가하였을 때 발전기가 정지하게 된다. 그림 3.2는 발전기 부하분담 시작에 따른 발전기 운영상태 예를 나타낸다.

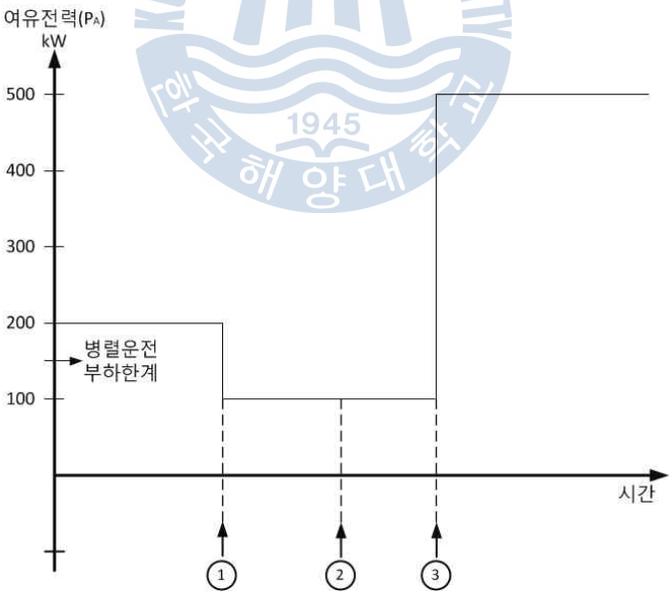


Fig 3.2 Generator load-dependent start

그림 3.2와 같이 발전기 부하분담은 다음과 같은 순서로 진행된다.



- 발전기 단독운전
- 선내부하증가에 따른 발전기 여유전력 감소
- ① 부하분담 부하 한계이하로 선내부하증가
- ② 발전기 병렬운전 지연시간 대기
- ③ 대기(St' by) 발전기 운전 후 부하분담 시작

그림 3.3은 발전기 부하분담 시작 흐름도를 나타낸다.

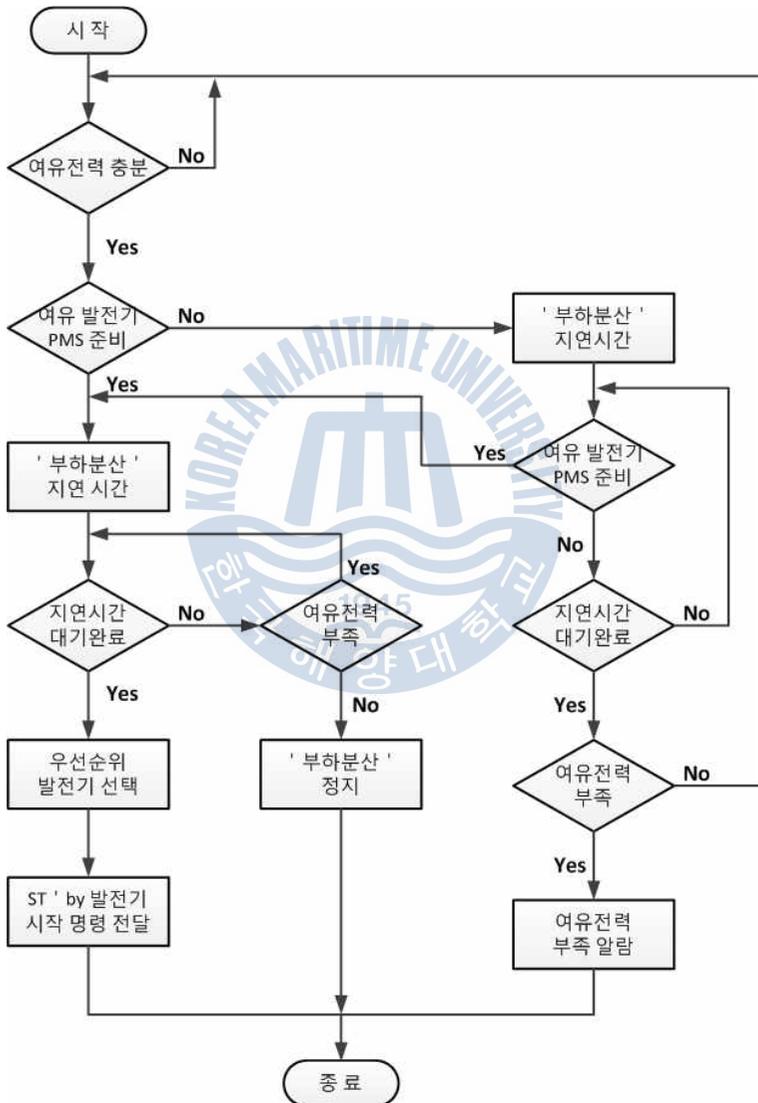


Fig 3.3 Generator load-dependent start flow chart

위와 반대로 부하분담 중인 발전기들의 여유전력이 발전기 1대의 정격전력이

상이며, 한대의 발전기가 정지되더라도 나머지 발전기로 충분히 안정적으로 전력이 공급 가능한 전력 값일 때 운전 중인 발전기에 정지 명령신호를 전달하게 된다. 그림 3.4는 발전기 부하분담 정지에 따른 발전기 운영상태의 예를 나타내며 그림 3.5은 발전기 부하분담 정지 흐름도를 나타낸다.

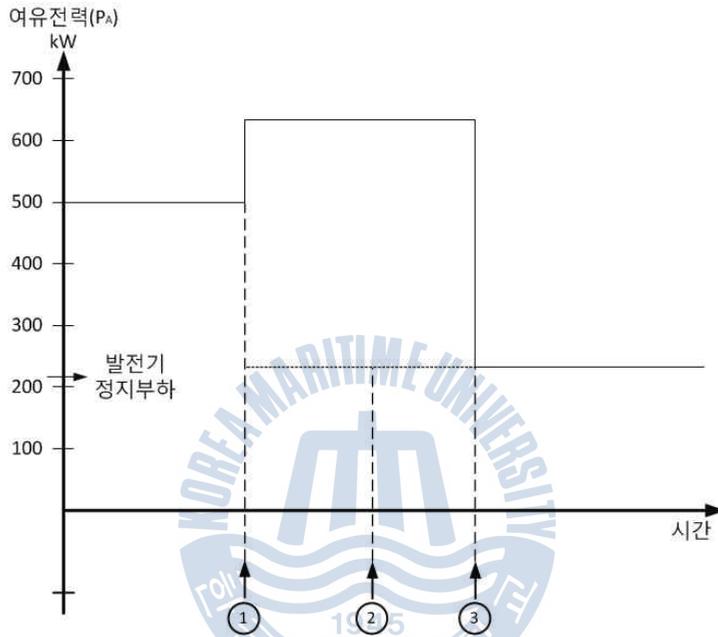


Fig 3.4 Generator load-dependent stop

그림 3.4와같이 발전기 부하분담의 정지는 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 선내부하감소로 인한 발전기 여유전력 증가
- ② 발전기 부하분담 정지 지연시간 대기
- ③ 발전기 부하분담 정지

발전기 부하분담 시작/정지 기능은 지정된 발전기 부하율 기준으로 제어된다. 따라서 능동적으로 제어가 되지 못하며 부하분산 정지점과 부하분산 시작점을 기준으로 그림 3.6와 같이 히스테리시스를 형성하며 여유전력이 변화하게 된다.

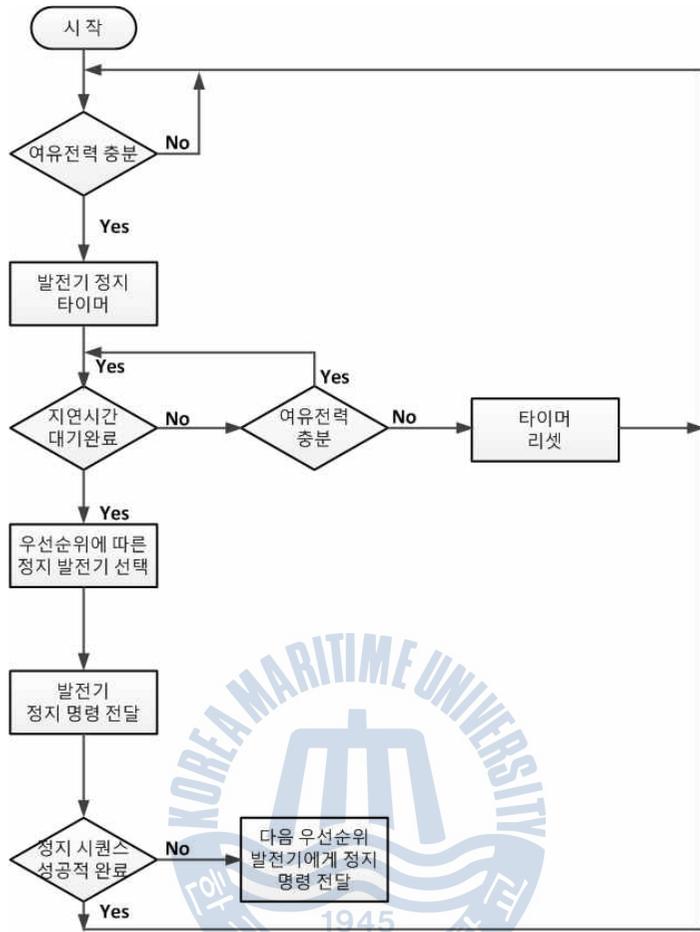


Fig 3.5 Generator load-dependent stop flow chart

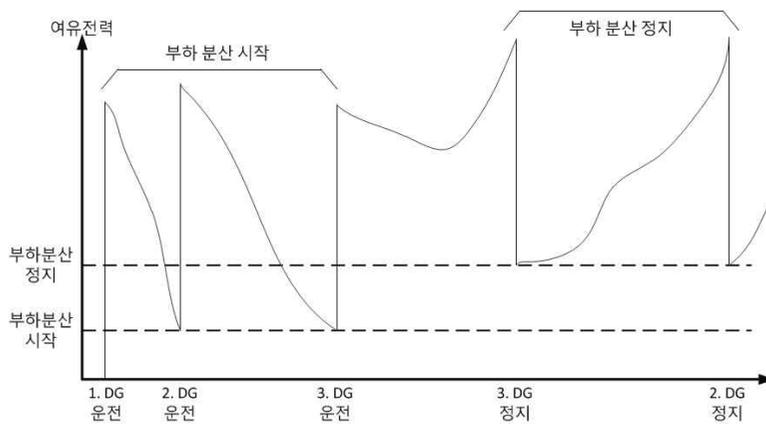


Fig 3.6 Generator load-dependent of PMS

3.2.2 비 필수부하 제어

선내부하의 갑작스런 증가나 지속적으로 높은 부하가 유지될 때 선내 과전류, 주과수, 과부하 등의 문제로 인한 선박 정전현상(Black out)을 방지하기 위해 비 필수부하(NEL, Non Essential Load)의 정지동작을 수행하여 선내전력공급을 안정화 시킨다. 비 필수부하란 부하가 정지되더라도 직접적으로 항해에 영향을 미치지 않는 장비를 뜻한다. 비 필수부하는 각 단위로 구성되어 설정에 따라 부하 정지동작을 수행한다. 이러한 비 필수부하 제어는 다음 경우에 사용된다.

- 발전기의 과부하 및 높은 부하율
- 버스바(busbar)의 낮은 주과수
- 불안정한 역율(0.7 이하)

비 필수부하를 정지시키므로 버스바의 유효전력을 감소시킬 수 있으며 발전기 부하율을 낮춤으로 정전현상을 방지할 수 있다.

3.2.3 중부하 관리

중부하(HC, Heavy Consumer) 관리는 선박의 전력관리시스템의 중요한 부분을 차지한다. 중부하는 순간적으로 많은 전력을 요구하므로 발전기 과부하 방지 및 정전현상을 막기 위해 중부하 관리시스템은 필수적이다.

중부하 관리시스템은 선내 중부하 사용 요청이 오게 되면 중부하 관리시스템에 설정되어 있는 장비의 요청 전력 값을 여유전력에 계산하여 중부하 기동여부를 판단하게 되어 충분한 여유전력을 확보한 뒤 중부하 연결을 진행하게 된다. 이때 중부하 연결은 발전기의 안정화 이후 진행되어야 함으로 약 4초 정도의 지연시간 이후 중부하 연결을 한다. 두 개 이상의 중부하 요청이 동시에 일어난다면, 우선순위가 높은 중부하에 대한 연결이 먼저 이루어진 후 남은 중부하의 연결 여부를 다시 판단하게 된다. 따라서 중부하 관리시스템에 미리 중부하의 우선순위를 지정하여야 한다. 그림 3.7은 중부하 관리시스템의 진행 예를 나타낸다.

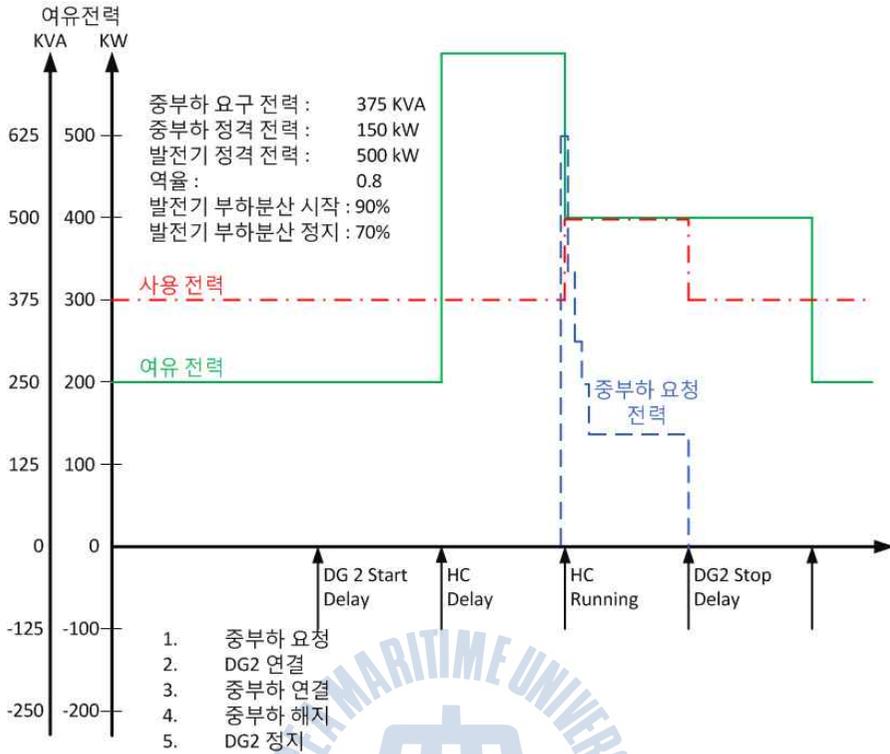


Fig 3.7 Heavy consumer management system

그림 3.7과 같이 중부하 관리시스템은 다음과 같은 순서로 진행된다.

- 각 중부하의 요청전력은 전력관리시스템에 설정되어 있음
- 요청 중부하 운전에 따른 여유전력 예측(여유전력 부족 시 발전기 부하분담 시작 운전명령 전달)
- 충분한 여유전력 확보 후, 중부하 연결 지연시간 대기
- 중부하 연결 후 발전기 부하분담 시작/정지 기능에 따라 제어

실 항해 중인 선박을 대상으로 병렬운전 시점을 분석한 결과 발전기 부하율이 70% 이상이 될 경우 수동으로 병렬운전을 하고 있음을 확인하였다. 이는 중부하 사용 시 중부하 기동에 따른 피크전력으로 인한 발전기 손상 및 정전현상을 방지하기 위해 미리 수동으로 운전자가 발전기 병렬운전을 지시한다.

3.3 이차전지 연동형 전력관리시스템

본 논문에서는 선박 에너지 효율을 개선하기 위해 적합한 발전기 및 이차전지 용량을 선정하고자 한다. 이차전지는 연료가 공급되면 지속적으로 전력생산이 가능한 발전기와는 달리 저장된 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하여 사용하기 때문에 전력사용량의 한계가 있다. 또한 이차전지와 발전기는 출력 전력특성의 차이가 있으므로 선내 에너지 효율 개선을 위해 기존의 전력관리시스템과는 다른 이차전지 연동형 전력관리시스템(BLPMS, Battery-Linked Power Management System)이 제안되어야 한다. 따라서 이차전지 연동형 전력시스템은 다음과 같은 기능을 충족하여야 한다.

첫째, 기존 선박에 설치된 발전기용량을 줄이고 이차전지를 적용하여도 선박 내 전력공급이 안정적으로 이루어져야 한다.

둘째, 선박전력상황에 따라 이차전지 충전 및 방전이 능동적으로 이루어져야 한다.

셋째, 선내 중부하 사용으로 인한 피크전력을 이차전지가 충분히 감당할 수 있어야 한다.

이차전지는 발전기에 비하여 빠른 출력응답을 가지므로 중부하 사용에 따른 발전기 과부하 및 정전현상을 방지할 수 있으므로 별도의 중부하 관리시스템이 필요하지 않게 되는 장점을 가지나, 이차전지 용량부족으로 인해 중부하 기동이 불가능한 경우를 대비하여 기존 전력관리시스템의 중부하 관리시스템의 적용 필요하다. 그러나 이러한 이차전지 연동형 전력시스템은 입항 및 출항 시 이차전지에서 많은 부분의 선내전력을 감당함으로써 중부하 사용 가능시간이 이차전지 용량에 따라 한정적인 단점이 있다. 따라서 입항 및 출항 시 많은 전력을 확보하기 위해 입항 및 출항 전 선내 이차전지를 충분히 충전하여야 한다. 또한 이차전지 사용에 따라 항해 중 발전기용량 축소에 따른 피크전력을 이차전지에서 대응 가능하도록 하여 이차전지의 지속적인 충전 및 방전을 통해 선내 에너지 효율 개선이 가능하도록 하여야 한다. 그림 3.8은 이차전지 연동형 선박 전력관리시스템의 흐름도를 나타내며 그림 3.9는 이차전지 연동형 선박의 중부하 관리 및 입출항에 따른 전력관리시스템의 흐름도를 나타낸다. 그림 3.10

와 그림 3.11은 선박 전력시스템을 도식화 한 것이다.

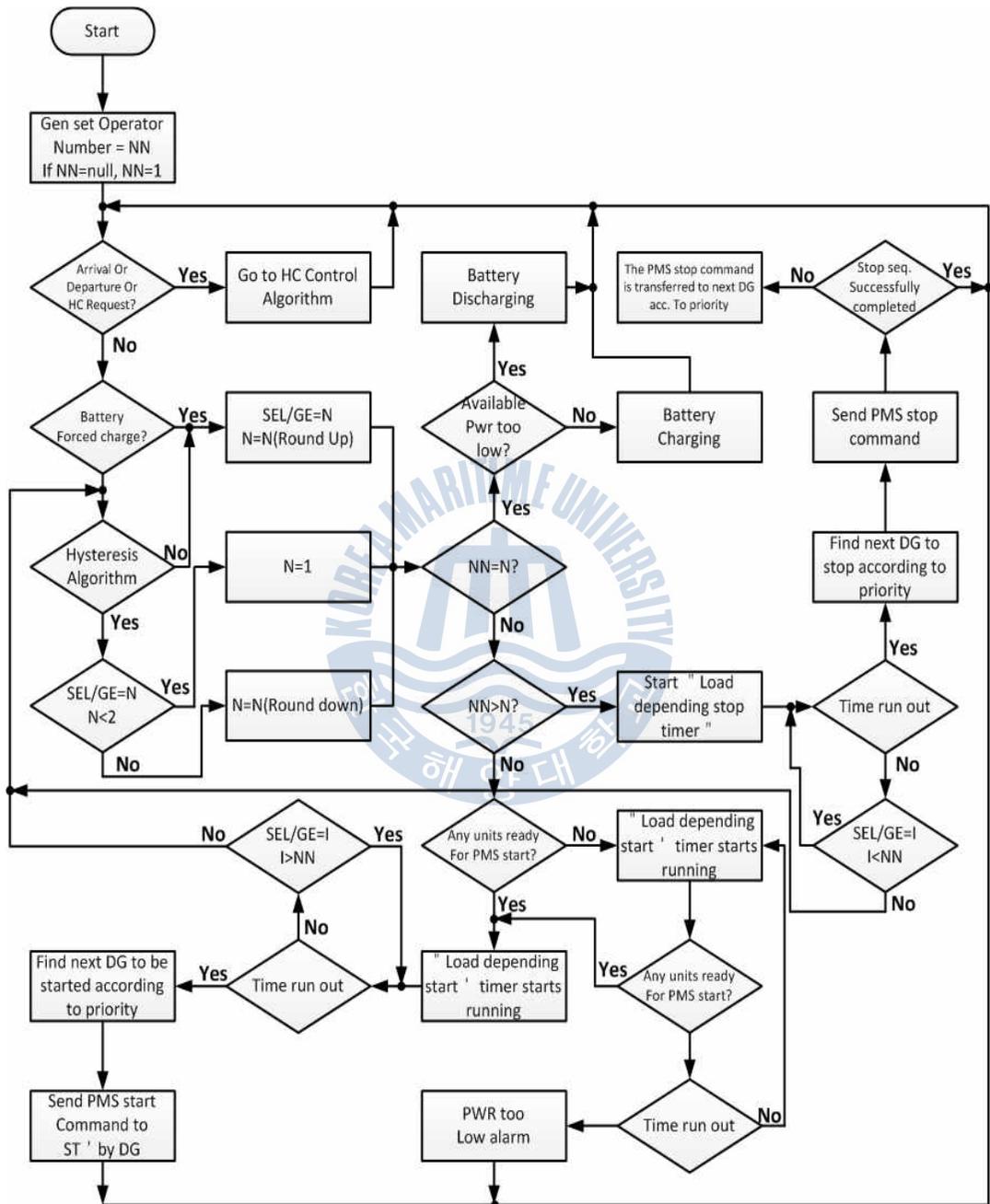


Fig 3.8 Battery-linked power management system flow chart

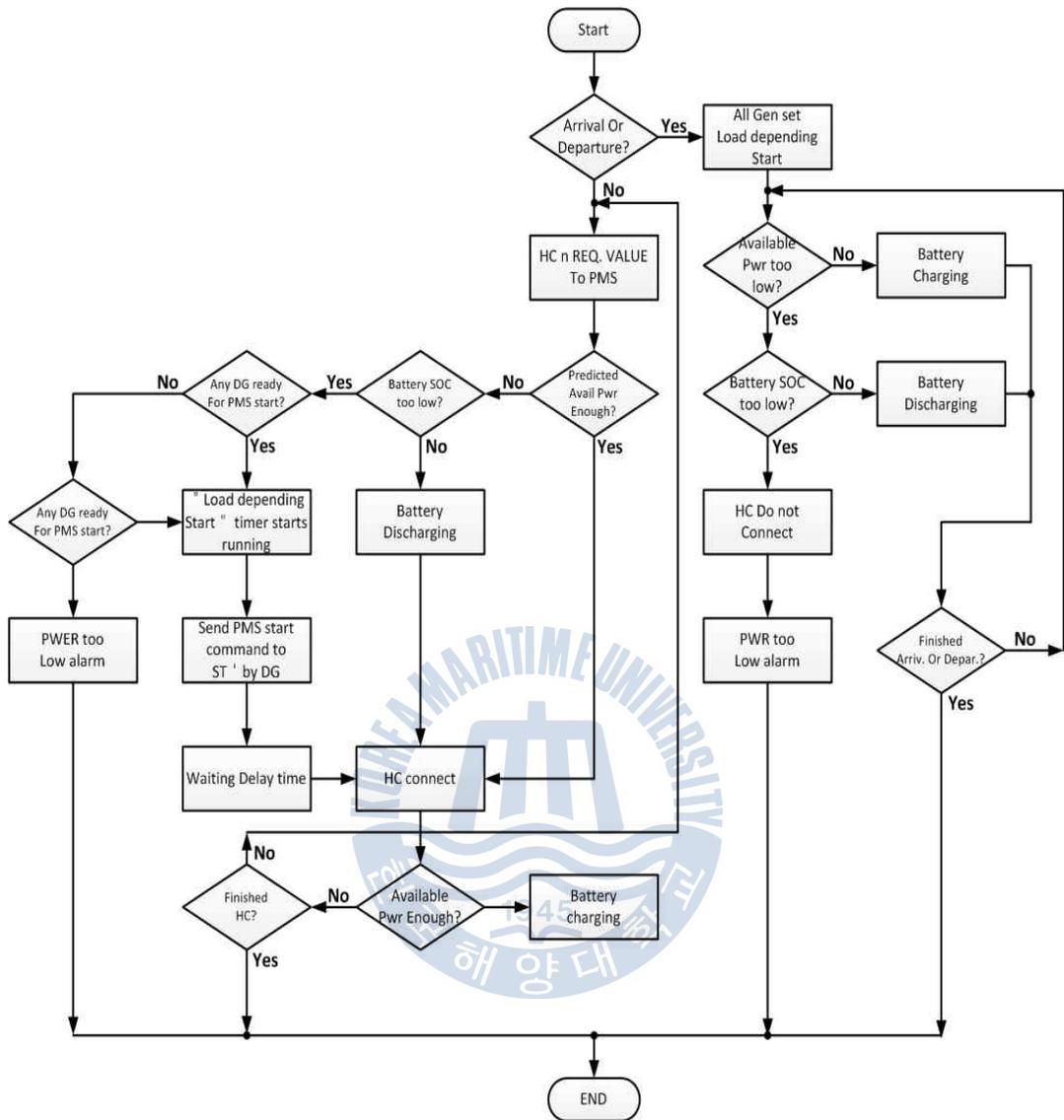


Fig 3.9 BLPMS Heavy consumption control flow chart

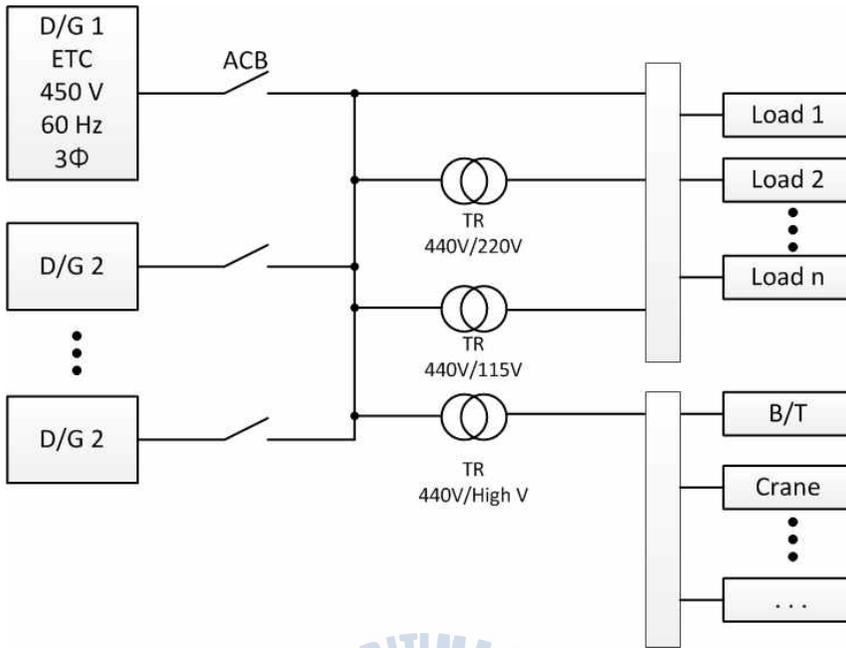


Fig 3.10 Typical power system

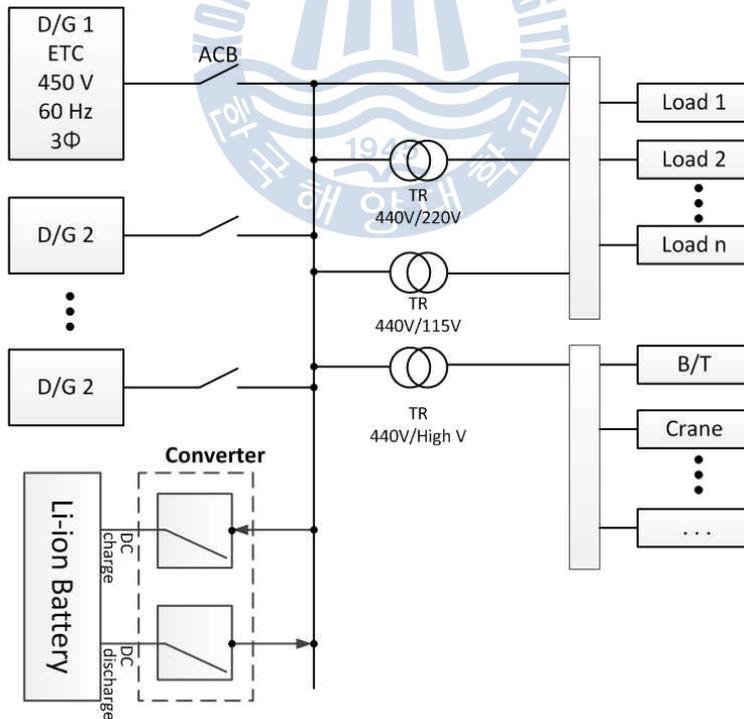


Fig 3.11 Proposed battery-linked power system

제 4 장 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 개요

시뮬레이션은 기존의 선박 전력관리시스템과 제안하는 이차전지 연동형 전력관리시스템의 에너지 효율을 비교, 분석하는데 목적이 있다. 이를 위하여 운항 중인 선박의 실시간 전력데이터를 바탕으로 기존의 선박 전력관리시스템과 제안하는 이차전지 연동형 전력관리시스템의 에너지 효율을 비교, 분석하여야 하나 운항 중인 선박의 실시간 전력데이터를 수집하는 것은 불가능함에 따라 선박별 한 달간 평균 전력데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 같은 선종의 선박이라도 운항모드, 운항경로 및 운전자의 특성에 따라 전력소비량 및 운항시간이 다소 차이를 보이므로 본 논문에서는 선박별로 데이터를 일반화하여 전력 모델링을 하였다. 시뮬레이션은 “NI(National Instruments)”사의 LabVIEW를 이용하여 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- 선박 데이터를 바탕으로 운항모드별 선박 전력소비량을 일반화 함
- 선박 데이터를 바탕으로 운항모드별 운항시간을 일반화 함
- 일반화 데이터를 바탕으로 시간, 운항모드별 선박 전력부하 모델링
- 발전기용량 개선정
- 이차전지 용량 선정
- 기존 전력관리시스템과 제안하는 전력관리시스템 알고리즘에 따른 선박 연료유 소비량 비교 및 분석

4.2 시뮬레이션

4.2.1 선박 전력부하

현재 운항 중인 선박은 가장 가혹한 환경에서 안정적으로 선내전력을 공급하기 위해 비교적 큰 용량의 발전기를 사용하고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 선종별 전력데이터를 바탕으로 전력부하 분석을 통해 발전기용량 및 이차전지 용량을 선정하고자 한다. 선박 부하 모델링을 위해 3장의 선박운항 특성을 이용하였다. 다음 표 4.1은 선박부하 모델링을 위한 선박 전력특성을 나타내며 표 4.2는 선박 운항별 소요시간, 표 4.3은 운항별 비율을 나타낸다.

Table 4.1 Ship power analysis

선 종	항 목	전 력(kW)
4,600TEU 컨테이너선박	항해 평균전력	1,074 kW
	항해 최대전력	1,265 kW
	‘0’ Pitch 평균전력	2,192 kW
	‘Full’ Pitch 평균전력	3,338 kW
	정박 평균전력	819 kW
	정박 최대전력	964 kW
8,600TEU 컨테이너선박	항해 평균전력	1,985 kW
	항해 최대전력	2,402 kW
	‘0’ Pitch 평균전력	3,452 kW
	‘Full’ Pitch 평균전력	5,625 kW
	정박 평균전력	1,250 kW
	정박 최대전력	1,720 kW
LNGC선박	항해 평균전력	2,208 kW
	항해 최대전력	2,427 kW
	‘0’ Pitch 평균전력	3,397 kW
	‘Full’ Pitch 평균전력	5,724 kW
	Loading	3,716 kW
	Unloading	7,368 kW

운항모드별 운항시간은 발전기용량선정에 있어 가장 많은 영향을 미친다. 표 3.8에 나타나있는 선종별 운항모드에 따른 소요시간에 여유시간을 더하여 표 4.2와 같이 소요시간을 선정하였다. 컨테이너선의 경우 크게 항해, 입항 및 출항 시 바우 스러스터 사용 유무에 따른 전력소비량, 정박 시 전력 소비량을 나타내었으며 LNGC선박의 경우 정박 시 내, 외부장비를 이용하여 LNG를 이송함에 따라 소비되는 전력량을 나타내었다.

Table 4.2 Ship operation characteristics

선 박	총 입항 및 출항 시간	B/T 사용시간	선적 시간	하역 시간
컨테이너선박	2시간	40분		
LNGC선박	2시간	40분	8시간	11시간
자동차운반선	1시간 30분	40분		

선박의 입항 및 출항시간, 바우 스러스터 사용시간은 항구의 상황 및 특징, 날씨 환경, 운전자 및 도선사의 기량에 따라 소비 및 사용되는 시간의 차이가 발생함에 따라 입항 및 출항 시간에 따른 바우 스러스터 사용시간을 고정하긴 어렵다. 이에 따라 본 논문에서는 선박 운항 데이터를 분석하고, 선박 운항자의 설문을 통해 표 4.2와 같이 운항별 소요시간을 나타내었다. 약 80% 이상의 경우 2시간 입항 및 출항 시간 중 30분 이내의 바우 스러스터 사용으로 가능하나 신뢰성을 높이기 위해 바우 스러스터 사용시간을 40분으로 지정하였다.

Table 4.3 Ship Operating Rate

선 박	항해	정박	입출항
4,600TEU	80%	13%	7%
8,600TEU	70%	24%	6%
LNGC	81%	6%	13%

그림 4.1은 위 선박 전력데이터를 바탕으로 작성한 시뮬레이션의 블록다이어그램을 나타내며 크게 네 부분으로 나누어진다.

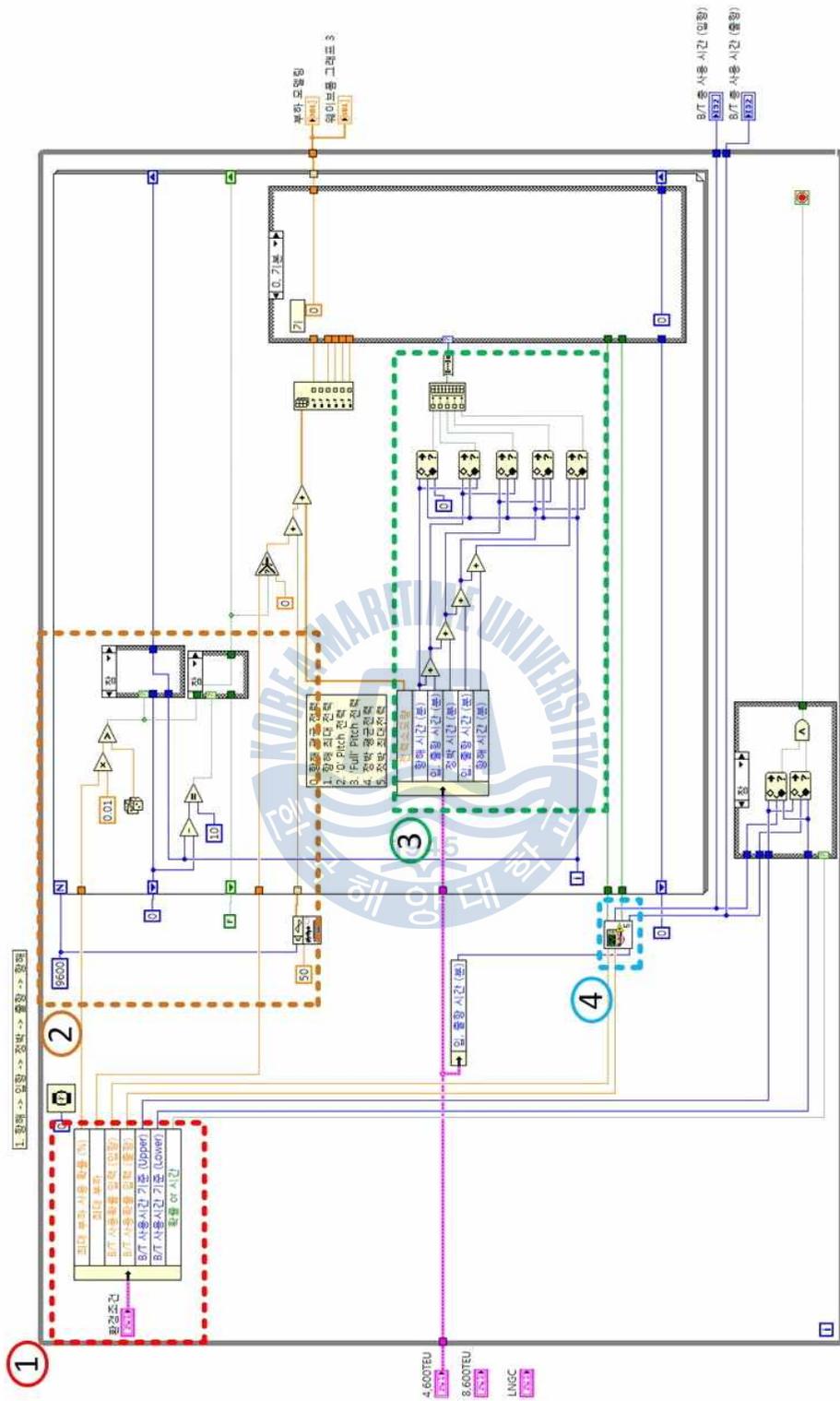


Fig 4.1 Ship load simulation block diagram

① 선박 전력값 및 환경조건

선박 전력부하는 운항 별 평균전력소비량 및 최대 전력량, 각 운항 별 운항 시간을 적용하여 가상의 선박부하를 생성한다. 운항모드 중 입항 및 출항에 따른 바우 스러스터 사용시간을 적용하기 위해 임의의 확률과 사용시간을 기준으로 바우스러스터 환경조건을 적용하였다. 그림 4.2는 선박부하 시뮬레이션의 프론트패널(front panel)을 나타낸다.

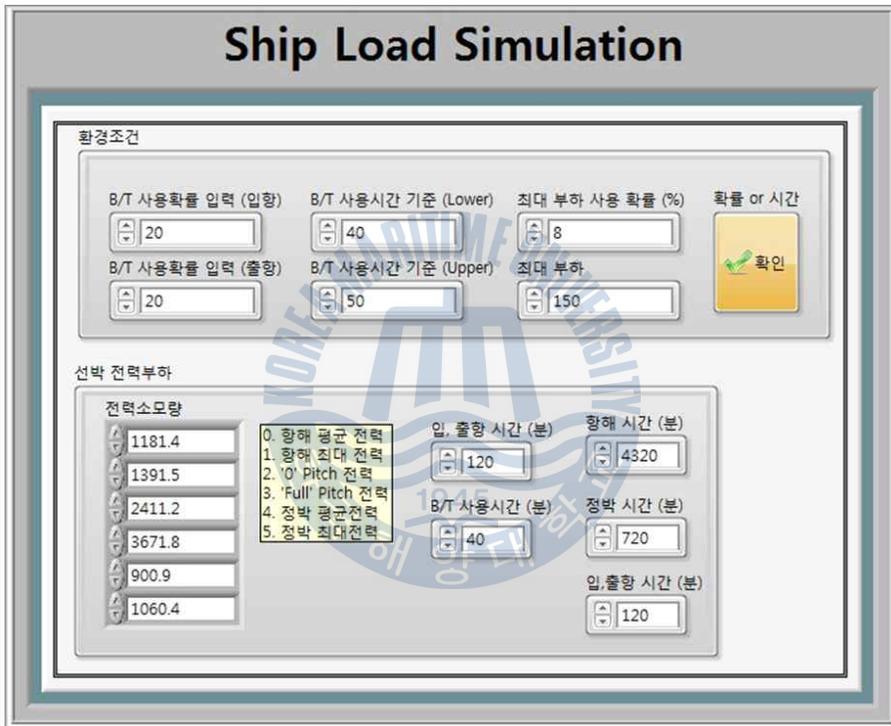


Fig 4.2 Sip load simulation front panel

환경조건에서 바우 스러스터 사용을 확률 또는 사용시간을 기준으로 적용할 수 있으며 임의로 선박부하를 짧은 시간 높임으로 실 선박 부하와 비슷한 환경을 적용하였다.

② 불규칙적 부하

선박의 운항 특성상 주 냉각 해수 펌프, 주 윤활유 펌프와 같이 항시 가동되어야 하는 장비와 공기 압축기, 보조 송풍기와 같이 상황에 따라 간헐적으로 돌아가는 장비가 있다. 이를 반영하기 위해 사용자 지정에 따른 전력과 선박 최대 전력량을 반영하여 임의로 선내부하에 적용하였다.

③ 선박 운항모드

선박운항은 크게 항해, 입항 및 출항, 정박으로 나눌 수 있다. 선박마다 운항모드별 운행 시간은 차이가 있으나, 대부분의 운항시간을 항해에 보내게 된다. 선박 운항모드에서는 선박 전력부하의 사용자 지정에 따른 선박 운항모드별 시간을 선박 부하에 적용한다.

④ 바우 스러스터 사용

선박의 발전기 및 이차전지 용량 선정에 있어 선박의 입항 및 출항에 따른 전력소비량은 매우 중요하다. 특히 입항 및 출항에 사용되는 바우 스러스터 시간에 따라 필요 이차전지 용량은 큰 차이를 보이게 된다. 따라서 선박 전력부하 시뮬레이션에 별도의 Sub VI를 생성하여 바우 스러스터 사용시간을 생성, 반영하도록 하였다. 그림 4.3은 바우 스러스터 시간설정 Sub VI를 나타낸다.

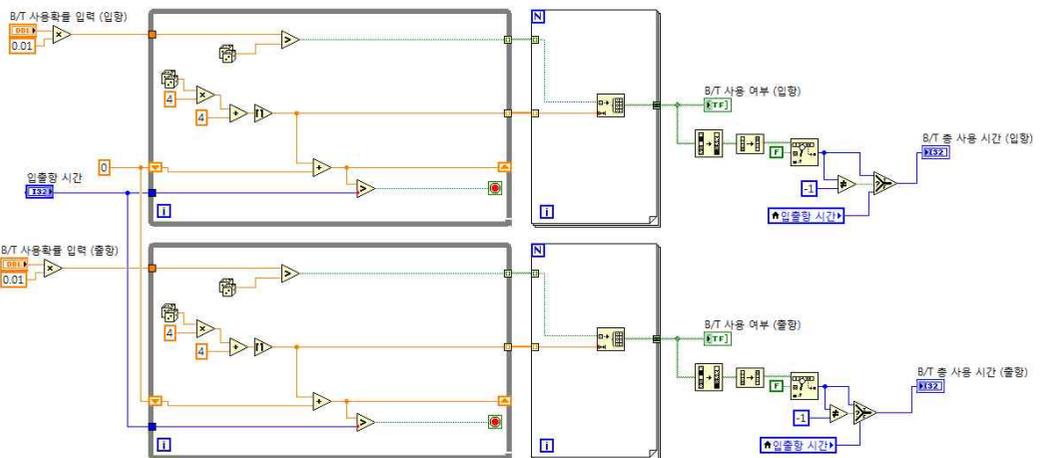


Fig 4.3 Bow thruster use timer

바우 스러스터 사용시간 설정은 사용 확률에 따른 임의의 사용시간 설정과 바우 스러스터 사용시간 범위를 사용자가 지정할 수 있도록 구성하여 프로그램의 유연성을 높이고자 하였다. 그림 4.4는 선박 전력부하 시뮬레이션을 통한 4,600TEU 컨테이너 선박의 부하를 나타낸다.

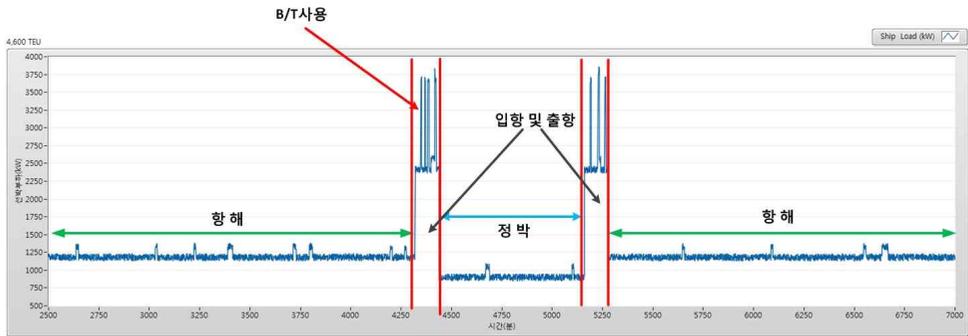


Fig 4.4 4,600TEU container ship load simulation

4.2.2 발전기

발전기용량 선정의 방법은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫째, 정상시 부하 용량으로부터의 발전기 출력용량 계산, 둘째, 과도시 최대 전압강하로부터 발전기 출력용량 계산, 셋째, 과도시 단시간 과부하 내량(overload capacity)으로부터의 발전기 출력용량 계산방법이 있다. 정상시 부하용량으로부터의 발전기 출력용량 계산은 정격 운전 상태에서의 부하 설비에 급전하는데 필요한 발전기용량으로 식 (4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PG1 = P'_L \times \alpha + \frac{P_L}{\eta_L \times PF_L} \times a [kVA] \quad (4.1)$$

식 (4.2)는 과도시 최대 전압강하로부터 발전기 출력용량을 계산하는 식을 나타낸다. 즉, 부하 중에서 가장 큰 시동출력[kVA]을 갖는 전동기를 사용함에 따른 허용 전압강하를 고려한 경우의 발전기용량계산 방법을 뜻한다.

$$PG2 = P_m \times \beta \times C \times X_d \times \frac{1 - \Delta V}{\Delta V} = P_m \times K_1 [kVA] \quad (4.2)$$

정상시 부하용량으로부터의 발전기 출력용량 계산은 부하 중에서 시동출력 [KW] 값이 최대로 되는 전동기 또는 이러한 전동기 군을 최후에 시동할 때의 발전기용량 계산방법을 뜻하며 식 (4.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P'_L \times \alpha + \frac{P''_L - P_m}{\eta_L} + P_m \times \beta \times C \times PF_S \times \frac{1}{\cos\theta} [KVA] \quad (4.3)$$

발전기용량선정 계산방법을 통한 발전기용량 중 가장 큰 값을 취한 후 여유 부하를 합하여 발전기용량을 선정하게 된다. 그러나 이러한 발전기용량 선정법은 전력시스템에 포함된 모든 전력소비 장치에 대한 정보가 있어야 하며, 일정한 전력을 필요로 하는 시스템에는 적합하다. 그러나 선박의 경우 운항모드가 매우 다양하며, 상황에 따른 발전기 운전대수 및 장비사용이 달라짐으로 위와 같은 방법으로 발전기용량 선정에는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 선박 항해주기 중 가장 많은 시간을 보내는 항해 때의 전력부하를 바탕으로 발전기용량을 선정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 중부하 및 선내부하증가로 인한 부족 전력은 이차전지에서 충분히 전력공급이 가능하다는 가정 및 이차전지의 반응속도는 발전기에 비하여 매우 빠르며, 부하 증가에 따른 발전기 정지가능이 없다는 가정 하에 발전기 운전 여유 부하율을 더하여 발전기용량을 선정하였다. 발전기용량 선정이후 이차전지 연동형 전력관리시스템과 기존 전력관리시스템의 운영 알고리즘에 따라 발전기 안전운전을 및 발전기 운전대수를 고려하여 발전기 단독운전 및 병렬운전이 자동으로 이루어지게 하였다. 또한 이차전지 연동형 전력관리시스템의 경우 입항 및 출항과 같은 극한 상황의 운전상태를 제외하고 이차전지 보호를 위하여 충전 및 방전에 히스테리시스 제어를 적용하였다. 그림 4.5는 이차전지의 현재 용량에 따른 히스테리시스 제어 블록 다이어그램을 나타내며, 그림 4.6은 발전기 설정 프론트 패널을 나타낸다.

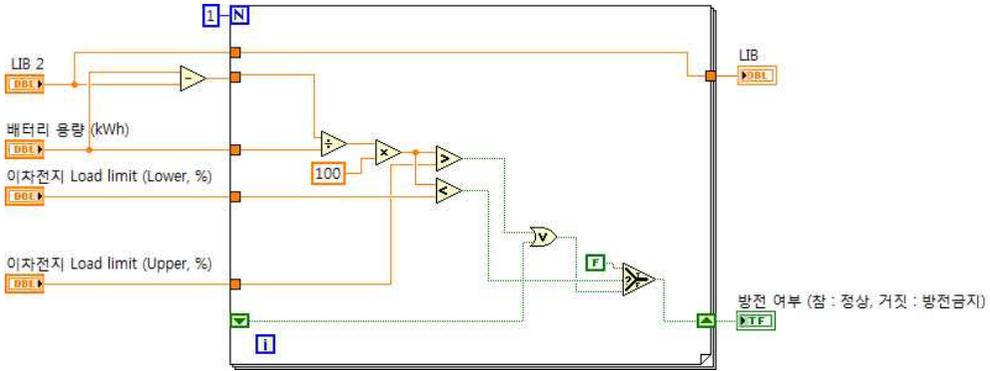


Fig 4.5 Charging-discharging hysteresis of the LIB

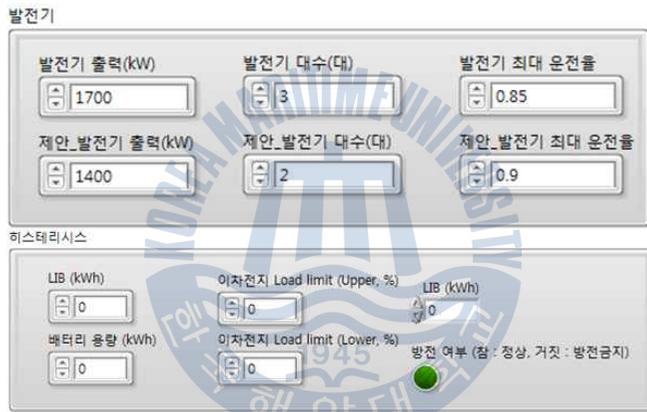


Fig 4.6 Setting of the generator front panel

4.2.3 이차전지

선내부하 또는 중부하 사용에 따라 발전기에서 감당하지 못하는 선내부하를 이차전지에서 충분히 감당할 수 있도록 이차전지를 선정하여야 한다. 이차전지 모델링의 방법은 내부저항 모델(Rint), 저항 커패시턴스 모델, PbA fund 모델 등이 있다[28-32]. 이러한 모델링을 통한 SOC(States Of Charging)를 추정하고, 실제 이차전지를 사용하는 환경에서 유사한 특성을 가지도록 설계를 하여야 하나 대용량의 이차전지 모델링은 단일 전지에 대한 모델링에 비하여 복잡하며 실제 이차전지와 특성의 차이가 발생함으로 적용에 어려움이 있다. 특히, 이차

전지의 직, 병렬 개수에 따른 이차전지 내 분극화 저항손실, 내부저항 손실 계수를 알 수 없으며, SOC에 따른 전압-전류 변화 값을 예측하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이차전지의 출력특성은 SOC에 영향을 받지 않는다는 가정 하에 이차전지의 에너지 저장량, 이차전지 출력, 충전 및 방전 비율을 적용하여 이차전지를 모델링 하였다. 적용 이차전지는 삼성 SDI사의 ICR18650-30 Lithium-Ion 전지 특성을 적용하였다. 표 4.4는 ICR18650-30의 특성을 나타낸다.

Table 4.4 ICR18650-30A nominal specifications

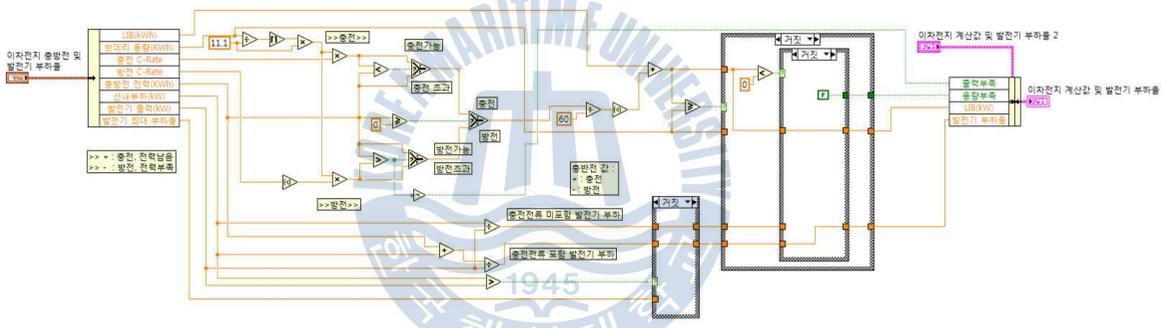
Item	Specification
Nominal Capacity	3,000mAh
Minimum Capacity	2,900mAh
Nominal Voltage	3.7V
Charging Current	Standard Charge : 1,500mA Rapid Charge : 3,000mA
Max. Charging Current	3,000mA
Max. Discharging Current	6,000mA

이차전지 모델링은 발전기의 출력과는 달리 용량에 한계가 있으며, 충전 및 방전 특성은 이차전지 용량, 충전 및 방전의 C-rate(Current-Rate)에 따라 변화하게 된다. 충전 및 방전 C-rate는 전지의 충전 및 방전 시 다양한 조건에서의 전류값 설정 및 전지의 가능 시간을 예측하거나 표기하기 위한 단위이다. 충전 또는 방전 전류를 전지 정격 용량으로 나누어 산출한다. 식 (4.5)는 전지의 출력, 용량, 에너지의 관계를 나타낸다.

$$C-Rate(A) = \frac{\text{충} \cdot \text{방전전류}(A)}{\text{전지의 정격용량}(Ah)} \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{출력}(W) &= V \times A = J/s \\ \text{용량}(Ah) &= A \times h \\ \text{에너지}(Wh) &= W \times h = A \times V \times h = Ah \times V \end{aligned} \quad (4.5)$$

따라서 에너지는 전지의 출력과 시간의 곱에 비례하며, 용량과 전압에 비례함을 알 수 있다. 위 식에 따라 ICR18650 전지 하나의 에너지량은 11.1Wh이며, 최대 출력이 22.2W로 최대 방전 C-rate가 2로 확인할 수 있다. 이차전지의 출력은 전지의 직, 병렬에 따른 전지 전압과 방전 C-rate에 따른 방전 전류의 곱으로 나타낼 수 있다. 선박 내 이차전지 적용을 위해 이차전지는 선내부하 중 가장 큰 전력을 필요로 하는 바우 스터스터의 출력전력을 감당할 수 있으며, 입항 및 출항 시 바우 스터스터 사용에 따른 충분한 에너지를 가져야 한다. 이차전지 모델링은 ICR18650-30A의 충전과 방전 C-rate를 적용하여 이차전지 충전 및 방전, 최대 가능 충전치, 이차전지 충전에 따른 발전기 부하율, 이차전지 출력부족 및 이차전지 용량부족을 계산하여 나타낸다. 그림 4.7은 이차전지 모델링 프로그램의 블록다이어그램 및 프런트패널을 나타낸다.



(a) LIB Modeling Block Diagram



(b) LIB Modeling Front Panel

Fig 4.7 Lithium-iron battery modeling

4.2.4 연료소비율

발전기의 연료소비 효율은 발전기 부하율에 따라 많은 차이가 난다. 발전기 저부하 운전구간에서 연료소비 효율은 매우 좋지 않으며 부하율이 높을수록 연료효율은 좋아지게 된다. 연료소비율(SFC, Specific Fuel Consumption) 곡선은 식 (4.6)과 같이 나타낼 수 있으며 발전기 부하율에 따른 연료소비율 곡선은 그림 4.8과 같다[27].

$$G_{SFC} = \frac{r}{\gamma w} \quad (4.6)$$

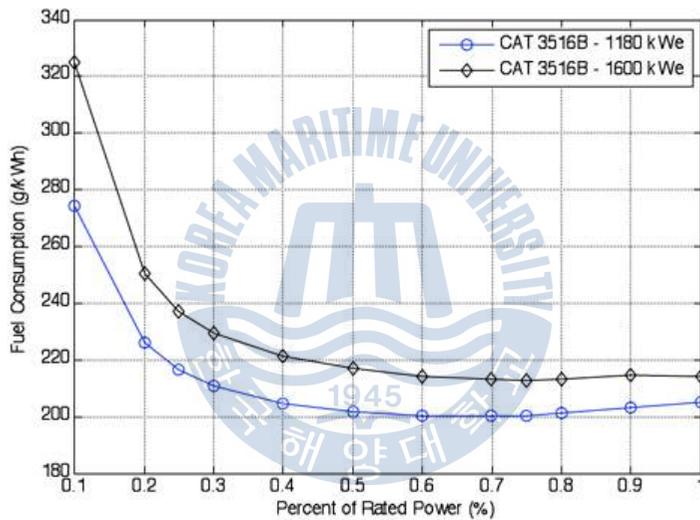


Fig 4.8 Diesel generator SFC curve

그림 4.8과 같이 발전기 정격출력 차이에 따른 연료소비율 곡선이 다소 차이가 있으나 부하율에 따른 연료소비량은 비슷하다. 발전기 출력에 따른 정확한 연료소비율 곡선을 적용하여 이차전지 적용선박과 비적용 선박의 연료소비량을 비교하여야 하지만, 발전기 출력에 따른 연료소비율 곡선을 알 수 없음에 따라 그림 4.8의 연료소비율 곡선을 “MathWorks” 사 Matlab의 “fitting” 기능을 이용하여 모델링하였다. 부하율에 따른 연료소비율은 식 (4.7)과 같이 나타낼 수 있으며, 그림 4.9는 발전기 부하율에 따른 연료소비율 곡선을 나타낸다.

$$G_{SFC} = (P_1 \times X^5) + (P_2 \times X^4) + (P_3 \times X^3) + (P_4 \times X^2) + (P_5 \times X^1) + P_6 \quad (4.7)$$

$$P_1 = -9.1954e-08 \quad P_2 = 3.3285e-05$$

$$P_3 = -0.0045741 \quad P_4 = 0.32628$$

$$P_5 = -12.24 \quad P_6 = 408.25$$

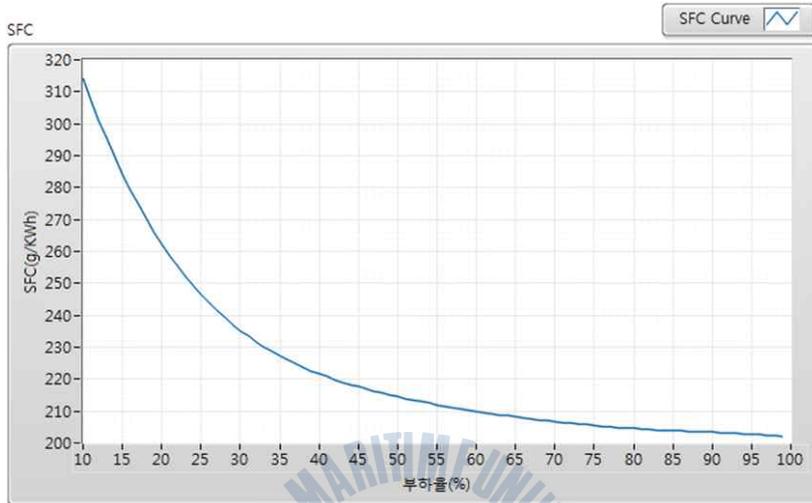


Fig 4.9 Diesel generator SFC curve simulation

4.3 시뮬레이션 프로그램 구성

시뮬레이션은 크게 선박 전력부하부, 발전기 설정부, 선박 운전모드 설정부, 이차전지 충전 및 방전부, 데이터 저장부로 이루어져 있다. 프로그램의 입력변수는 선박 운항모드별 시간에 따른 전력소비량, 배우 스러스터 사용시간, 이차전지 충전 및 방전 C-rate, 적용 이차전지 용량, 기존 선박 발전기 출력 및 대수, 제안 된 발전기 출력 및 대수 등이 있다. 시뮬레이션을 통하여 선박 부하변동에 따른 기존 전력관리시스템과 이차전지를 적용한 전력관리시스템의 발전기 부하율, 발전기 운전대수, 이차전지 충전 및 방전 상태, 이차전지 용량 및 출력 부족, 연료소비율 등을 확인할 수 있다. 데이터 저장은 시뮬레이션 결과를 저장하기 위해 날짜에 따라 폴더 및 파일을 생성한다. 또한 타 프로그램과 연동성을 고려하여 .txt 포맷으로 저장하도록 하였다. 그림 4.10은 데이터 저장 프로그램의 블록 선도그림이며, 그림 4.11은 전체 시뮬레이션 프로그램의 블록 선도그

램, 그림 4.12와 4.13은 시뮬레이션 프론트 패널이다.

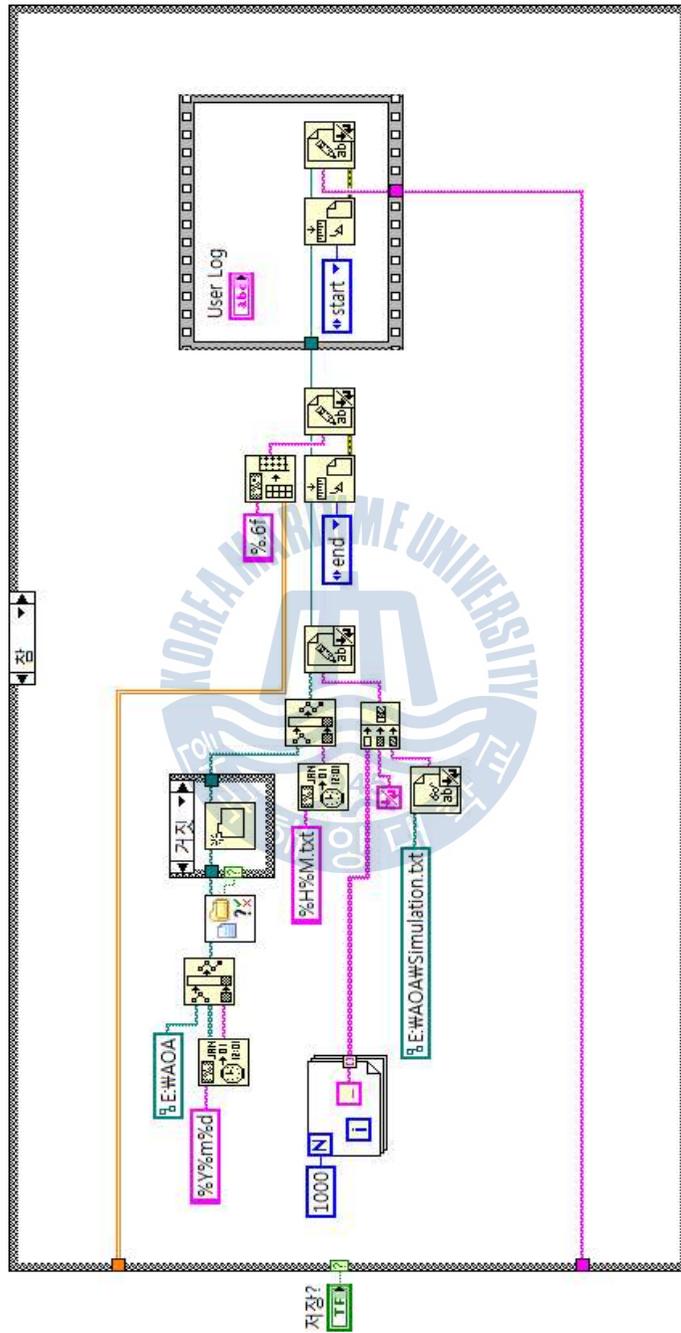


Fig 4.10 Simulation data saving program

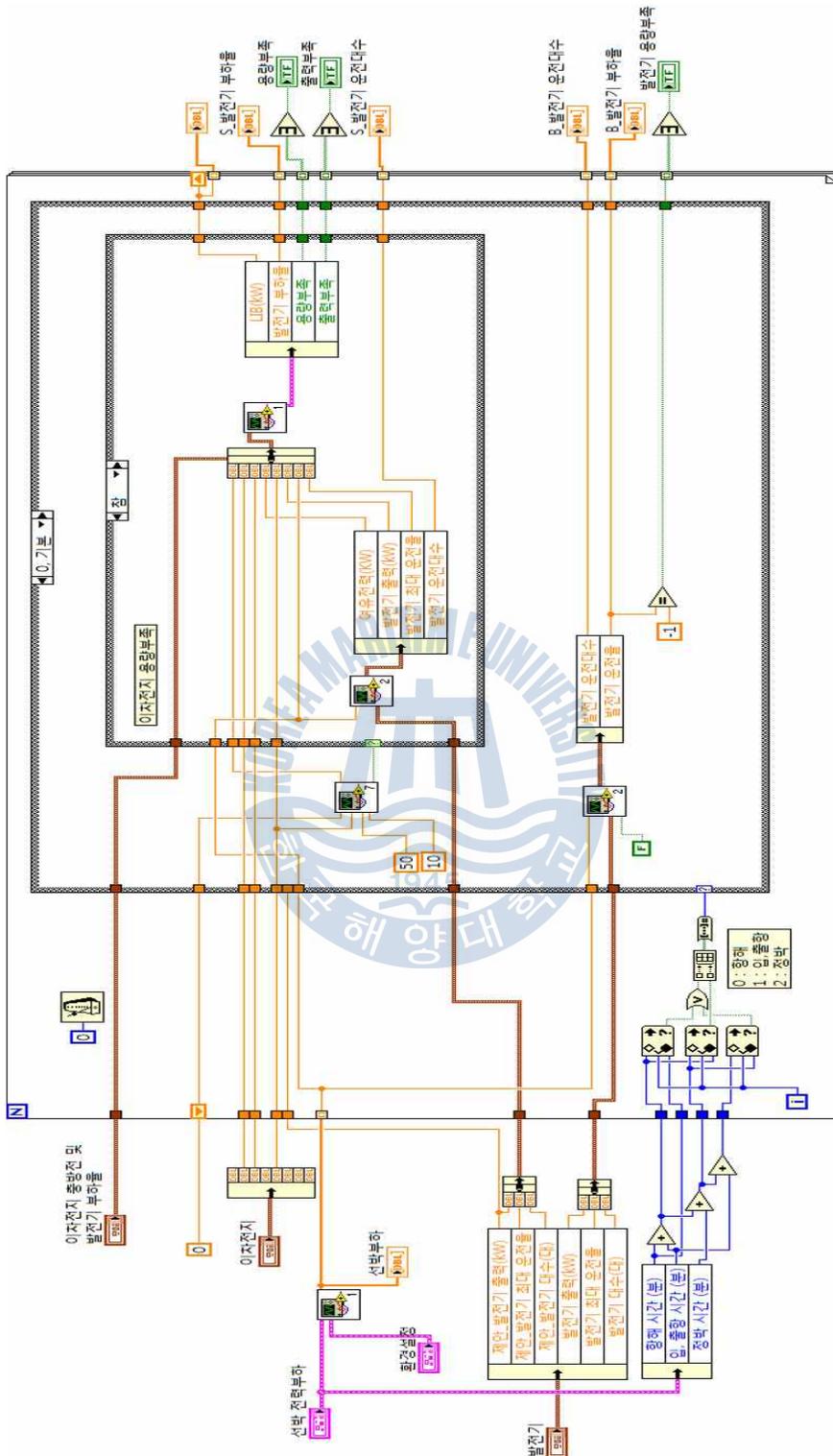


Fig 4.11 Ship energy efficiency improvement simulation block diagram

Ship Energy Efficiency Improvement Simulation

전력부하

서버, 전력부하

전력소모량
1181.4
1391.5
2411.2
3671.8
900.9
1060.4

이차전지

충전 C-Rate: 1

방전 C-Rate: 2

배터리 용량(KWh): 2000

이차전지 특성

응량부족: ●

용량부족: ●

이차전지 에러

운영시간

환경조건

중부하 사용 설정

B/T 사용률 입력 (입항): 20

B/T 사용률 입력 (출항): 20

B/T 사용시간 기준 (Lower): 40

B/T 사용시간 기준 (Upper): 50

최대 부하 사용률 (%): 8

최대 부하: 150

확률 or 시간: ● 확인

발전기

발전기 출력(kW): 1700

발전기 대수(대): 3

제한_발전기 출력(kW): 1400

제한_발전기 대수(대): 2

발전기 최대 운전률: 0.85

제한_발전기 최대 운전율: 0.9

발전기 동량부족: ●

발전기 에러

Fig 4.12 Ship energy efficiency improvement simulation front panel(1)

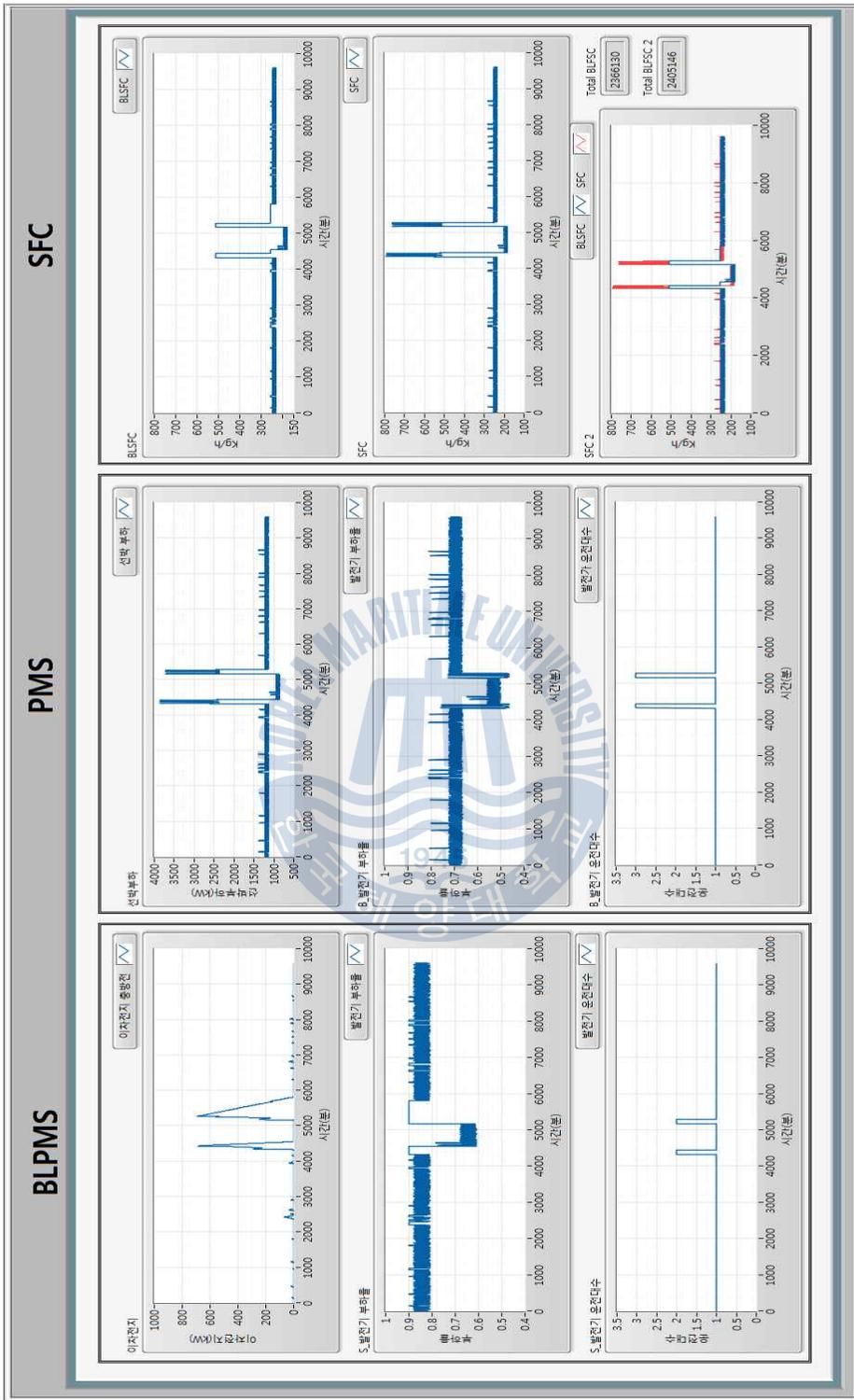


Fig 4.13 Ship energy efficiency improvement simulation front panel(2)

제 5 장 시뮬레이션 결과 분석

5.1 Payback

선종에 따른 이차전지 적용 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 3장 선박 전력시스템에서 정의한 운항모드별 운항 비율, 선종별 제원특성, 운항모드별 전력소비량, 운항모드별 중부하 사용시간을 바탕으로 4.2절과 4.3절과 같이 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. 시뮬레이션을 바탕으로 발전기용량을 줄임으로 발생하는 전력부족현상을 이차전지를 사용하여 안정적으로 선박 운항이 가능한지 확인하였다. 이차전지 시스템을 선박에 적용함으로써 발생하는 투자비와 이로 인한 기존 선박 시스템의 기자재 대체 효과 및 연료 절감 효과 등을 고려하여 경제적으로 이득을 회수할 수 있는 시간, 즉 payback을 확인할 수 있다. 이차전지 시스템 적용에 따른 투자비 회수기간 payback은 다음 식 (5.1)과 같이 정의할 수 있다.

$$Payback = \frac{\text{이차전지시스템 투자비} - \text{기자재 대체효과}}{\text{연간 연료절감비}} \quad (5.1)$$

정확한 payback을 계산하기 위해 다음과 같은 값들이 필요로 한다.

- 이차전지 시스템 설치 투자비
- 발전기 대체 및 축소로 인한 기자재 대체효과
- 이차전지 시스템 적용에 의한 연료절감비

그러나 이차전지 시스템 적용에 따른 기자재 대체비용을 알 수 없으며, 발전기 가격 또한 대외비로 파악할 수 없을 뿐만 아니라 이차전지 시스템 적용에

따른 전력변환장치의 가격 등을 알 수 없으므로 본 논문에서는 이차전지 단가 (\$/kW), 연료가격(\$/MT)을 적용하여 payback기간을 식 (5.2)과 같이 정의하였다.

$$Payback = \frac{\text{이차전지시스템전력량} \times \text{이차전지 단가}}{(\text{기존 선박시스템 } SFC - \text{이차전지 적용선박 } SFC) \times \text{유가}} \quad (5.2)$$

이차전지 단가는 “Deutsche Bank” 에서 2011년 1월에 제시한 기사 “Deutsche bank revises li-ion battery cost forecasts downward to \$250/kWh by 2020” 에서 제시한 2013년 LIB가격 \$400/kWh를 적용하였다. 그림 5.1은 “Deutsche Bank” 에서 제시한 이차전지 예상 가격을 나타낸다[32].



Fig 5.1 Li-ion battery cost forecasts

“Deutsche Bank” 에 따르면 2020년 리튬-이온 배터리의 가격 kWh당 \$250 정도로 하락할 것이라고 전망했다. 이는 2009년 2011월에 발표하였던 kWh당 \$350보다 크게 감소한 것으로 연 7.5%정도 하락할 것으로 추정한다.

유가는 대표적인 선박 연료유 MG-380의 최근 1달간 연료유 가격에 따른 평

균값 \$616.1/MT를 적용하였다. 그림 5.2는 항구별 MG-380의 2013년 9월 23일부터 약 1달간 항구별 가격을 나타낸다.

MG-380 기준										\$/MT
NLRM	ESALG	AEKLF	SGSIN	CNHKG	CNSHA	KRPUS	USLGB	USSEA	USNYC	
593.8	615.5	605.5	604.5	619.0	627.5	633.0	656.3	610.5	624.1	
590.8	609.5	606.5	603.5	619.0	627.5	636.0	669.3	604.5	615.6	
588.0	609.5	604.5	602.0	617.0	635.5	634.0	671.3	599.5	612.6	
589.8	608.5	600.0	598.5	612.0	625.5	-	673.8	609.5	622.6	
593.3	611.5	609.5	610.0	629.5	-	-	650.3	596.5	623.1	
587.3	612.5	608.5	612.0	-	-	-	623.8	596.0	625.1	
583.8	603.5	608.0	609.5	627.0	636.5	640.0	610.3	594.0	618.1	
585.8	602.5	605.0	608.5	624.5	641.0	637.5	598.5	594.5	618.6	
592.0	607.5	612.0	613.0	628.5	641.5	638.0	610.8	594.0	616.6	
591.5	614.5	608.0	611.5	623.5	637.5	638.5	631.3	596.0	620.7	
596.3	613.5	609.0	617.3	628.5	640.5	645.5	642.3	595.0	618.6	
590.0	612.5	606.0	616.5	626.0	644.0	643.0	652.3	594.5	618.1	
584.3	608.5	608.0	616.0	-	-	641.5	652.3	592.0	615.6	
595.8	608.5	604.5	617.5	624.0	-	640.5	667.3	597.0	622.6	
593.5	606.5	619.0	629.5	628.5	-	-	678.3	597.5	621.1	
584.3	604.5	619.0	621.0	624.5	-	642.5	686.3	600.0	618.6	
583.3	597.5	610.5	615.0	619.0	-	633.5	653.3	602.0	617.6	
582.5	597.5	605.5	608.0	616.0	631.5	632.0	627.3	604.0	617.1	
577.0	597.5	611.0	615.3	624.5	637.5	-	610.3	601.0	611.6	
589.0	598.5	611.0	617.0	626.0	634.5	641.5	623.8	612.0	622.6	
585.5	602.5	617.5	625.0	633.5	641.5	649.0	621.8	603.0	620.6	
582.3	599.5	609.5	621.5	-	640.5	644.5	625.8	601.0	618.6	
584.0	600.5	-	-	-	647.0	642.5	624.8	599.0	612.6	
588.0	600.5	610.0	618.0	627.5	639.5	640.5	632.8	605.0	620.6	
582.3	599.5	613.5	623.5	624.5	639.5	645.5	628.8	597.0	612.6	
583.0	598.5	612.5	621.5	624.0	642.5	636.5	629.8	598.0	614.6	
583.5	600.5	617.5	624.5	627.0	643.0	637.0	628.8	594.0	618.6	
582.0	600.5	617.5	622.0	621.5	647.0	634.5	630.8	598.0	619.6	
581.3	598.5	618.5	617.8	615.5	638.0	630.5	627.8	601.0	615.6	
578.3	597.5	619.5	617.0	617.5	634.5	630.0	629.8	600.0	613.6	
572.8	589.5	619.5	612.0	607.5	628.5	627.0	628.8	594.0	610.6	
580.3	595.5	619.5	616.5	612.5	630.5	630.0	636.8	602.0	618.6	
579.8	594.5	624.5	620.5	618.5	634.5	635.0	659.3	599.0	614.6	

Fig 5.2 MG-380 diesel oil price

지속적인 이차전지 가격의 하락과 유가 상승으로 인해 선박 내 이차전지 시스템 적용가능 시점은 앞당겨지고 있으며 이러한 추세가 계속된다면 payback 기간을 수년으로 단축 가능할 것으로 예상된다.

5.2 4,600TEU 컨테이너선

5.2.1 환경조건

4,600TEU 컨테이너선의 환경조건은 그림 5.3과 같이 설정하였다. 운항모드별 전력소비량은 3장에서 분석한 데이터를 바탕으로 10%의 여유전력을 더하여 적용하였다. 바우 스러스터 사용시간을 40~50분 사이 임의의 시간 내에서 사용하도록 하였으며, 항해 중 8% 확률로 최대 부하를 사용하도록 하였다 발전기 운전 대수는 기존 선박 4대를 3대로 줄였으며 제안하는 선박의 발전기 대수는 2대로 한정하여 시뮬레이션을 진행하였다..

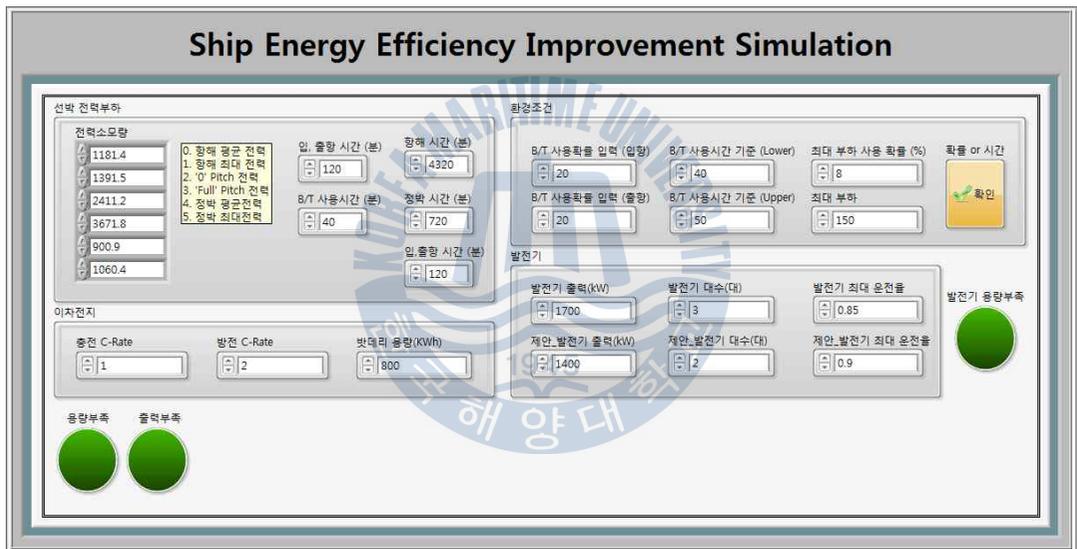


Fig 5.3 4,600TEU containership environmental condition

5.2.2 데이터 분석

기존 선박에 설치되어 있는 발전기용량 및 발전기 대수를 적용할 때의 연료 소비량과 이차전지를 적용함에 따른 필요 발전기용량, 대수 및 이차전지 용량을 선정하여 기존 선박의 연료소비량과 비교하여 식 (5.3)과 같이 Payback을 도출 하였다.

$$Payback = \frac{\text{이차전지용량}[kWh] \times \$400}{(T_{SFC}[MT] - T_{BLSFC}[MT]) \times \$616.1} \quad (5.3)$$

시뮬레이션의 총 항해기간은 9,600분으로 하였으나 1년간의 연료소비율 계산을 위해 1년 항해시의 연료소비율을 나타내었다. 그림 5.4는 항해 시간별 운영 모드에 따른 연료소비량의 예를 나타내며, 표 5.1은 발전기용량과 이차전지 용량에 따른 분석표를 나타낸다.

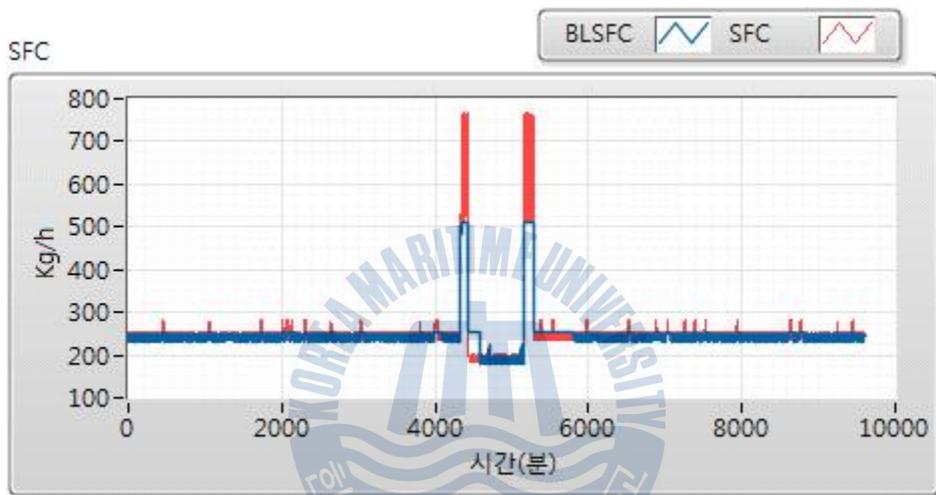


Fig 5.4 4,600TEU SFC example of comparison chart

Table 5.1 4,600TEU containership simulation results

발전기용량	이차전지 용량	$T_{SFC} - T_{BLSFC}$	에너지효율	Payback
1,700 kW	-	0 MT	1	-
1,350 kW	1,000 kWh	41.765 MT	1.019	15.55
1,400 kW	850 kWh	36.251 MT	1.016	15.22
1,450 kW	700 kWh	34.112 MT	1.015	13.32
1,500 kW	600 kWh	28.973 MT	1.013	13.44

이차전지 적용 선박은 발전기용량에 따라 필요한 이차전지 용량이 결정되며, 발전기용량이 작을수록 이차전지 용량은 커지며 반대로 발전기용량이 커질수록

이차전지 필요 용량이 작아짐을 확인할 수 있다. 에너지 효율은 발전기용량이 작을수록 우수하지만, 발전기용량이 작아지면 이차전지 필요 용량이 급격하게 커짐에 따라 payback기간의 차이가 발생한다. 또한 발전기용량이 줄어들게 되면 위급한 상황에 전력부족으로 인한 대처능력이 저하하게 된다. payback기간은 약 14년 정도로 높게 선정되었으나 이차전지 적용으로 인한 기자재 대처효과 적용 및 추후 이차전지의 단가 하락과 연료유 가격상승 추세가 계속된다면 보다 짧은 기간에 payback이 가능할 것으로 판단된다.

5.3 8,600TEU 컨테이너선

5.3.1 환경조건

8,600TEU 컨테이너선의 환경조건은 선박 톤수 증가에 따른 장비 사용으로 인한 전력소비량을 제외하면 4,600TEU 컨테이너선과 거의 동일하다. 정박 시 하역 및 선적으로 인한 대기시간이 4,600TEU 컨테이너선에 비해 다소 증가하나 전체 운항 비율은 비슷하므로 4,600TEU 컨테이너선과 전력소비량과 발전기 및 이차전지 용량을 제외한 나머지 환경조건은 동일하도록 설정하여 시물레이션을 진행하였다. 전력소비량은 4,600TEU 컨테이너선과 동일하게 3장의 선박전력시스템에서 분석한 전력량에 10%의 여유전력을 계산하여 적용하였다.

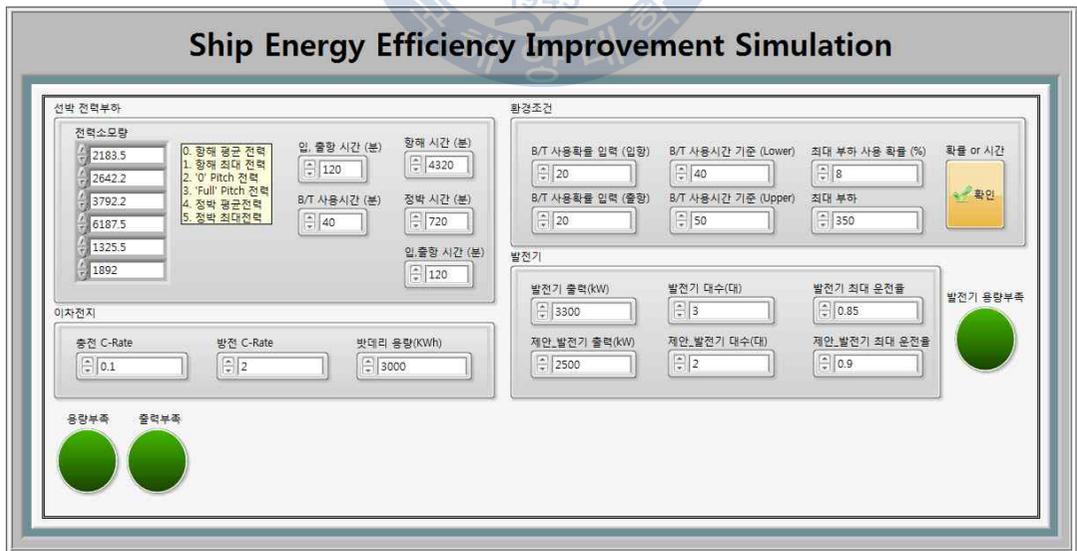


Fig 5.5 8,600TEU containership environmental condition

5.3.2 데이터 분석

8,600TEU 컨테이너선의 전력소비량은 발전기용량 및 설치 대수에 비하여 매우 작다. 이에 따라 8,600TEU 컨테이너선의 경우 이차전지 적용선박의 발전기 대수를 2대로 고정하지 않고 2대 또는 3대의 발전기 설치 대수를 변화시켜가며 변화에 따른 이차전지 용량과 연료소비량을 분석하였다. 연료소비량은 4,600TEU 컨테이너선과 동일하게 식 (5.3)을 적용하여 비교하였다. 표 5.2는 8,600TEU 컨테이너선의 분석결과를 나타낸다.

Table 5.2 8,600TEU containership simulation results

발전기용량× 발전기 대수	이차전지 용량	T_{SFC} T_{BLSFC}	에너지 효율	Payback	비 고
3,300 kW × 3	-	0 MT	1	-	
1,300 kW × 3	2,600 kWh	87.177 MT	1.020	19.36	
1,400 kW × 3	2,000 kWh	67.624 MT	1.017	19.20	
1,500 kW × 3	1,600 kWh	52.012 MT	1.013	19.97	
1,600 kW × 3	1,100 kWh	24.520 MT	1.006	29.13	출력부족
1,700 kW × 3	8,00 kWh	-2.080 MT	0.999	-	출력부족
2,400 kW × 2	1,200 kWh	9.550 MT	1.002	81.58	
2,500 kW × 2	1,000 kWh	88.914 MT	1.023	7.30	출력부족
2,600 kW × 2	850 kWh	71.676 MT	1.018	7.70	
2,700 kW × 2	700 kWh	50.730 MT	1.012	8.96	출력부족
2,800 kW × 2	700 kWh	33.906 MT	1.009	13.4	출력부족

8,600TEU 컨테이너선의 경우 입항 및 출항 시 필요한 전력량이 항해 시 전력량에 비하여 급격하게 증가함에 따라 발전기 수량을 2대에서 3대까지 변경시켜가며 필요 이차전지 용량을 선정하였다. 발전기 수량으로 인한 기자재 대체효과를 제외하면 발전기 2대를 설치하였을 경우 3대 설치 경우보다 항해 시 에너지 효율은 다소 낮으나 이차전지 용량 축소로 인해 payback이 짧음을 확인할 수 있다. 그러나 방전 C-rate를 2로 하였을 때 이차전지에서 출력 가능한 전력은 이차전지 용량에 비례하므로 이차전지 필요용량이 감소함에 따라 바우 스텐더 사용에 대한 최대 출력을 감당하지 못하는 현상이 발생하였다. 표 5.3은 표 5.2에 나와 있는 출력부족 경우에 대하여 이차전지 용량을 충분히 출력량을

가지도록 재설정 한 값을 나타낸다.

Table 5.3 8,600TEU containership simulation results

발전기용량× 발전기 대수	이차전지 용량	$T_{SFC} - T_{BLSFC}$	에너지 효율	Payback
3,300 kW × 3	-	0 MT	1	-
1,600 kW × 3	1,200 kWh	24.520 MT	1.006	31.77
2,500 kW × 2	1,200 kWh	88.914 MT	1.023	8.76
2,700 kW × 2	1,000 kWh	50.730 MT	1.012	12.80
2,800 kW × 2	1,000 kWh	33.906 MT	1.009	19.15

또한 발전기용량이 너무 작을 경우 1대의 발전기로 항해 중 지속적으로 이차전지 충, 방전이 발생하게 되어 히스테리시스 제어에 따라 그림 5.6와같이 발전기 병렬운전으로 인한 이차전지 충, 방전이 일어나게 되어 이차전지 수명에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 발전기용량은 1대의 발전기로 항해 중 대부분의 부하를 감당할 수 있는 정도가 적당할 것으로 판단된다.

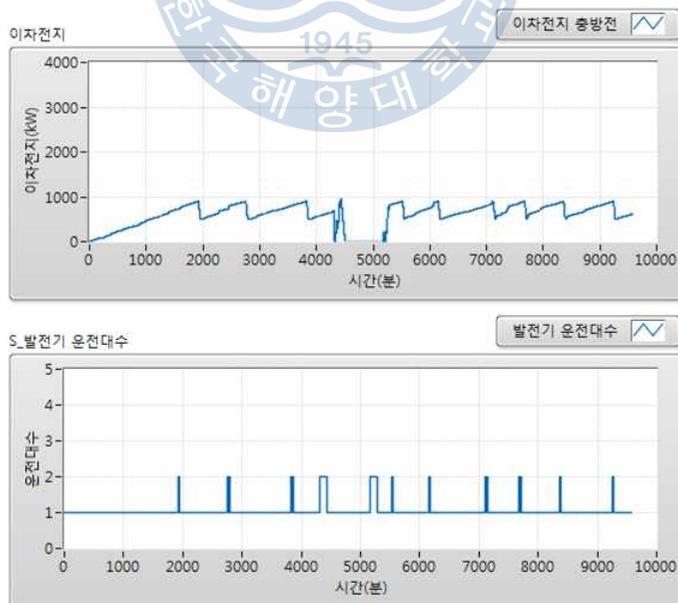


Fig 5.6 LIB charging-discharging hysteresis control

5.4 LNGC

5.4.1 환경조건

LNGC 선박은 컨테이너선과 운항조건의 많은 차이를 보인다. 특히 컨테이너선, 자동차운반선, 벌크선 등의 경우 선박 운항기간 중 입항 및 출항 시 가장 많은 전력을 소비하며, 특히 바우 스텔러스터 사용에 따라 선박 최고 부하가 결정되게 된다. 따라서 컨테이너 선박의 경우 발전기용량을 줄이더라도 입항 및 출항 시 이차전지를 사용하여 바우 스텔러스터에서 필요로 하는 전력공급이 가능하다. 그러나 LNGC 선박의 경우 운항 기간 중 가장 많은 전력을 소비하는 구간은 LNG를 하역하는 구간이다.

LNGC 선박은 항해 중 발생하는 BOG(Boiled-Off Gas) 를 이용하여 터빈 발전기를 구동하게 된다. BOG는 LNG저장용기의 특성상 필히 발생하게 되며, 사용하지 않을 시 공기 중에 버려짐으로 BOG를 이용하기 위해 LNGC 선박은 2대의 터빈 발전기를 사용한다. 이외에 선적 및 BOG의 부족 등 특수한 상황으로 터빈 발전기를 구동하기 위한 스팀(Steam)이 부족하게 되면 선내연료로 이용하여 보일러를 사용하여 부족한 스팀을 생성한다. 그림 5.7는 LNGC선의 환경조건이다.



Fig 5.7 LNGC environmental condition

LNGC선박은 항해 중 1대의 터빈발전기를 사용하여 선내전력을 공급하며, 입항 및 출항 시 바우 스러스터 사용에 의한 필요 전력은 2 대의 터빈 발전기를 병렬운전함으로써 선내전력을 공급한다. 또한, LNGC 선박은 폭발 및 누유의 위험으로 예방하기 위해 육상에 직접 선박을 정박하지 못하고 해상 기지에 정박하게 된다. 이에 따라 다른 선종에 비하여 비교적 입항 및 출항에 소요되는 시간이 짧다. 이에 반해 3대의 발전기를 모두 사용하는 경우는 선적 시 대량으로 발생하는 BOG나 하역 시 LNG를 육상으로 이송하기 위해 H/D(High Duty) Comp.를 가동하는 경우이다. 평균 선적시간이 8시간 이상이며, 하역의 경우 11시간 이상의 시간을 소요하게 된다.

5.4.2 데이터 분석

LNGC 선박의 경우 환경조건에 나와 있듯이 입항 및 출항 시간이 비교적 짧으며 선적 및 하역 시에 비하여 전력소비량이 작으므로 이차전지 적용을 위해 선적 및 하역을 기준으로 선정할 필요가 있다.

Table 5.4 LNGC simulation results

발전기용량 × 발전기 대수	이차전지 용량
3,300 kW × 3	-
3,300 kW × 2	2,4 MWh
3,000 kW × 3	500 kWh
2,800 kW × 3	6.2 MWh

LNGC 선박의 경우 여유전력이 다른 선종에 비하여 매우 적다. 3대의 발전기 중 1대의 발전기를 제외했을 경우 11시간의 하역기간 동안 1대분의 발전기 출력을 이차전지에서 감당하여야 하므로 MWh단위의 이차전지가 필요하므로 적용하기 어렵다. 3대의 발전기 대수를 유지하며 발전기용량을 줄였을 시 이차전지 적용이 가능하나, LNGC의 특성상 BOG를 이용하여 발전하므로 소비 연료량을 알 수 없어 payback계산이 불가능하다. 또한, 장기간 많은 전력을 소비하는

LNGC 선박의 특성상 이차전지 적용으로 인한 신뢰성 확보가 어려울 것으로 판단된다.



제 6 장 결 론

본 논문에서는 선박 에너지 효율개선을 위해 에너지 저장장치 적용에 관한 연구를 수행하였다. 기존 선박의 경우 선박 건조 때 선박부하에 여유부하를 더하여 발전기용량을 산정함에 따라 용량이 큰 발전기를 적용하게 된다. 따라서 비교적 전력 소비량이 적은 정박 및 항해구간에 낮은 부하율 때문에 발전기 저부하 운전이 발생한다. 이러한 발전기의 저부하 운전은 에너지 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 발전기 수명에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 이에 따라 이러한 문제를 해결하기 위하여 에너지 저장장치를 연동한 선박 전력관리시스템을 제안하였다.

선박에 적합한 에너지 저장장치를 선정하기 위해 기존의 육상 및 해상에서 사용되고 있는 에너지 저장장치를 조사, 분류하였다. 에너지 저장장치로 비교적 각광받고 있는 울트라 커패시터, 플라이휠, 이차전지를 비교, 분석하여 가장 대형 선박에 적합한 에너지 저장장치를 선정하였다. 비교 결과 대형 선박에 가장 적합한 에너지 저장장치로 이차전지를 선정하였다. 이에 따라 이차전지를 적용한 선박전력관리시스템을 제안하였다.

보다 신뢰성을 갖는 에너지 저장장치 연동형 선박전력관리시스템을 적용하기 위하여 다양한 크기 및 선종의 선박의 실 운항 데이터를 바탕으로 전력소비량, 운항비율, 중요부하 운영 방안 등에 대하여 분석하였다. 이를 반영하여 각 선종별 선박부하를 도출하였으며 이에 적합한 이차전지 연동형 선박 전력관리시스템을 제안하였다.

이차전지 연동형 선박의 적합성 및 에너지 효율성을 분석하기 위해 LabVIEW를 이용하여 발전기 및 이차전지 용량을 변경하여 최적 점을 도출하였다. 발전기용량 및 대수에 따른 이차전지 용량과 에너지 효율성은 반복실험을 통해 얻어지는 값의 평균값을 반영하여 작성하였다. 또한 선박별 환경조건에 따라 선

박 부하를 자동으로 모델링하여 추후 각 선박별 발전기용량선정에 유용하게 사용가능할 것으로 판단된다. 또한 각 시뮬레이션 결과 값을 데이터베이스에 기록할 수 있도록 하여 비교, 분석이 편리하도록 작성하였다.

선박 전력데이터는 1일 평균데이터를 30일간 취득하여 분석한 것으로 운항중인 선박과 오차가 다소 발생할 수 있으나 추후 운항 선박의 실시간 전력데이터를 적용하면 보정을 통해 보다 정확한 결과 값을 얻을 수 있다. 본 연구를 통하여 제안한 이차전지 연동형 선박 전력관리시스템을 적용함으로써 선박 내 전력시스템의 에너지 효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 이차전지 연동형 선박의 에너지 효율개선을 통해 환경규제에 능동적인 대체가 가능하며, 정박 시, 상황에 따라 발전기를 가동하지 않고 무소음, 무공해로 하역 및 선적이 가능하다.

본 논문을 통해 연구된 에너지 저장장치 연계형 선박 전력시스템은 추후 발전기 기자재 대체효과, 환경 규제 대응효과 등을 기대할 수 있으며, 보다 정확한 payback 기간을 산출하여 이차전지 적용 선박의 진출 가능성을 평가할 예정이다. 신뢰성을 확보하기 위해 신뢰성 판단기준 및 평가기준 제시를 통하여 발전기 및 이차전지 용량선정을 하는데 참고자료로 활용 가능하다.

참고문헌

1. 한국수출은행, 2012, 그린쉽(Green-Ship; 고연비·친환경 선박), 조선산업의 새로운 도전과 기회, 한국수출입은행 해외경제연구소
2. 국토해양부 한국해양수산개발원, 2011, 미래 녹색선박산업 추진 전력(최종보고서)
3. Hannes Johnson, Mikael Johansson, Karin Andersson, Bjorn Sodahl, Will the Ship energy efficiency management plan reduce CO2 emissions? A comparison with ISO 50001 and the ISM code, Maritime policy & Management, 2013 Vol.40 No.2, pp.177-190
4. Harbine, Heilongjiang, Propeller Efficiency Option for Green Ship, 2012 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences&Technology, pp.155-161
5. Shinji Kato, Gyeong-Rea Cho, Masakazu Michihira, A Comparative Study on Power Generation Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Generators for Greenship, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 2012 Vol.36 No.3, pp.378-386
6. 김순갑, 이윤석, 공길영, 김종필, 정창현, 2012, 선박의 연료소비량 절감을 위한 항해 속력에 관한 연구, 해양환경안전학회지, 18(1), pp.41-47
7. 신윤미, 조권희, 2012, 선박용 폐열회수시스템 적용에 관한 연구, 2012년도 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, pp.231
8. 박영삼, 2010, 하이브리드 선박의 연비 특성에 관한 연구, 아주대학교 공학석사논문
9. 김정도, 정균식, 이지웅, 송영환, 정찬호, 최재성, 2010, 선박용 디젤발전기의 저부하 운전에 관하여, 2010년도 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp.189-190
10. Qian Mei, Wu Zheng-quo, Han Jiang-gui, Real-time Simulation and Analyses of Ship Energy Management System Network, 2012 International Conference on Future Energy, Environment and Materials, pp.1972-1978
11. A. Lana, K. Tikkanen, T. Lindh, J. Partanen, 2012, Control of directly connected energy storage in diesel electric vessel drives, 15th International

- Power Electronics and Motion Control Conference, pp.7.1-7.6
12. So-Yoen Kim, Byung-Geuk Cho, Seung-Ki Sul, 2012, Feasibility Study of Integrated Power System with Battery Energy Storage for Naval Ships, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp.532-537
 13. John McGroarty, Jesse Schmeller, Richard Hockney, Matthew Polimeno, 2005, Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship, 2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp.400-406
 14. Hyun-Woo Jeong Yoon-Sik Kim, Chul-Ho Kim, Sung-Hwan Choi, Kyoung-Kuk Yoon, 2013, Analysis on Application of Flywheel Energy Storage System for offshore with Dynamic Positioning System, Journal of the Korean Society of Maritime Engineering, Vol.36 No.7, pp935-941
 15. 최중대, 이대형, 정종렬, 박윤길, 차석운, 2012, E-REV 버스의 전기 주행 가능 거리를 고려한 배터리 용량 선정 연구, 2012년 한국자동차공학회 학술대회, pp.2310-2314
 16. World's First Hybrid Car Carrier Emerald Ace Completed, Retrieved June 29, 2013 from <http://www.mol.co.jp/en/pr/2012/12035.html>
 17. The missing link : why Australia needs energy storage, Retrieved Nov 28, 2013 from <https://theconversation.com/the-missing-link-why-australia-needs-energy-storage-10846>
 18. Do-Young Park, Jin-Seok Oh, 2011, Smart Power Management System for Leisure-ship, Journal of Navigation and Port Research International Edition Vol.35 No.9, pp.749-753
 19. Dennis Babu, Anirudh Kumar, Joydeb Roychowdhury, 2012, FPGA Based Module Predictive Controller for Dynamic Power Management of a Battery Powered Electric Car, 2012 12th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications(ISDA), pp.363-368
 20. Saurabh Kulkarni, Surya Santoso, 2009, Impact of Pulse Loads on Electric Ship Power System : With and Without Flywheel Energy Storage Systems, Electric ship Technologies Symposium, pp.568-573
 21. Franck Scuiller, 2011, Simulation of an energy storage system to comensate pulsed loads on shipboard electric power system, IEEE, pp.396-401

22. 김소연, 설승기, 2012, 울트라 캐패시터 에너지 저장장치를 적용한 함정 전기추진 시스템의 효율성 증대 연구, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.17 No.2, pp.114-120
23. Chunling Xie, Conghui Zhang, 2010, Research on the Ship Electric Propulsion System Network Power Quality with Flywheel Energy Storage, Power and Energy Engineering Conference, pp.1-3
24. 이현석, 오진석, 강훈, 정성영, 함연재, 양향권, 2013, 컨테이너 선박에 이차전지 적용 방안을 위한 연구, 2013년도 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp.342
25. 한국과학기술정보연구원, 2007, 슈퍼 커패시터
26. 윤희도, 1997, 플라이휠 배터리의 전기 자동차에서의 응용, 1997년도 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp.638-643
27. Green Naval Ship : Electrical Load Distribution and its impact on Annual Fuel Consumption, Retrieved Sep 23, 2013 from https://www.utexas.edu/research/cem/Green_ship_pages/electric_load_distribution.html
28. V.H. Johnson, 2002, Battery performance models in ADVISOR. Journal of Power Sources 110, pp.321-329
29. Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, 2009. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. World Electric Vehicle Journal, Vol.3, pp.1-10.
30. Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, Abdel-llah Dekkiche, 2007. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. IEEE, PP.284-289
31. Shuhui Li, Bao Ke, 2011, Study of Battery Modeling Using Mathematical and Circuit Oriented Approaches, IEEE
32. Deutsche Bank revises li-ion battery cost forecasts downward to \$250/kWh by 20, Retrieved Jan 23, 2013 from <http://green.autoblog.com/2011/01/06/deutsche-bank-li-ion-battery-cost-forecast-per-kwh/>

감사의 글

석사과정을 마치고 '감사의 글'을 접하니 지난 학사 때부터 석사졸업이라는 기간이 주마등처럼 떠오릅니다. 자신 없었던 대학원 생활에 지지와 격려를 아끼지 않으셨던 모든 지인 분들이 있었기에 학위논문을 완성할 수 있었습니다. 이 글을 통하여 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

우선, 무엇이든 해보자라는 마음 하나로 진학하였던 대학원, 많은 고비와 갈등 속에 졸업에 이르기까지 지혜와 용기를 끊임없이 심어주시는 하나님께 감사드립니다.

낯선 대학교 생활에서부터 지금까지 많이 부족한 저를 연구에 매진할 수 있도록 아낌없는 격려와 지도를 해주신 오진석 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 앞으로도 많은 지도 부탁드립니다 항상 건강하시길 기도합니다. 또한 이러한 기회를 얻을 수 있도록 지원해주신 장세은 교수님, 바쁘신 일정 가운데에도 논문 심사를 맡아 좋은 말씀으로 지도해 주시고 조언해주신 소명옥 교수님, 항상 인자하신 모습으로 인사를 받아주시며 좋은 말씀으로 지도해주신 유희한 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 언제나 격려를 아끼지 않으시는 교수님들 덕분에 석사학위 동안 즐겁게 공부할 수 있었습니다. 또한, 늦은 시간까지 열정으로 가르침을 주신 정병건 교수님, 새로운 분야를 접하게 하여 주신 이명훈 교수님께도 감사드립니다.

대학교에 진학하여 E2E연구실에서 5년의 시간동안 생활하면서 많은 분들을 만났고, 도움을 받아왔습니다. 먼저 학교 선배로서, 인생선배로서 항상 챙겨주신 곽준호 형님께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 형님을 통해 세상 보는 눈을 더 크게 가질 수 있었으며 석사학위 가운데 많은 위안을 얻을 수 있었습니다. 옆에서 묵묵히 고민을 들어주며 진심으로 후배를 위해 또 연구실을 위해 생활하시는 형님을 보며 희생과 사랑을 배울 수 있었습니다. 그 마음 잊지 않고 닦아가도록 노력하겠습니다. 그리고 많은 공부와 연구 방법을 가르쳐 주신 조관준 선배님, 연구실 어머니와 같던 배수영 선배님, 많은 힘이 되었고 의지할 수 있었던 박도영 형님, 바른 생활과 고민을 들어주었던 한성훈 형님, 제게서 많은 짐을 덜 수 있도록 도와주신 정성영 형님, 많은 시간을 함께 보내지 못하여 아쉬운 김연형 선배님께 감사의 인사를 꼭 드리고 싶습니다. 또한 외국에서 연구실 사랑을 잊지 않고 주시는 이지영 선배님께도 감사의 인사를 드립니다. 또한 외부 대학원생으로써 연구실을 아낌없이 돌봐주셨던 함연재 사장님, 양향권 사장님, 유대완님께 감사의 말씀을 드립니다. 연구실에 활력을 주신 류승현 소령님, 최동일 소령님, 이창노 팀장님, 백공구 주무관께 감사의 마음을 전합니다. 아울러 학사, 석사 과정동안 동갑내기 친구로서 의지가 되었던 윤재연, 옆에서 지켜보며 많은 것을 배우고 느끼게 해주었던 강훈, 연구실에 활기를 주는 김지윤 형, 함께 석사과정 마지막시간을 보냈던 강영민, 성승면, 강세라, 장재희, 마지막으로 지금쯤 배를 타고 있을 동기 및 후배 최창원형, 이민구형, 김정형, 박기호, 이한희, 임혜영, 부재웅에게

도 감사의 말을 전합니다. 이 외에도 일일이 거명하지 못한 많은 선후배님들에게 감사의 인사를 전합니다.

대학교생활과 대학원생활을 지나오며 많은 좋은 분들을 뵙고 좋은 영향을 받아 지금까지 올수 있었습니다. 이제 같은 학교를 다니게 된 기훈이, 먼 영도까지 오게 만들어 놓고 바쁘다는 핑계로 많이 못 챙겨 줘서 미안하고 반대로 내가 위로를 받은 것 같아 항상 고맙다. 그리고 다시 공부를 시작하는 인용이, 항상 밝은 모습의 용희, 든든한 수형이, 그리고 일일이 언급 못하는 중, 고등학교 친구에게도 진심을 담아 고마움을 전합니다.

마지막으로 항상 뒤에서 저를 믿고 응원해주시며 지지해주신 사랑하는 부모님, 힘이 되어주며 응원을 아낌없이 해주었던 큰누나와 매형, 어느덧 직장에 들어가 정신없이 하루하루를 보내고 있는 작은누나에게 감사의 말씀 올립니다. 저를 믿고 항상 뒤에서 기도하여 주신 가족이 있었기에 오늘의 제가 있을 수 있었습니다. 그리고 항상 웃음으로 응원해주는 혜영이에게 고마움을 전합니다. 많은 분들에게 받았던 사랑을 베풀며 살도록 노력하겠습니다.



2013.12.26.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'hyz'.