

10톤급 어선에의 DC 배전 전기 추진 선박 적용

손영광[†], 최세화¹, 이승용¹, 김소연², 설승기¹

Application of DC distribution IPS to a 10t Class Fishing Boat

Young-Kwang Son[†], Sehwa Choe¹, Seung-Yong Lee¹, So-Yeon Kim², and Seung-Ki Sul¹

Abstract

To take advantage of electric propulsion, several large vessel kinds, namely, cruise vessels, icebreakers, drill ships, and warships, have been generally designed with Integrated Power System (IPS). Although most of these vessels have adopted AC distribution IPS, DC distribution IPS ships have recently emerged as a new promising technology thanks to the availability of the products related to the DC distribution system, in which the system's major advantages over AC distribution are reduced weight and fuel consumption. This paper presents the comparison results of a 10-t class fishing boat for the AC distribution and DC distribution cases. By replacing AC distribution system with DC distribution, 31 – 41% reduction in the weight of the electrical equipment weight and 20–25% reduction in the fuel consumption are expected.

Key words: DC Microgrid, Electric propulsion, IPS(Integrated Power System), Variable speed engine drive, SFC(Specific Fuel Consumption), AFE(Active Front-End)

1. 서 론

1903년 러시아의 Vandal호에서 시작하는 전기 추진 선박(IPS, Integrated Power System)의 역사는 100년이 넘었다. 그러나 지난 오랜 기간 동안 전기 추진 선박을 찾아보기는 쉽지 않았다. 이는 반도체 소자와 전동기 등 전력변환기기의 한계 때문에 지난 한 세기 동안 증기터빈과 디젤엔진의 기계식 추진이 선박 추진 체계의 주류를 이루어왔기 때문이다^[1-2]. 하지만 전력전자 기술의 발전과 더불어 1980년대 이후에는 몇 가지 선종에 한하여 전기 추진이 가장 효율적인 추진 체계 중의 하나로 자리 잡았다. 그 예로는 유람선(cruise vessel), 쇄빙선(icebreaker), 시추선(drillship), DP(Dynamic Positioning) 선박 등이 있다^[3]. 최근에는 그 외의 선종에서도 전기 추진 체계가 적용되고 있어, 조선 업계에서 전기 추진

선박이 차지하는 비중은 점점 늘어나고 있다. 지난 10년간 전기 추진 선박 시장은 전체 선박 시장보다 3배 빠른 속도로 성장하였다^[4].

기계식 추진 선박과 전기 추진 선박의 추진체계는 각

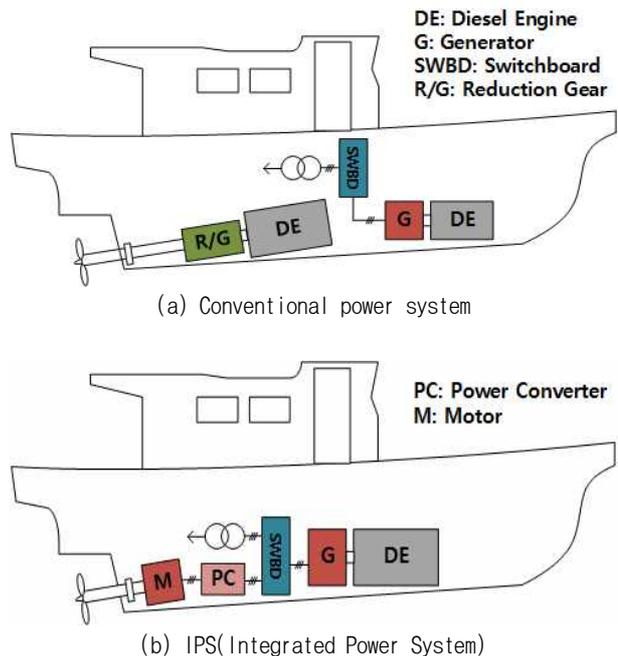


Fig. 1. Power system diagrams of vessels.

Paper number: TKPE-2017-22-4-10
 Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: sonbuforever@snu.ac.kr, Dept. of Electrical and Computer Eng., Seoul National University
 Tel: +82-2-880-7251 Fax: +82-2-878-1452

¹ Dept. of Electrical and Computer Eng., Seoul Nat'l Univ.

² Dept. of Electrical Eng., Republic of Korea Naval Academy
 Manuscript received May 12, 2017; revised June 2, 2017; accepted June 6, 2017

— 본 논문은 편집위원회에서 기술논문으로 추천됨

TABLE II
SURVEY RESULTS ON 10t CLASS FISHING BOATS

Item		Boat A	Boat B	Boat C	Boat D	Boat E
Main engine rated power (HP)		380	488	488	485	560
Engine generator rated power (HP)		280	150	431	120	310
Speed (kts)		10	10.5	10	10	-
Distance to fishery (NM)	Summer	20	30	20	30	-
	Winter	70	70	100	110	-
Fishing time (hours)	Summer	4	7	10	11	-
	Winter	14	10	12	12	-
Number of fishing per month	Summer	25	20	-	20	-
	Winter	12	-	-	8	-

각 그림 1 (a)와 (b)에 나타낸 바와 같다. 전기 추진 선박은 크게 변동하는 추진 부하 프로파일(profile)을 가진 선박이나 추진 부하 외의 전력부하가 큰 선박에 적용될 때 그 장점이 극대화되는데, 위 조건을 만족하는 경우 그림 1과 같이 선박 내에 설치되는 원동기 개수가 줄어들어 설치 장비의 무게와 부피가 줄어든다. 또한 엔진이 더 효율적인 운전점에서 동작될 수 있기 때문에 연료 소모량이 줄어든다. 그 외에도 전기 추진 선박은 엔진의 소음과 진동이 저감되고 엔진의 설치 자유도가 증대되고 선박의 조종성이 향상되는 장점들을 가지고 있다^[3].

더 나아가 최근에는 DC 차단기와 DC 전력변환기기의 기술이 발전하면서 DC 배전 전기 추진 선박이 신기술로 조명 받고 있다. DC 배전 전기 추진 선박의 가장 큰 장점은 엔진발전기(genset)가 엔진의 최적 운전점(optimal operating line)을 따라 운전되어 연료 소모량이 감소한다는 점과 변압기 및 일부 필터가 사라져 전력설비의 무게와 부피가 대폭 줄어든다는 점이다. 이 장점은 일반적인 육상 DC 마이크로그리드의 장점과 내용은 동일하지만, 탑재 공간과 무게가 제한되는 특성상 선박에서 그 효과가 더욱 크다. 이 외에도 전력 제어가 쉬워지고, 전력변환효율이 높아지고, ESS와의 연계 시 시너지 효과를 얻을 수 있다는 장점들이 있다^{[5]-[6]}.

최근 DC 배전 전기 추진 선박을 적용하려는 시도는 10MW 이상의 발전기가 설치되는 대형 상선에서 활발하게 진행 중이지만, 전력 부하가 큰 어선의 특성상 소형어선 또한 전기 추진 선박으로 설계된다면 위에서 언급된 전기 추진 선박의 장점을 상당 부분 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 본 논문에서는 연안에서 운항되는 10톤급 어선을 대상으로 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박의 전력 시스템을 구성한 후 전력설비의 무게와 연료 소모량 측면에서 두 시스템을 비교한다. 2절에서는 어업 현장의 조업자들을 대상으로 한 설문조사를 통하여 전력 부하 리스트와 부하 프로파일을 얻고, 3절에서는 2절에서 구한 전력 부하 리스트를

TABLE I
ELECTRIC LOAD LIST OF
A GENERAL 10t FISHING BOAT

Item		Value (kW)
General electric load		5
Sea water pump	Summer	30
	Winter	15
Jigging Machine		10
Windlass		15
Lighting load (LED)		52
Propulsion load		120

바탕으로 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박의 전력 시스템을 구성하여 두 시스템의 전력설비 무게를 비교한다. 이어 디젤 엔진의 연비지도를 바탕으로 두 시스템의 연료 소모량을 비교한다.

2. 대상 선박의 부하 분석

2.1 설문조사

10톤급 연안 어선의 운항패턴과 전력 사용량을 알아보기 위하여 주문진항에서 출항하는 연안 어선의 선장들을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 먼저 해양 및 항공 분야에서 사용되는 용어를 정리하자면, 1NM(nautical mile) 혹은 1해리(海里)는 길이의 단위로 1.852km와 같고, 1kts(knot) 혹은 1노트는 속력의 단위로 1.852km/h와 같다. 주엔진은 프로펠러와 연결되어 추진력을 만들어내는 엔진을 의미하고, 보조엔진은 발전기와 연결되어 전력을 발생시키는 엔진을 의미한다.

10톤급 어선의 일반적인 전력부하 리스트는 표 1과 같다. 항해 장비, 전열·취사 장비를 포함하는 일반 부하

의 평균 전력은 $5kW$ 이다. 그리고 어류를 보관하기 위해 사용되는 해수펌프(sea water pump)의 전력은 수온이 낮고 용존 산소량이 높은 겨울에는 $15kW$, 수온이 높고 용존 산소량이 낮은 여름에는 $30kW$ 이다. 어업용 조상기(jigging machine) $10kW$ 는 조업 중 항상 사용되며, 양묘기(windlass) $15kW$ 는 어업 종료 시 약 20분 동안 사용된다. LED 조명등은 $52kW$ 가 사용된다고 가정하였다. 10톤 미만 어선의 집어등 최대 광력은 ‘어업의 허가 및 신고 등에 관한 규칙 일부 개정령안(2008)’에 따라 $81kW$ 로 제한되는데, 대부분의 어선은 최대 제한 치와 가까운 수준으로 집어등을 설치하여 운용한다. 이를 LED로 대체할 경우 25~36%의 소비전력으로 $61.1\sim 86.6\%$ 의 어획량을 얻을 수 있으므로, [6]-[7] $52kW$ 의 LED 조명등을 사용하면 기존 $81kW$ 의 메탈 할라이드 조명등의 어획량을 초과하는 수준의 어획량을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

10톤급 어선 5종에 대한 주요 설문조사 결과는 표 2에 기록된 바와 같다. 주엔진과 보조엔진 출력의 합은 $605\sim 919$ 마력(HP) 수준이며, 일반적인 항해 속도는 $10\sim 10.5kts$ 이다. 3월에서 8월까지 이어지는 여름철에는 어장까지의 거리가 $20\sim 30NM$ 이며, 조업 시간이 $4\sim 11$ 시간, 월간 출항 횟수가 $20\sim 25$ 회이다. 11월부터 2월까지 이어지는 겨울철에는 어장까지의 거리가 $70\sim 110NM$, 조업 시간이 $10\sim 14$ 시간, 월간 출항 횟수가 $8\sim 12$ 회다. 겨울철 조업 시간이 여름철 조업 시간보다 긴 것은 어선은 태양 빛이 없는 밤중에만 어업을 할 수 있고, 겨울철의 밤이 여름철의 밤보다 길기 때문이다.

그 외 설문조사 결과로, 대부분의 선박은 주엔진을 끈 상태로 조업하며 보조엔진은 출항 시부터 입항 시까지 항상 구동된다. 해수펌프는 조업 시작 시점부터 입항 시점까지 구동되며, 집어등은 조업 시간 외에도 조업 전후 약 1시간 동안 켜진다. 또 1~2시간가량 어획 불량 상태가 지속되면 다른 어장으로 선박을 이동시킨다.

2.2 부하 프로파일

10톤급 연안 어선을 전기추진 선박으로 설계하였을 때 예상되는 여름철 전력 부하 프로파일과 겨울철 전력 부하 프로파일은 그림 2와 같이 나타난다. 전력 부하는 표 1의 값이 사용되었으며, 추진 전력 부하는 ITTC-1957에 정의된 2차원 저항해석법에 의해 예측된 값인 $120kW$ 가 적용되었다. 여름철 어장까지의 편도 항해 시간은 2시간, 조업시간은 8시간으로 설정되었고, 겨울철 어장까지의 편도 항해 시간은 10시간, 조업 시간은 14시간으로 설정되었다. 또한 공통적으로 조업 중 1회, 30분의 어장 이동 시간이 있다고 가정되었다. 실제로는 선박의 무게에 따라 추진 전력의 부하 크기가 수~수십%까지 달라질 수 있는데 이에 대한 영향은 3.2.2절에서 고려하였다.

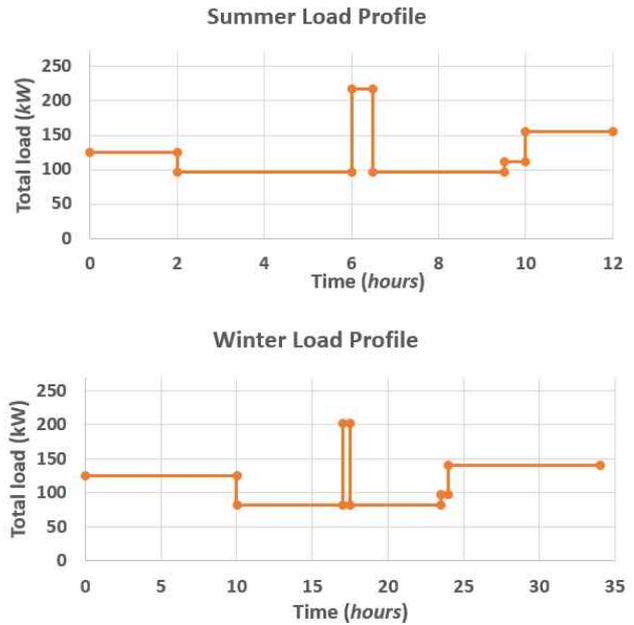
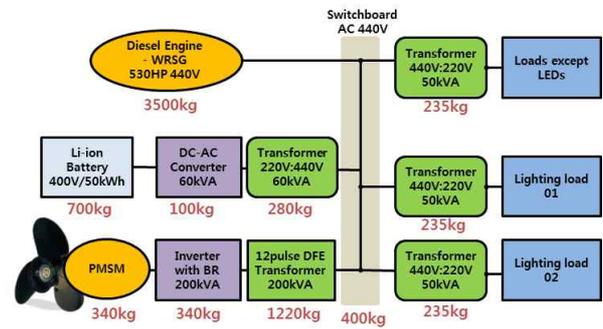
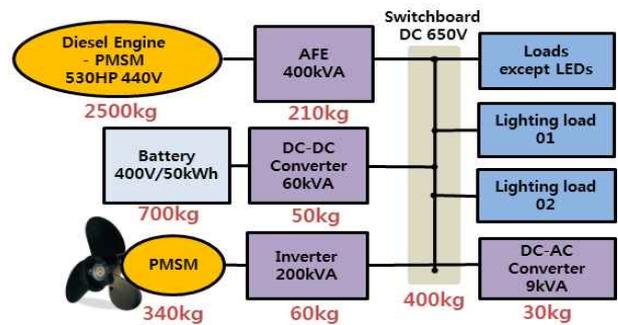


Fig. 2. Estimated load profile of a general 10t fishing boat.



(a) AC distribution IPS with DFE



(b) DC distribution IPS

Fig. 3. Comparison of weight of electrical equipment.

3. 전기 추진 선박: AC 배전 vs DC 배전

3.1 무게 비교

10톤급 연안 어선을 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박으로 설계할 때 설치될 것으로 예상되는 전력 설비와 그 무게를 그림 3과 표 3에 나타내

TABLE III
WEIGHT OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF AC AND DC DISTRIBUTION IPS BOATS

Item	AC IPS weight (kg)		DC IPS weight (kg)
	DFE case	AFE case	
Engine-Generator	3500	3500	2710
Transformers	705	705	0
Switchboard	400	400	400
Battery (50kWh/50kW)	700	700	700
Battery-connected converter and transformer	380	380	50
Propulsion motor (160kW)	340	340	340
Inverter and transformer (160kW)	1220	160	60
Inverter for AC loads (9kW)	0	0	30
Total	7245	6185	4290

었다. AC 배전 전기 추진 선박은 추진 부하 측 AC-DC 전력변환장치의 종류에 따라 DFE(Diode Front-End)와 AFE(Active Front-End) 방식으로 나뉜다.

그림 3 (a)의 DFE AC 배전 전기 추진 선박의 엔진발전기로는 530HP, 1800r/min 정격의 권선형 동기발전기(WRSG, Wound Rotor Synchronous Generator)인 두산인프라코어(주)의 4AD158TI 가 적용되었다. 엔진발전기의 속도는 전자식 조속기(governor)에 의해 1800r/min으로 정속 제어되며, 출력 전압은 AVR(Automatic Voltage Regulator)에 의해 440V로 제어된다. 각 부하단에는 전압을 220V로 강압하기 위한 변압기가 설치되며, 추진 부하 측의 AC-DC 전력변환부에는 12펄스 다이오드와 변압기가 설치된다. AFE AC 배전 전기 추진 선박은 그림 3 (a)에서 12펄스 DFE가 AC-DC 컨버터와 필터로 교체된 시스템이다.

그림 3 (b)의 DC 배전 전기 추진 선박의 경우, 엔진발전기는 4AD158TI에서 권선형 동기발전기를 영구자석형 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)로 교체한 모델이 적용되었다. DC 배전 시스템에서는 엔진의 속도와 발전기의 출력 전압이 자유롭게 변동될 수 있으므로 영구자석형 동기발전기가 적용될 수 있다. 동기발전기와 배전반 사이에는 AC-DC 컨버터인 AFE가 설치된다. 그리고 부하단에 변압기가 없고 추진 전동기 측에 필터와 AC-DC 전력변환장치가 없으며, 인버터 직류단에 제동 저항(BR, Braking Resistor)이 설치될 필요가 없다.

표 3에 나타난 것과 같이 DC 배전 전기 추진 선박의 전력설비 무게는 DFE AC 배전 전기 추진 선박보다 2955kg(40.5%) 가량 가벼울 것으로 예상되고, AFE AC 배전 전기 추진 선박보다는 1895kg(30.6%) 가량 가벼울 것으로 예상된다. 이 비교에서 전력 케이블의 무게 비교는 빠졌으나, 440V 역을 0.8pf. 3상 3선 AC배전 케이블

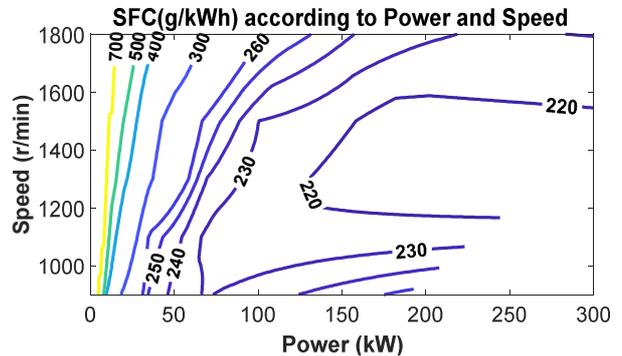


Fig. 4. Measured SFC map of 4AD158TI.

을 650V DC배전 케이블로 교체하면 단순히 실효치 전류만을 비교하였을 때 대략 23%의 케이블 무게 저감이 예상된다. 본 연구에서 얻은 30~40%의 전력 설비 무게 저감이라는 결과는 (주)ABB가 처음 실증했던 DC 배전 전기 추진 선박인 5000톤급 해양작업지원선 DinaStar의 경우와 유사하다. DinaStar는 주로 변압기를 제거하는 효과를 통하여 115.5톤의 전력설비를 85.3톤(-26.1%)으로 줄였다^[8].

3.2 연료 소모량 비교

AC 배전의 경우 엔진발전기는 정격 주파수를 유지하기 위하여 출력과 관계없이 1800r/min 정속으로 운전된다. 하지만 DC 배전에서는 AFE가 직류단 전압을 제어해주기 때문에 엔진발전기의 속도는 정격 속도로 고정될 필요가 없다. 즉 엔진의 가변속 운전이 가능하다. 따라서 DC 배전의 경우, 엔진의 연비지도로부터 최적 운전점들을 구하여 그 점들을 따라 엔진발전기를 운전시켜 연료 소모량을 절감할 수 있다.

3.2.1 연비지도(SFC map) 추출과 최적 운전점 설계

두산인프라코어(주)의 4AD158TI를 여러 운전점에서

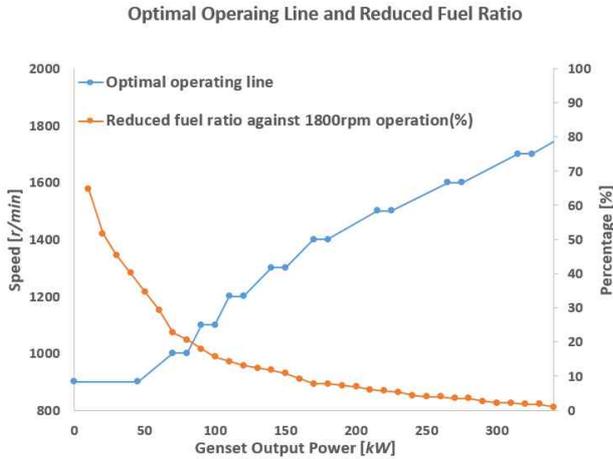


Fig. 5. Reduced fuel consumption ratio of the variable speed drive against the constant speed drive (4AD158TI).

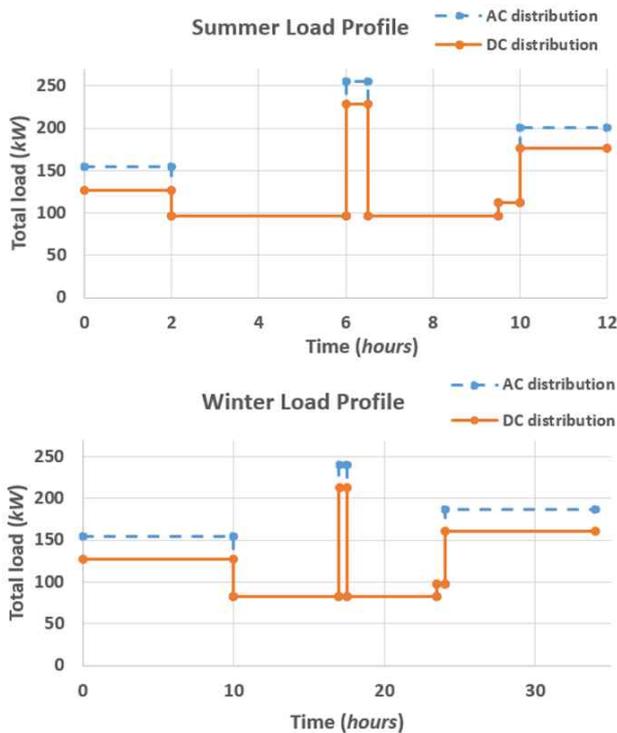


Fig. 6. Modified load profile of AC and DC IPS boats.

TABLE IV
PROPULSION LOAD AT 10KTS
ACCORDING TO SYSTEM KINDS

Case	EHP (HP)	BHP (HP)
AC boat carrying full load of fish	93	182
DC boat carrying full load of fish	78	154
AC boat carrying no load of fish	84	164
DC boat carrying no load of fish	68	133

동작시켜 얻은 연비지도는 그림 4와 같다. 공회전 속도 900r/min에서 정격속도 1800r/min까지 5개의 속도에서 연비를 측정하였으며, 각 속도별로 무부하에서 발전기의 정격 토크까지 8개의 지점에서 연비를 측정하였다. 40개의 데이터를 기반으로 내삽·외삽하여 그림 4의 연비지도를 완성하였다.

그림 5는 연비지도를 기준으로 얻은 최적 운전점의 집합과 정속 운전(1800r/min) 대비 최적 운전점을 따르는 가변속 운전의 연료절감율을 나타낸다. 엔진 가변속 운전을 적용하였을 때 10kW에서 약 65%, 50kW에서 약 35%, 100kW에서 16%, 200kW에서 약 7%, 300kW에서 약 2%의 연료 절감 효과를 얻을 수 있다. 가변속 운전을 통한 연료절감율은 경부하일수록 더 크게 나타나기 때문에, 경부하 운전이 잦은 선박일수록 연료 절감 효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

한 편, 엔진이 정격 속도보다 낮은 속도에서 운전되면 급격한 부하 상승이 발생했을 때 엔진이 꺼질 위험이 있다. 이는 저속에서 엔진의 순시 최대 출력이 줄어들기 때문이다. 이러한 문제를 해결하는 방법은 크게 세 가지로 나누어진다. 첫째는 ESS를 활용하는 방법으로 ESS가 부하 상승분만큼의 전력을 짧은 시간동안 엔진 대신 출력하고 그동안 엔진이 가속하여 순시 최대 출력을 확보하게 된다. 두번째는 엔진의 가변속 운전 범위를 정속의 80~100% 수준으로 제한하여 엔진이 언제나 충분한 출력을 낼 수 있도록 운전하는 방법인데, 이 방법은 엔진의 최적 효율 운전을 부분적으로 포기할 수밖에 없다는 문제점을 가지고 있다. 마지막으로 대상 어선과 같이 조명등, 추진 부하, 항해 장비 등의 모든 부하가 제어 가능한 시스템에서는 부하를 예측하거나 제어할 수 있으므로 부하가 급격하게 상승하는 현상을 사전에 차단하여 이러한 불안정성 문제를 피할 수 있다.

3.2.2 부하 프로파일 보정

3.1에서 살펴본 바와 같이 DC 배전 전기 추진 선박은 AC 배전 전기 추진 선박보다 2~3톤가량 가볍다. 이 때문에 두 선박은 같은 속도로 항해하더라도 선체저항과 추진 부하가 서로 다르다. 그림 3의 두 선박에 대하여 ITTC 1957의 2차원 저항해석법을 적용하여 선체저항을 계산하면 10kts에서 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박의 공선·만선시의 유효마력(EHP, Effective Horse Power)과 제동마력(BHP, Brake Horse Power)은 표 4와 같이 나타난다. 제동마력(BHP)은 계산된 유효마력(EHP)에서 프로펠러 효율 60%와 해상 여유(sea margin) 15%를 가정하여 구한 값으로 추진 전동기의 출력을 의미한다. 결과적으로 전력 설비 무게 감소로 인한 DC 배전 전기 추진 선박의 추진 부하 감소율은 15~19%이다.

표 4를 바탕으로 부하 프로파일을 보정한 결과는 그림 6과 같다. 출항은 공선 추진 부하를 적용하였고, 귀

항은 만선 추진 부하, 조업 중 이동은 공선과 만선의 평균 추진 부하를 적용하였다.

3.2.3 총 연료 소모량 계산

3.2.1에서 구한 연비지도와 최적 운전점, 그리고 3.2.2에서 구한 부하 프로파일을 종합하면 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박의 연료 소모량을 계산할 수 있다. 여름철 AC 배전 선박의 연료 소모량은 364kg, DC 배전 선박의 연료 소모량은 297kg(-18.4%)으로 나타났고, 겨울철 AC 배전 선박의 연료 소모량은 1030kg, DC 배전 선박의 연료 소모량은 796kg(-22.7%)로 나타났다.

표 2의 Boat D의 경우처럼 여름철 3~8월의 6개월 동안 매월 20회 조업, 겨울철 11~2월의 4개월 동안 매월 8회 조업을 한다면 AC 배전 선박의 연간 연료 소모량은 76657kg, DC 배전 선박의 연간 연료 소모량은 61114kg(-20.3%)으로 계산된다. 어업용 면세유 가격 625원/L(한국석유공사, 2017.7.24.)와 경유 밀도 0.832kg/L를 고려하면, AC 배전 전기 추진 선박을 DC 배전 전기 추진 선박으로 교체함으로써 연간 약 1170만 원의 연료비를 절감할 수 있다.

위 계산에서 추가적으로 고려해야할 요소들이 있다. 먼저 DC 배전 전기 추진 선박은 영구자석 발전기의 높은 효율로 인하여 최소 1.5% 정도 더 높은 발전기 효율을 예상할 수 있다. 또 변압기 제거로 인해 0.5~1%의 변압기손실이 줄어들고, DC 배전으로 인하여 LED 조명 등 부하단의 전력변환 효율이 수 % 이상 개선 될 수 있다^{[9]-[10]}. 이러한 점들을 고려하면 위의 계산 결과에서 최소 5% 이상의 추가적인 효율 개선이 가능하리라 예상되므로 연간 연료비 절감액은 1400만 원 이상이 될 것으로 추산된다.

4. 결 론

본 논문에서는 10톤급 연안어선의 부하 리스트와 부하 프로파일을 조사하여 이를 바탕으로 AC 배전 전기 추진 선박과 DC 배전 전기 추진 선박의 전력 시스템을 설계하였다. 또 기성 전장품의 무게를 바탕으로 DC 배전 전기 추진 선박의 전장품 무게가 AC 배전 전기 추진 선박의 전장품 무게보다 31~41% 가볍다는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 선체저항을 계산하여 부하 프로파일을 보정하였다. 측정된 엔진의 연비지도와 보정된 부하 프로파일을 바탕으로 계산한 결과, DC 배전 전기 추진 선박이 AC 배전 전기 추진 선박보다 연간 20~25% 더 적은 연료를 사용할 것으로 예상하였다.

본 연구는 2016년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구(No. 20141010502280)입니다.

References

- [1] D. Thomas, *Diesel first edition*, University of Alabama Press, pp. 207, 1987.
- [2] ICMES Technical Committee B, "Electric propulsion state-of-the-art and trends in electric power generation, distribution, and propulsion, and their associated control systems," in *ICMES/SNAME New York Metropolitan Section Symp.*, 2000.
- [3] N. Doerry, J. Amy, and C. Krolick, "History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the U.S. navy," *Proc. IEEE*, Vol. 103, No. 12, pp. 2243 - 2251, Dec. 2015.
- [4] H. Pestanam, "Future trends of electrical propulsion and implications to ship design," in *Proc. Martech*, 2014.
- [5] Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Next-generation shipboard DC power system: introduction smart grid and dc microgrid technologies into maritime electrical networks," in *IEEE Electrification Magazine*, Vol. 4, No. 2, pp. 45-57, June 2016.
- [6] Y. I. An, "Fishing efficiency of high capacity (360W) LED fishing lamp for squid *Todarodes pacificus*," *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 50, No. 3, pp. 326-333, 2014.
- [7] Y. I. An, "Fishing efficiency of LED fishing lamp for squid jigging vessels," *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 49, No. 4, pp. 385-394, 2013.
- [8] <http://new.abb.com/marine/marine/systems-and-solutions/power-generation-and-distribution/onboard-dc-grid>
- [9] H. Kakigano, M. Nomura, and T. Ise, "Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system," in *International Power Electronics Conference-ECCE ASIA*, 2010.
- [10] A. Pratt, P. Kumar, and T. V. Aldridge, "Evaluation of 400V DC distribution in telco and data centers to improve energy efficiency," in *Proc. Int. Telecommun. Energy Conf.*, 2007.



손영광(孫榮光)

1991년 11월 2일생. 2014년 서울대 공대 전기·정보공학부 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기·정보공학부 석·박사과정.



최세화(崔世和)

1989년 1월 7일생. 2011년 서울대 공대 전기·정보공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전기·정보공학부 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기·정보공학부 박사과정.



이승용(李丞庸)

1982년 7월 18일생. 2008년 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2010년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업(석사). 2010년~현재 현대일렉트릭(구 현대중공업) 전기전자시스템 R&D센터 선임연구원. 2017년~현재 서울대 전기·정보공학부 박사과정.



김소연(金素蓮)

1980년 3월 7일생. 2003년 해군사관학교 전기공학과 졸업. 2007년 서울대 전기공학부 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 2014년~현재 해군사관학교 전기전자공학과 조교수(해군소령).



설승기(薛承基)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1986년~1988년 University of Wisconsin, Madison 연구원. 1988년~1990년 LG산전 책임연구원. 2003년~2004년 일본 Yaskawa Electric Corp. 상임연구고문. 1991년~현재 서울대 전기·정보공학부 교수. 2005년~2007년 서울대 공대 부학장. 2008년~2011년 기초전력연구원 원장. 2011년 ICPE'11 General Chairman. 2012년~2014년 당 학회 JPE Editor-in-Chief. 당 학회 명예회장.