

가변속 발전기 적용에 따른 컨테이너선박 에너지 효율성 비교

이현석¹ · 오진석[†]

(Received February 15, 2019 ; Revised July 25, 2019 ; Accepted September 7, 2019)

Comparison of energy efficiency of container ships with variable speed generation system

Hunseok Lee¹ · Jin-Seok Oh[†]

요약: 본 논문에서는 컨테이너선의 정속도 발전기를 대체하여 가변속도 발전기를 적용하였을 때, 연료소모량을 비교하고자 한다. 선박의 전력 계통은 육상의 전력 계통과 달리 독립 전력시스템의 형태를 갖추고 있다. 이에 선박 내부에 발전기를 탑재하여 자체적으로 선내 전력을 공급하게 된다. 선박에 탑재되는 발전기는 원동기와 교류발전기로 이루어져 있으며, 현재 운행되어지고 있는 대부분의 선박의 전력시스템은 60Hz 또는 50Hz의 교류전력을 적용하고 있다. 선박에서는 고정 주파수의 교류전력 생산을 위해 정속도로 회전하는 발전기를 적용하고 있으며, 이러한 정속도 발전기의 경우 원동기의 저부하 운전에 따라 효율이 낮아지게 된다. 본 논문에서는 이러한 정속도 발전기 적용에 따른 효율 저하 문제를 해결하기 위하여 가변속도 발전기를 적용하여 에너지 효율을 비교하였다. 통상적으로 낮은 부하율에서 운전되어지고 있는 컨테이너 선박의 전력데이터를 이용하여 가변속도 발전기를 적용하였을 시 에너지 효율 변화를 시뮬레이션을 통하여 예측하였다. 시뮬레이션 결과 가변속도 발전기를 적용하였을 때 정속도발전기에 비하여 약 7%의 에너지 효율이 증가함을 확인할 수 있었다.

주제어: 컨테이너 선박, 가변속 발전기, 에너지 절감, 연료소비, 선박전력체계

Abstract: In this paper, when the variable speed generation (VGS) system is applied by replacing the constant velocity generator of the container line, the fuel consumption is compared. The ship's electric power system has an independent power system that differs from the land power system. Therefore, power generators will be installed inside the ship to supply power on their own. The power generation system of the vessel consists of a prime mover and an alternator. Most ship power systems currently in operation have alternating current power of 60 Hz or 50 Hz. The ship uses a generator that rotates at constant speed to produce alternating current power at a fixed frequency. In the case of constant speed generators, the efficiency decreases owing to the low load operation of the prime mover. To solve the problem of low efficiency due to the independent power system of the constant speed generator, the VSG system was applied and energy efficiency was compared. The differences in energy efficiency were predicted through simulation using the power data of container ships operated at low load rates. Simulation results showed that the energy efficiency of the VGS increased energy efficiency by approximately 7% compared with the constant speed generator.

Keywords: Container ship, Variable speed generation system, Energy saving, Specific fuel oil consumption (SFOC), Ship electric power system

1. 서론

연료유 가격의 상승과 지구온난화 문제로 온실가스 (GHG, Green House Gas)를 줄이기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 이러한 이유로 선박에서의 배출가스 규제 및 연료유 절감을 통한 친환경 선박 개발을 위한 연구가 활발히 진행되어지고 있다[1][2]. 이러한 환경규제는 상업적 선박의 연비향상 기술 및 친환경 기술 경쟁을 촉발

시키고 있다. 선박의 에너지 효율향상을 위한 방법으로 선체의 선형개선을 통한 저항감소, 프로펠러 및 부가물 등을 활용한 고효율 추진기 적용, 보조 동력(태양광, 배터리 등)을 이용한 효율향상 방법 등 다양한 방법이 연구되어지고 있다[3]-[7].

선박에 탑재되는 정속 발전기의 경우 정격출력의 75~90%사이에서 높은 에너지 효율을 가지는 반면, 정격출

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

¹ Ph.D Candidate, Division of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: gar4153@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4866

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

력의 50% 이하에 낮은 효율을 가질 뿐만 아니라[8], 연소상태 불량으로 인한 문제가 발생할 수 있다[9]. 이러한 저부하로 인한 문제점을 해결하기 위하여 기존의 연구들[8]-[10]을 참고하여 컨테이너 선박에 가변속 발전기를 적용하였을 때 에너지 효율성을 상호 비교한다.

2. 선박용 디젤발전기

2.1 구조 및 동작 원리

원동기인 엔진의 경우 연료를 공급하면 지속적으로 전력을 생산할 수 있기 때문에 널리 이용되어지고 있다. 이러한 이유로 선박에 탑재되는 발전기는 정속도로 회전하는 원동기와 교류전력을 발생시키는 교류발전기로 구성되어 탑재된다.

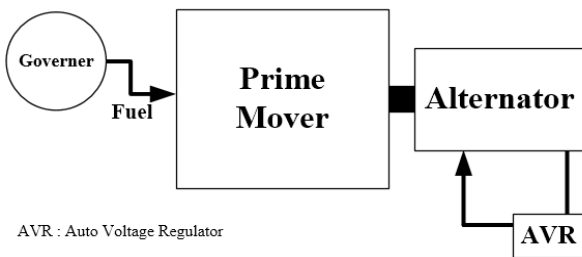


Figure 1: Generator configuration

가스운반선을 제외한 대부분의 상선의 경우 디젤동기발전기가 탑재되어 운항된다. 발전기의 구성은 4행정 디젤원동기(Prime Mover), 교류발전기(Alternator), 발전기의 회전속도를 제어할 수 있도록 원동기에 주입되는 기름 양을 제어하는 거버너(Governor), 교류발전기에서 생산되는 전력의 전압을 제어하는 자동전압조정기(AVR) 등으로 이뤄진다.

교류발전기는 고정자(stator), 회전자(rotor), 여자기(exciter) 등으로 구성된다. 교류발전기의 회전자는 원동기와 샤프트로 연결되어 있으며, 고정자에 출력권선이 연결되어 전력을 발전기로부터 공급받는다. 선박에서 필요로 하는 전원의 전압 및 주파수를 얻기 위해 지속적으로 거버너와 자동전압조정기가 발전기를 제어하게 된다. 발전기에서 생산되는 전원의 주파수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{120f}{P} \tag{1}$$

식 (1)에서 N 은 원동기의 분당 회전수(rpm), f 는 주파수(Hz), P 는 교류 발전기의 극수(m)를 나타낸다. 따라서 선박 내 일정한 주파수의 전원을 공급하기 위해 원동기는 항상 같은 속도로 회전해야 한다.

발전기에서 생산되는 전원의 전압은 플레밍의 법칙에 따라 식 (2)와같이 단순하게 나타낼 수 있다.

$$V \approx v \times B \times L \tag{2}$$

전압 V 은 공간의 자속밀도 $[wb/m^2]$ 와 회전자의 운동속도 및 자속을 끊고 있는 도체의 길이에 비례한다. 동기발전기에서 회전자의 회전속도 및 회전자의 도체 길이는 일정하므로, 전압은 자속 밀도와 비례하게 된다. 이러한 이유로 자동전압조정기에선 여자의 전류를 제어하여 출력되는 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 한다.

2.2 발전기와 연료소비량

정격속도로 운전하는 원동기의 경우 30% 이하의 부하율에서 연료소모율이 급격하게 증가하며, 연소불량으로 인한 매연 등의 문제를 야기한다[8]. Figure 2는 MAN B&W사의 MAN7S60MC엔진의 속도와 출력에 따른 연료소비량을 나타낸다[11].

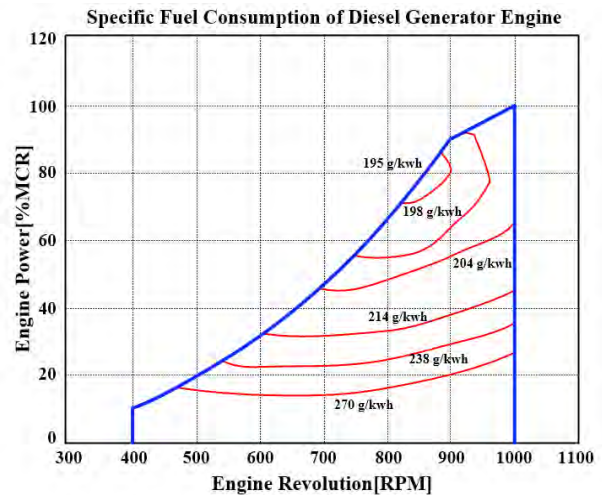


Figure 2: Specific fuel consumption graph for representative diesel generator versus engine speed and load

Figure 2와 같이 원동기 엔진이 동일한 출력을 낼 때 엔진의 회전수에 따라 연료소비량(SFOC, specific fuel oil consumption)이 달라진다. 그러나 선박에 탑재되는 발전기는 정속도 발전기로 엔진의 회전속도를 변화시킬 수 없으므로 엔진의 최적인전구간에서의 운전이 불가능 하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 컨테이너선의 전력 데이터를 바탕으로 정속도 발전기 적용에 따른 연료소비량과 가변속 발전기의 엔진 최적 운전점에 활용에 따른 연료소비량을 비교한다.

3 연료소비량 비교

3.1 컨테이너선 전력 데이터

연료소비량의 비교 대상선박은 컨테이너선으로 Table 1과 같은 제원을 가진다.

Table 1: Specification of target vessel

6,800 TEU Container vessel	
Length	299 m
Beam	40 m
Draught	13.5 m
Generator	3,000kW × 4EA
TEU/Reefer Points	6,732 / 550
13,100 TEU Container vessel	
Length	365.5 m
Beam	48.4 m
Draught	14.5 m
Generator	3,800kW × 4EA
TEU/Reefer Points	13,100 / ***

선박의 데이터는 선내 발전기의 실제 운항되고 있는 선박의 전력데이터를 10분 간격으로 수집하였으며 6,800TEU 선박의 경우 2014년 11월부터 2015년 12월까지, 약 411일간의 전력데이터를 수집하였으며, 13,100TEU 선박의 경우 2014년 11월부터 2015년 12월까지, 약 408일간의 전력데이터를 수집하였다. 수집한 데이터는 각 발전기의 출력(kW)와 부하율(%)이며 **Figure 3**, **Figure 4**와 같다.

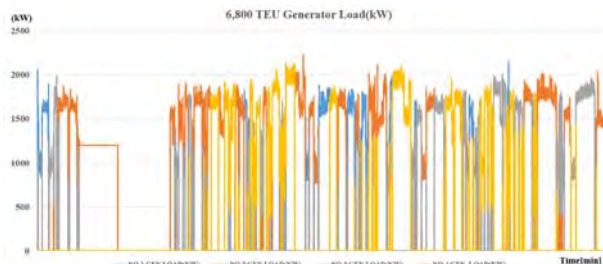


Figure 3: 6,800TEU container vessel generator load (411days)

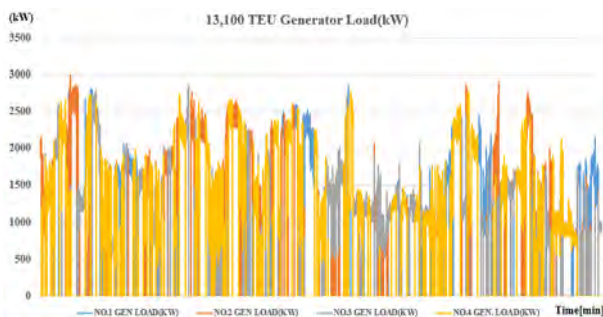


Figure 4: 13,100TEU container vessel generator load (418days)

3.2 전력시스템 모델

3.2.1 선박 전력시스템

컨테이너선은 냉동컨테이너의 탑재 개수에 따라 선내 필요전력의 차이가 많이 나는 선종으로 전력 안정성 확보를 위해 다수의 발전기를 탑재하여 병렬운전을 수행하고 있다. 또한, 입항 및 출항이 비교적 많고 빠른 시간 안에 이루

어지므로 바우스터스터, 보조송풍기 등과 같은 중부하(Heavy Load)사용에 따라 짧은 시간 동안 큰 전력이 필요하게 되어 전력소비량의 변화가 큰 편이다. 두 선박의 전력데이터를 분석한 결과 발전기 1대의 정격출력을 100%로 가정하였을 때, 50 ~ 60%의 범위의 전력 사용이 전체 운행기간의 약 19%로 가장 높은 비중으로 운용됨을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 저부하 구간에서의 발전기 운전을 피하고 효율을 향상시키기 위하여 기존의 전력체계(**Figure 5**)를 가변속도 발전기로 대체 적용한 전력체계(**Figure 6**)를 적용함으로써 에너지 소모량을 상호 비교하고자 한다.

가변속 발전기 전력체계는 교류발전기(alternator)에서 생산되는 주파수가 일정하지 않은 3상 교류전력을 직류전원으로 변환한 뒤 AFE(active front end) 회로 등을 이용하여 계통에 연결하는 것이 특징이다.

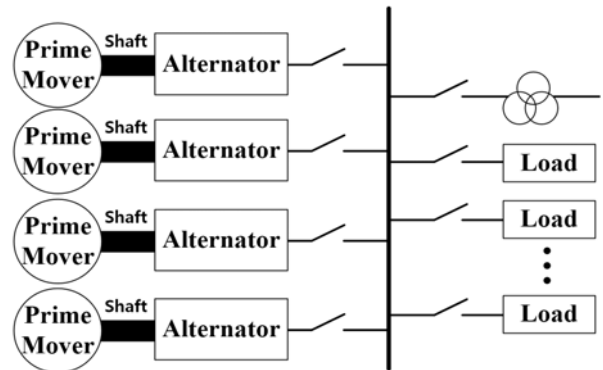


Figure 5: Constant speed generator ship power system

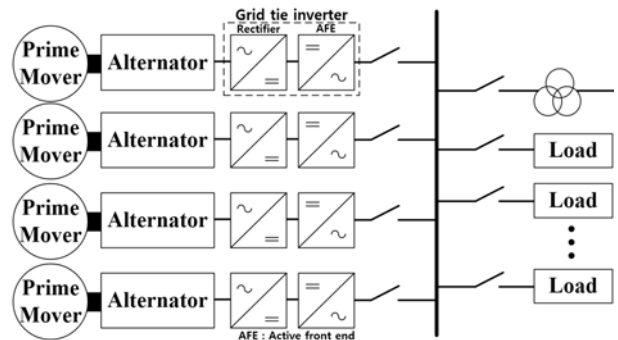


Figure 6: Variable speed generator ship power system

3.2.2 발전기 연료소모량

정속도 발전기의 연료소모량(g/kwh)은 발전기의 사양(정격출력 및 정격회전수)에 따라 SFOC 곡선에서 부하율에서 소비되는 연료소비량에 다소 차이가 발생할 수 있으나, 발전기 부하율에 따른 연료소모량(g/kwh)은 비슷한 경향을 보인다[5][8]. 본 연구에서 보다 정확한 연료소모량을 비교하기 위해 헬싱키 공과대학에서 실제 디젤엔진을 이용한 가변속도와 출력에 따른 연료소비량 결과[12]를 적용하여 컨테이너선박에 가변속 발전기를 적용할 때 연료소비량을 비교한다. **Figure 7**은 헬싱키 공과대학에서 시험한 가변속

발전기의 연료소비량-회전수-토크 곡선을 나타낸다.

정속도 발전기의 경우 8극, 900rpm을 갖는 엔진을 회귀해법(regression solver)을 이용하여 출력-연료소모량 곡선을 모델을 적용하였으며, 가변속도 발전기의 경우 최적운전곡선을 적용하여 출력-연료소모량 곡선 모델을 적용하였다.

가변속 발전기의 경우 교류발전기로부터 생산된 3상 전력을 교류계통에 투입하기 위해 정류회로를 거쳐 계통연계인버터를 통하여 모선에 연동될 수 있도록 해야 한다. 이때 전력변환장치를 통하여 교류 전원이 직류 전원으로 정류된 뒤 다시 교류전원으로 전력변환이 일어남에 따라 손실이 발생하게 된다. 전력변환장치의 경우 최근 반도체 소자의 발달과 제어기술의 발달로 인하여 최소 90% 이상의 효율을 내고 있다[12]-[14]. 따라서 본 연구에선 Figure 8와 같이 전력변환장치 효율을 적용하였다. 정속도 발전기 및 가변속 발전기의 부하율에 따른 연료소모량은 Figure 9과 같이 나타내었다.

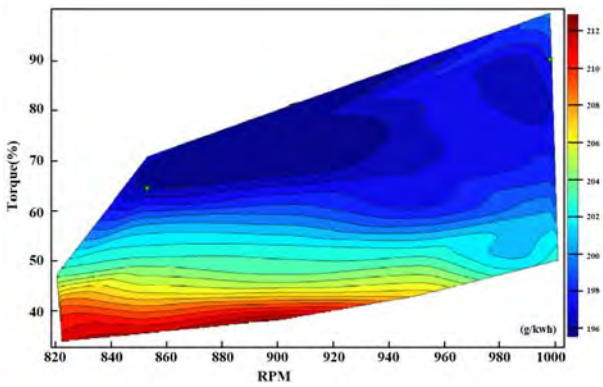


Figure 7: SFOC as function of RPM and torque [12]

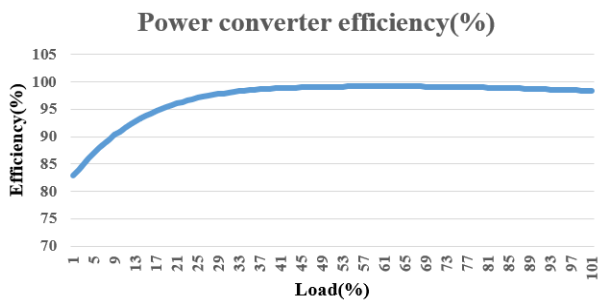


Figure 8: Power converter efficiency

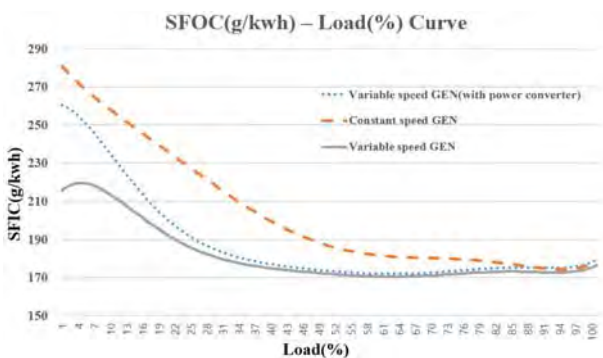


Figure 9: SFOC-Load curve

엔진의 연료효율을 나타내는 SFOC는 1시간동안 1kw를 생산하는 데 필요한 연료의 무게(g)를 나타낸다. Figure 9에서 부하율 90% 이상일 때 가변속 발전기와 정속도 발전기의 연료소비량의 차이는 미비하나 전력변환장치의 효율을 적용하더라도 부하율 40% 이상에서 1kWh당 20g이상의 연료가 절감됨을 확인할 수 있다.

3.3 컨테이너선 연료소모량 비교 시뮬레이션

발전기 전력데이터 Figure 3, Figure 4와 SFOC 곡선 Figure 9을 바탕으로 컨테이너 선박의 정속도 발전기를 가변속 발전기와 전력변환장치를 적용하였을 때 연료소비량을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션은 선박 부하모델과 가변속 발전기 SFOC 모델 4EA, 정속도 발전기 SFOC 모델 4EA 및 데이터 저장 및 분석 모델로 구성하였다.

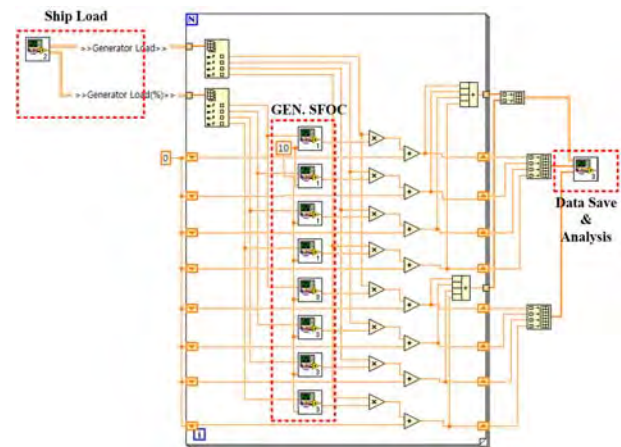
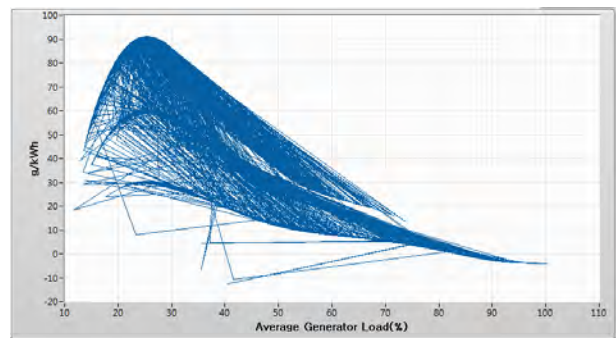
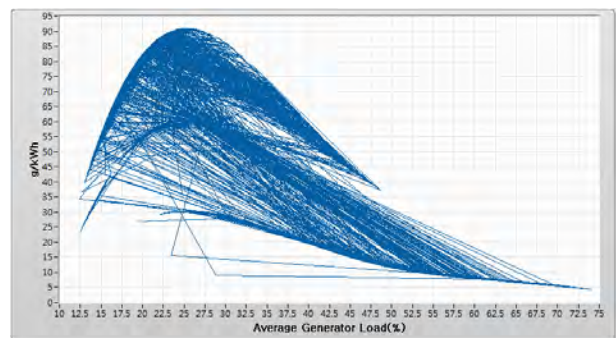


Figure 10: SFOC as function of RPM and torque [12]



(a)13,100 TEU Container vessel



(b)13,100 TEU Container vessel

Figure 11: Average Generator Load - SFOC efficiency curve

Figure 11는 선내 전체 전력소비량을 발전기 운전대수로 나누었을 때, 즉 발전기 1대당 감당하고 있는 발전기 평균 부하율에 따른 가변속 발전기를 적용할 때 정속도 발전기에 비하여 얻을 수 있는 SFOC의 정량적 양을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 6,800 TEU 선박 및 13,100 TEU 선박 모두 가장 높은 빈도로 선내 전력부하가 발전기 대당 평균부하율이 25%부근일 때가 가장 많았으며 최대 90g/kWh의 연료를 절감할 수 있음을 확인하였다. 또한, 약 400일간 운항하였을 시, 6,800 TEU 선박은 7.038%의 연료소비량을 절약할 수 있었으며, 13,100 TEU 선박의 경우 7.43%의 연료소비량을 절약할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 6,800 TEU 컨테이너 선박 및 13,100 TEU 컨테이너 선박의 운항주기동안의 전력데이터를 조사하였고, 기존 전력계통에 정속도 발전기를 탑재하였을 때와 가변속 발전기를 탑재하였을 때의 발전기 연료효율 및 연료소모량을 상호 비교하였다. 발전기의 연료소비량은 실제 소형 발전기의 시험데이터를 바탕으로 회귀 해석을 통하여 모델을 적용하였으며, 시뮬레이션 결과 약 7%더 적은 연료를 사용하여 선박을 운항할 수 있을 것으로 예상하였다. 추후 컨테이너 선박의 에너지 효율향상을 위해 MVDC(middle voltage DC) 및 HVDA(high voltage DC)의 적용에 따른 에너지 효율 및 가변속 발전기와 전력관리시스템 연동에 따른 제어 방안 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2018년 대한민국 교육부와 한국연구재단(NRF-2018R1D1A1B07049361) 및 ㈜대우조선해양의 ‘선박 에너지 효율 향상 연구’ 기술용역의 연구 지원을 받아 수행된 연구결과임.

Author Contributions

Methodology, H. Lee; Conceptualization, H. Lee and J. S. Lee; Software, H. S. Lee; Investigation, H. Lee; Writing-Original Draft Preparation, H. Lee; Visualization, H. Lee; Data Curation, H. Lee; Writing-Review & Editing, H. S. Lee; Resources, J. S. Oh and H. Lee; Supervision, J. S. Oh; Validation, J. S. Oh; Project Administration, J. S. Oh;

References

[1] S. H. Kim and C. D. Go, "Eco-friendly ship with the concept of sustainable development trends," Society of Naval Architect, vol. 40, no. 2, pp. 75-84, 2003 (in Korean).
 [2] B. R. Yoo, "The evolution of eco-friendly shipbuild-

ing technology," Korea Maritime Institute, Maritime Homeland, vol. 21, no. 6, pp. 42-52, 2010 (in Korean).
 [3] S. Kato and M. Michihira, "A comparative study on power generation characteristics of permanent magnet synchronous generators for green ship," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 36, no. 3, pp. 378-386, 2012.
 [4] S. K. Kim, Y. S. Lee, G. Y. Kong, J. P. Kim, and C. H. Jung, "A study on the ship's speed for reducing the fuel oil consumption in actual ships," Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety, vol. 18, no. 1, pp. 41-47, 2012 (in Korean).
 [5] H. S. Lee and J. S. Oh, "A study on appropriate ship power system for pulse load combine with secondary battery," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 962-968, 2013 (in Korean).
 [6] Y. M. Shin and K. H. Cho, "A study on the application of marine waste heat recovery system," Proceedings of the 36th Korean Society of Marine Engineering Fall Conference, p. 231, 2012 (in Korean).
 [7] Y. S. Park, "A study on the fuel efficiency of hybrid ships", M.S Thesis, Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Korea, 2011 (in Korean).
 [8] H. S. Lee, A Study on the Improvement of Ship Energy Efficiency through ESS (Energy Storage System), M.S Thesis, Department of Marine Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Korea, 2013 (in Korean).
 [9] J. D. Kim, K. S. Jung, J. W. Lee, Y. H. Song, C. H. Jeong, and J. S. Choi, "Low load operation of marine auxiliary diesel engines," Proceedings of the 34th Korean Society of Marine Engineering Spring Conference, pp. 189-190, 2010 (in Korean).
 [10] K. S. Jung, "Energy efficiency improvements in part load for a marine auxiliary diesel engine," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 7, pp. 877-882, 2014 (in Korean).
 [11] E. K. Dedes, D. A. Hudson, and S. R. Turnock, "Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping," Energy Policy, vol. 40, pp. 204-216, 2012.
 [12] D. L. King, S. Gonzalez, G. M. Galbraith, and W. E. Boyson, "Performance model for grid-connected photovoltaic inverters," Sandia National Laboratories,

pp. 1-47, 2007.

- [13] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, and F. Blaabjerg, “Autonomous control of interlinking converter with energy storage in hybrid AC-DC microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1374-1382, 2013.
- [14] P. rodriguez, A. Luna, R. S. Munoz-Aguilar, I. E. Otadui, R. Teodorescu, and F. Bladabjerg, “ A stationary reference frame grid synchronization system for three-phase grid-connected power converters under adverse grid conditions,” *IEEE Transactions on Power Electrics*, vol. 27, no. 1, pp. 99-112, 2012.