

IT 기반의 선박에너지절감시스템 성능평가 방법-(1) : 육상시험 수행 결과

† 유윤자

† 한국해양대학교 해상교통안전진단연구센터

Energy Efficiency Evaluation of IT based Ship Energy Saving System-(1) : Ship Handling Simulator Test Results

† Yun-Ja Yoo

† Maritime Safety Audit Research Center, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 선박온실가스 규제를 위한 SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) 기술 중 선박에너지절감을 위한 조치는 하드웨어적인 장비를 선박에 탑재하여 구현하거나, 인적교육 및 운항패턴 개선 등과 같은 소프트웨어적인 방식으로 구현 가능하다. 선체저항개선을 위한 기술 중 하드웨어적인 장비 개조를 통해 구현되는 기술은 현존선에 적용하는데 장비의 규모 등에 의한 제약이 발생한다. 반면 소프트웨어적인 에너지절감기술의 구현은 저렴한 도입비용과 하드웨어적인 방식에 비해 높은 에너지 절감효과를 보이며, 선종에 크게 구애받지 않고 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있어 IT 기술을 이용한 선박에너지절감기술이 요구되어지고 있다. 본 논문에서는 IT 기반의 선박에너지절감 기술을 검증하기 위하여 대표적인 3개 선종에 대한 실선 모델링 기반의 선박조종시뮬레이터를 이용한 육상시험을 수행하였다. 시뮬레이터를 이용한 성능검증 방법은 6개의 다양한 환경조건에서 에너지절감기술 적용 전후의 운항결과로부터 에너지절감효과를 비교·분석하고, 해상상태에 따른 구간별 비교결과를 통해 IT기반 에너지절감시스템의 성능평가를 수행하였다. 벌크, 컨테이너, VLCC 선종을 이용한 육상시험 결과 컨테이너선의 연료절감률이 가장 크게 나타났고, 육상시험 대상선박 모두 선박에너지절감시스템 사용전과 비교하여 연료절감효과를 보였다.

핵심용어 : 선박에너지절감계획, 선박에너지절감시스템, 에너지절감효과, 성능평가, 선박조종시뮬레이터

Abstract : SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) guidelines for a ship's GHG reduction include a machinery modification of hull, an installation of energy efficiency enhanced attachment in hardware methods. It is also possible to bring a ship energy efficiency improvement by fuel-efficient operations or in other software methods. Hardware modification or installation on ship can bring financial burdens to a ship company compared to its improvement expectation. On the other hand, Software based energy-saving technology can be applicable on various ship types, and it is also expected high efficiency of ship energy use compared to hardware based technology in perspective of the investment costs and efficiency. In this paper, it is described that the ship handling simulator based evaluation was carried out using representative ship model of bulk, container and VLCC. Simulation environments were separated into 6 conditions according to the sea-state and weather condition, and the operation results were compared with those before and after energy saving system applied. The container ship showed the largest FOC save rate after energy saving system applied although the others also showed energy save rate after using the system.

Key words : SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan), ship energy saving system, energy saving efficiency, performance evaluation, ship handling simulator

1. 서론

선박온실가스배출 규제를 위해 2005년 교토의정서 발효이후 해상운송에서의 온실가스 배출 절감을 위한 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 노력이 이어지

고 있다. 이와 관련하여 IMO는 MARPOL협약을 개정하여 선박의 온실가스 저감에 대한 기준을 강제하는 상황이다. 최근 들어 발효된 선박온실가스 규제를 위한 대표적인 국제규정은 현존선의 선박운항효율에 초점을 맞춘 선박에너지효율관리계획 (SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)이

† Corresponding author : 연희원, yjyoo@kmou.ac.kr 051)410-5097

있다(IMO, 2013). 선박온실가스 규제를 위한 SEEMP 기술 중 선박 에너지절감을 위한 조치는 하드웨어적인 장비를 선박에 탑재하여 구현하거나, 항로최적화 및 선속최적화 등의 운항패턴 개선을 통한 소프트웨어적인 방식으로 구현 가능하다(Ballou, 2008; Pyorre, 2012). 선체저항 향상을 위한 선박개조 등의 하드웨어적인 기술구현은 신조 선박에는 도입이 용이하지만 현존선에 적용하기에는 장비의 규모 등에 의한 제약이 발생할 수 있다(IMO, 2013). 반면 소프트웨어적인 에너지절감 기술의 구현은 선종에 크게 구애받지 않고 현존선에 적용이 용이하다는 장점을 가지고 있어 IT기술을 이용한 선박 에너지절감기술이 요구되어지고 있다. IMO에서는 SEEMP 가이드라인에서 제시한 수단들이 어느 정도 효과를 가지는지 연구를 수행하였고, 그 결과를 MEPC 63/INF.2 문서에 보였다(IMO, 2011). 결과에 따르면 대표적인 10개의 에너지절감수단에 대한 효과평가를 실시하고 총 10개의 서로 다른 선종에 적용한 결과를 보였다. SEEMP 가이드라인에서 제시한 절감수단 중 가장 큰 절감효과를 보인 것은 선속과 관련된 부분이었다. 본 논문에서는 IT기반의 선속최적화 기술에 대한 에너지절감효과를 분석하고 소프트웨어적인 에너지절감시스템의 성능검증 수행 및 그 결과를 보인다.

2. 성능시험 절차

선박에너지절감시스템의 에너지절감기술 검증을 위한 성능시험은 크게 도면검토, 해상시험, 육상시험으로 나누어 수행한다. 도면검토는 시스템의 설계검증을 위한 필요자료 즉, 제품 사양서, SW기능/모듈 명세서, 입출력 명세서, DB명세서 등의 자료를 통해 시행한다. 해상시험은 실선에 에너지 절감기술 적용후 운항데이터와 적용전 기존데이터를 일정기간 수집한 후 각각 에너지 사용량의 경향을 산출하고 평균적인 연료소모량(FOC, Fuel Oil Consumption)의 비교·분석을 통하여 절감효과를 검증한다. 육상시험은 연료소모량 산출 기능을 제공하는 선박모델을 이용하여 선박조종시물레이터를 이용하여 에너지절감기술 적용 전후의 결과를 비교·분석하고, 기준 이상의 연료소모량 절감효과가 있는지 검증한다. 성능시험은 1) 개발업체 자료제출 2) 검증기관 도면심사 3) 실선 장비설치 4) 실선/시물레이터 성능검증의 절차를 따라 수행한다.

연료절감을 위해 개발되는 시스템의 성능검증 수행을 위해 해상에서의 실선시험은 선박에너지절감시스템의 효율검증에 효과적이지만, 모든 해역에서 모든 선박에 대한 다양한 환경조건을 설정하여 절감효율을 산출하기에는 현실적인 제약이 따른다. 따라서 본 논문에서는 실선을 기초로 모델링한 선박조종시물레이터를 이용하여 통상 운항선박의 항해 시 해상조건을 설정하여 선박에너지절감시스템의 성능평가를 수행한다.

운항선박은 통상 엔진 회전수를 고정하여 운항하게 되며, 도착예정시간(ETA, Estimated Time of Arrival)에 맞추어



Fig. 1 Energy efficiency evaluation procedures of ship energy-saving system

목적지에 도착할 수 있도록 최적의 분당회전수(RPM, Revolution Per Minute)를 도출해야 한다. 선박에너지절감시스템에서 권고하는 RPM은 구간별 해상상황에 따른 선속 변화량을 고려하여 RPM 변화에 따른 속력저하 및 FOC 절감율이 가장 경제적인 RPM을 구간별로 다르게 권고한다. 단, 이때 총 항해시간은 $ETA \pm 5\%$ 가 되도록 RPM을 권고하게 된다. 선박에너지절감시스템의 구간별 최적 RPM 권고를 위한 최적화 문제는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\min \sum_{i=1}^N P_i(n) \delta t_i = \sum_{i=1}^N 2\pi \rho D^5 n^3 K_Q(n) \delta t_i \quad (1)$$

$$(\sum_{i=1}^N \delta t_i \leq E_{TA})$$

여기서 P_i 는 i 번째 구간에서 소모되는 선박의 동력으로 과거 운항선박의 항차데이터 경험식으로부터 구해지고, δt_i 는 i 번째 구간에서 소요되는 시간, ρ 는 해수밀도, D 는 프로펠러 직경, n 은 프로펠러 회전수, K_Q 는 토크계수, E_{TA} 는 도착예정시간을 나타낸다.

선박이 항해 시 선속 감소에 영향을 주는 부가저항 성분은 바람에 의한 부가저항, 파랑에 의한 부가저항, 타각에 의한 영향, 표류각에 의한 영향, 수온과 염도에 의한 영향, 배수량에 의한 영향, 천수효과, 선체 및 프로펠러 거칠기에 의한 영향 등이 있다(ISO15016, 2002).

본 논문에서는 선박이 통상 대양항해를 한다는 가정 하에 선박 운항 시 선속 감소에 주요한 영향을 주는 바람, 파랑 조건에 따라 선박에너지절감시스템 권고 RPM 적용 전후의 연료사용량에 대한 평가를 선박조종시물레이터를 사용하여 수행하였다. 일반적인 선박의 대양항해에서는 통상 급선회를 하지 않는다고 가정하였으며, 선박조종시물레이터에서 설정한 바람, 파랑 조건에 의한 부가저항은 선체에 작용하는 부하로 환산될 수 있다. 이는 또한 선속감소에 주요한 영향을 미치는 요소이다. 선박조종시물레이터에서 사용된 바람에 의한 부가저항 모델식은 다음과 같다(Fujiwara, 2009; Transas, 2009).

$$F_{XA} = C_{XA}(\theta_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_T \quad (2)$$

$$F_{YA} = C_{YA}(\theta_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L \quad (3)$$

$$M_{ZA} = C_{ZA}(\theta_R) \frac{\rho_A V_{RW}^2}{2} A_L \quad (4)$$

여기서 $F_{XA, YA}$ 는 선박 전후·좌우방향 풍압력, M_{ZA} 는 바람에 의한 z축 주변 모멘트, $C_{XA, YA, ZA}$ 는 선박 전후·좌우방향 풍압력 계수 및 z축 주변 풍압력 모멘트 계수, θ_R 은 상대 풍향, ρ_A 는 공기밀도, V_{RW} 는 상대풍속, A_T, A_L 은 각각 선체수선상부 정면·측면 투영면적을 나타낸다. 선박조종시물레이터에서 사용된 파랑중 부가저항 모델식은 1,2차 파강제력으로 구분되며 다음과 같이 표현된다(Transas, 2003; Transas, 2009).

$$F_{XW, YW} = F_{XW1, YW1}(t) + F_{XW2, YW2} \quad (5)$$

$$M_{ZW} = M_{ZW1}(t) + M_{ZW2} \quad (6)$$

$$F_{XW1, YW1} = -m \sum_{i=1}^n \kappa_{XW, YW}(\lambda_i, \xi_i) \cdot \gamma_i(t) \quad (7)$$

$$M_{ZW1} = -gJ_Z \cdot \sum_{i=1}^N \kappa_{ZW}(\lambda_i, \xi_i) \cdot \zeta_i(t) k_i^2 \quad (8)$$

$$F_{XW2} = I_{XW}(\xi, H_{1/3}) \rho g L H_{1/3}^2 + \Delta X(\zeta, H_{1/3}, V) \quad (9)$$

$$F_{YW2} = I_{YW}(\xi, H_{1/3}) \rho g L H_{1/3}^2 \quad (10)$$

$$M_{ZW2} = I_{ZW}(\xi, H_{1/3}) \rho g L^2 H_{1/3}^2 \quad (11)$$

여기서 $F_{XW, YW}$ 는 파랑에 의한 선박 전후·좌우방향 부가저항, M_{ZW} 는 파랑에 의한 z축 주변 모멘트, m 은 선박질량, $\kappa_{XW, YW, ZW}(\lambda_i, \xi_i)$ 는 무차원화 감소계수로 i -성분파의 파장 λ_i 과 선체길이 L 의 비 및 흘수에 관계되는 함수, ξ_i 는 i -성분파 입사각, $\gamma_i(t)$ 는 i -성분파의 시간 t 에서의 파면 경사, g 는 중력가속도, J_Z 는 z축 주변 모멘트, $\zeta_i(t)$ 는 i -성분파의 시간 t 에서의 파면, k_i 는 i -성분파의 파수, $I_{XW, YW, ZW}$ 는 선박규모에 대한 무차원화 계수, $H_{1/3}$ 은 유의파고, V 는 선속, $\Delta X(\zeta, H_{1/3}, V)$ 는 황파에 의한 부가저항을 나타낸다.

대양 항해시 조류의 속도는 선박에 대한 상대속도로 작용하여 선속에 직접적으로 영향을 미친다(Park, 2014). 조류 조건을 바람, 파랑과 같이 고려하였을 경우 조류에 의한 선속변화가 바람 및 파랑에 의한 선속 감소에 비교하여 지배적으로 영향을 미치기 때문에 바람, 파랑에 의한 선속 감소를 구분하여 평가하기가 어려웠다. 따라서 금번 연구에서는 선박조종시물레이터를 이용한 성능검증 수행 시 바람, 파랑 환경에 따른 에너지절감시스템 연료절감효과를 평가하기 위하여 조류 조건은 고려하지 않았다.

SEEMP는 선박의 경제운항 지표 및 선박의 온실가스 배출량 지표로서 선박에서 배출되는 CO₂ 배출량을 나타내는 EEOI (Ship Energy Efficiency Operation Indicator)의 자발적인 사용을 권고하고 있다. 온실가스 배출 저감을 위한 EEOI는 항차별 배출되는 CO₂ 배출량으로 정의되며 다음 식으로 표현되어진다(IMO, 2009).

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{cargo} \times D} \quad [\text{ton} \cdot \text{NM}] \quad (12)$$

여기서, j 는 연료유 종류, i 는 항차번호, FC_{ij} 는 i 번째 항차에서의 연료유 j 의 소모량 [ton], C_{Fj} 는 연료유 j 의 CO₂ 환산인자, m_{cargo} 는 총톤수 [ton], D 는 항해거리 [NM]를 나타낸다. C_{Fj} 는 측정된 연료소모량에 대해 탄소함유량에 근거한 CO₂ 배출량 [g]의 무차원화된 환산인자를 나타낸다. 본 연구에서 EEOI는 에너지절감시스템 사용으로 인한 연료절감율과 더불어 선박조종시물레이터를 이용한 에너지절감시스템 사용 전후의 검증방안 지표 중 하나로 사용되었다.

3. 시뮬레이터를 이용한 성능검증

에너지절감시스템 성능검증을 위해 사용한 선박조종시물레이터는 해상환경 조건의 변화에 따른 외력이 선속에 반영되어 시스템 적용전의 운항결과와 시스템 적용후의 운항결과를 비교·분석하고 에너지 절감효과를 산출하여 시스템 효율 검증을 수행한다(Transas, 2009).

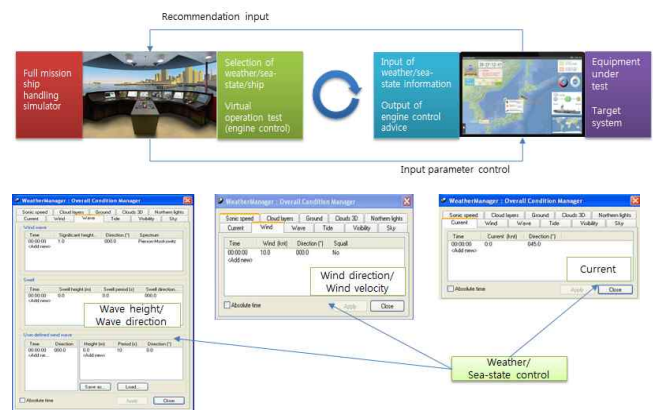


Fig. 2 Ship handling simulator test configuration

3.1 시나리오 설계

시뮬레이터를 이용한 에너지절감시스템의 성능검증은 2013년 Port-MIS 부산항 입출항 선박 데이터를 기반으로 하여 가장 많은 입항 척수를 나타낸 벌크, 컨테이너, VLCC의 3가지

선종에 대해서 수행했다(Port-MIS, 2013). 각 모델선은 한국 부산항을 출항하여 필리핀 다바오항으로 입항하는 총 6개의 구간을 각기 다른 해상환경 조건으로 항해하도록 설정하였으며, 각 구간의 거리는 300해리로 설정하여 1항차가 1800해리를 항해하는 10배속 시나리오로 수행하였다. 선박에너지절감시스템 적용후 선속은 시스템 적용전 ETA ±5% 이내로 도착할 수 있는 최적 RPM으로 권고하였다. 선박에너지절감시스템 적용전 항해조건은 황천항해를 제외한 통상 항해 상황으로 6개의 환경조건에서 최대연속격출력 (MCR, Maximum Continuous Revolution)의 75%로 동일하게 항해하는 시나리오이다. 선박에너지절감시스템 적용후 항해조건은 6개 구간별 환경조건 변화에 따라 선속 변화량을 고려하여 RPM 조종에 따른 속력저하 및 FOC 절감율이 가장 경제적인 권고 RPM으로 항해하고 두 결과의 연료소모량을 비교·분석 하였다.

1, 3, 5구간은 BF (Beaufort Scale) 3의 해상상태를 적용하고, 2, 4, 6구간은 BF 6의 해상상태를 적용하여 시스템 적용 전후의 운항결과를 비교·분석 하였다. 해상환경 파라미터는 선속 감소에 주요한 영향을 미치는 바람, 파랑정보를 적용하였고, 선속감소요인으로 작용하는 선수파, 선수사파, 횡파에 대해서만 고려하였다. 바람 및 파랑의 진행방향은 1, 2구간에서 선수파를 적용하고 3, 4구간에서 선수사파 5, 6구간에서 횡파를 적용하였다. 실험에 사용된 모델선박의 제원은 Table 1 과 같다.



Fig. 3 Sea-state scenario during simulation voyage

Table 1 Ship model specification

Description	Bulk	Container	VLCC
LOA [m]	320	366	332
Breadth [m]	53	48.2	58
Draft [m]	18.9	12.9	20.82
Displacement [ton]	274,000	150,486	321,260
Deadweight [ton]	210,000	105,188	279,400
Propeller type	Fixed	Fixed	Fixed
Shaft no.	1	1	1
Full speed [kt]	14.6	24.3	15.7
Shaft power [kW]	15,000	72,240	23,493

3.2 시뮬레이터 검증결과

선박조종시뮬레이터를 이용한 선박에너지절감시스템 적용 전후의 연료소모량 추정을 위해 모델선박의 선속, 엔진출력,

RPM에 따른 Table 2의 주기관 텔레그래프 표를 이용하였다.

Table 2 Engine telegraph table of model ships

Ship type	Engine order	Speed [knot]	Engine power [kW]	RPM
Bulk	Full Sea Ahead	14.6	14,418	64
	Full Ahead	10.9	6,224	48
	Half Ahead	9.5	4,235	42
	Slow Ahead	6.8	1,637	30
	Dead Slow Ahead	5.7	995	25
Cont-ainer	Full Sea Ahead	24.3	58,000	97
	Full Ahead	19.7	30,860	78
	Half Ahead	16.2	14,463	63
	Slow Ahead	11.3	6,863	47
	Dead Slow Ahead	9	3,827	38
VLCC	Full Sea Ahead	15.7	22,200	78.2
	Full Ahead	14.5	17,724	72.2
	Half Ahead	12.8	12,121	63.8
	Slow Ahead	9	4,373	44.9
	Dead Slow Ahead	5.5	1,122	27.4

선박조종시뮬레이터에서 설정한 해상 환경조건에 따라 구간별 선속 감소를 산출하기 위해 선박에너지절감시스템 적용 전후의 RPM 설정값으로부터 환산한 선속 V_{set} , 시뮬레이션 항해를 수행하여 얻어진 관측선속 V_{obs} 의 차이로부터 선속 감소량 V_{drop} 을 추정하고 주기관 엔진텔레그래프 표로부터 V_{drop} 에 대한 엔진 출력을 환산하였다. 연료소모량 계산을 위한 촉마력은 제동마력의 1% 마찰손실로 추정하여 FOC를 산출하였다(MAN Diesel and Turbo, 2012).

$$V_{drop} = V_{set} - V_{obs} = P_{add_load} \quad (13)$$

$$P_{load} = P_{set_load} + P_{add_load} \quad (14)$$

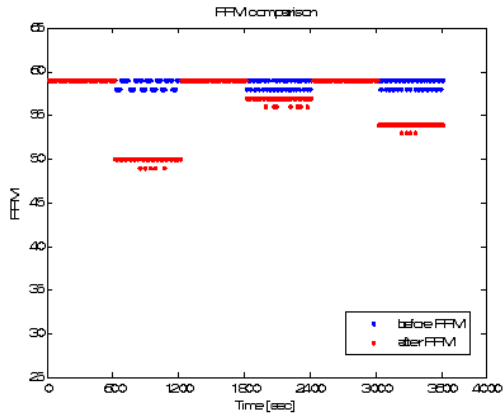
$$FOC = \frac{FOCR \times P_{load} \times 24h}{1,000} \quad [\text{kg/kWh}] \quad (15)$$

여기서 P_{add_load} 는 해상 환경조건에 따른 선속 감소량으로부터 환산한 부하, P_{set_load} 는 RPM 설정값으로부터 환산한 부하, P_{load} 는 P_{set_load} 와 P_{add_load} 합으로 이루어진 전체 부하, FOC 는 1일 동안의 연료소모량, $FOCR$ 은 연료소모율 (Fuel Oil Consumption Rate)을 나타낸다.

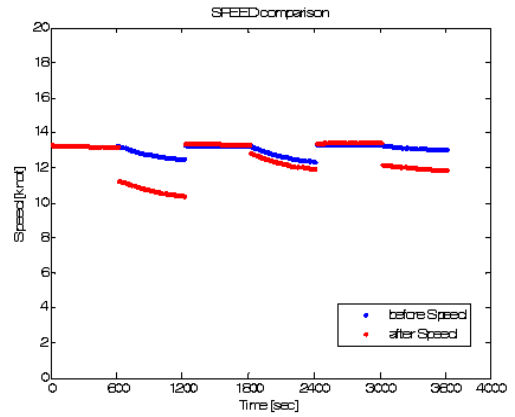
시스템 적용 전후의 선종별 선박조종시뮬레이터 운항결과를 Fig.4, Fig.5에 나타낸다. 시스템 적용 전후의 선종별 RPM 변화 및 선속 변화는 세 선박 모두 BF 3의 해상상태를 적용한 1, 3, 5구간에서는 선속 및 RPM 변화가 작지만, BF 6구간의 해상상태를 적용한 2, 4, 6구간에서는 선속 및 RPM 변화가 비교적 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 시스템 적용

후의 선속 및 RPM 변화가 시스템 적용전과 비교하여 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 선속사파가 적용된 시나리오 4구간에서 선속 변화율이 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

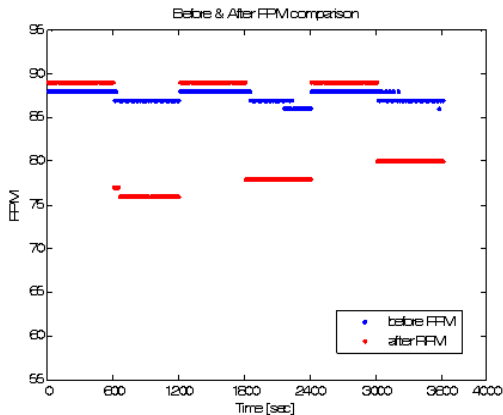
해상상태가 양호한 1, 3, 5구간의 선속 및 RPM은 벌크와 VLCC 선종의 경우 시스템 적용 전후 뚜렷한 차이가 보이지 않지만, 컨테이너선의 경우 해상상태가 양호한 구간에서 시스템 적용후에 전체적으로 더 높은 RPM으로 권고하였음을 알



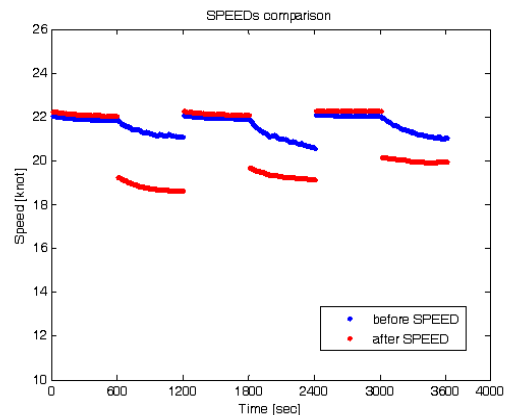
(a) RPM comparison results of Bulk



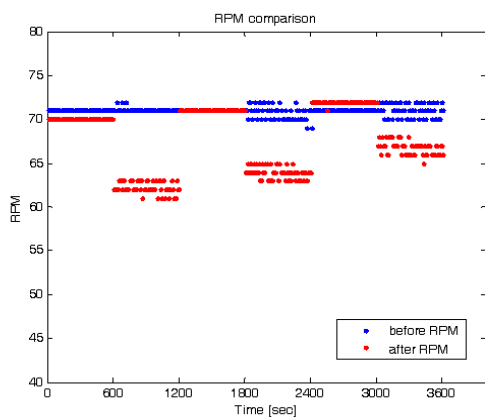
(a) Ship speed comparison results of Bulk



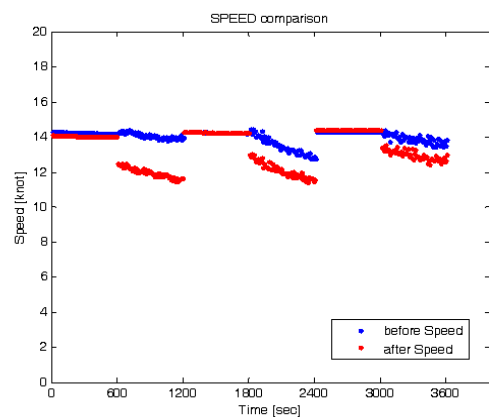
(b) RPM comparison results of Container



(b) Ship speed comparison results of Container



(c) RPM comparison results of VLCC



(c) Ship speed comparison results of VLCC

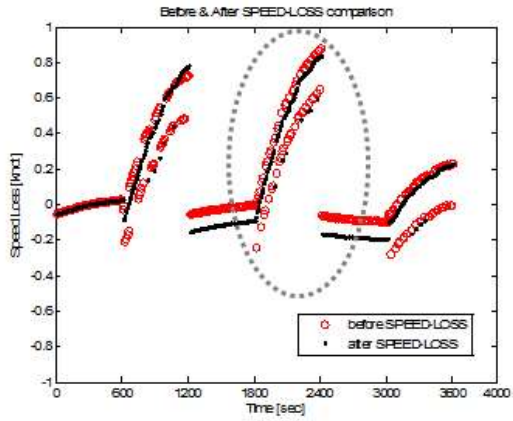
Fig. 4 RPM comparison results before and after energy-saving system applied

Fig. 5 Ship speed comparison results before and after energy-saving system applied

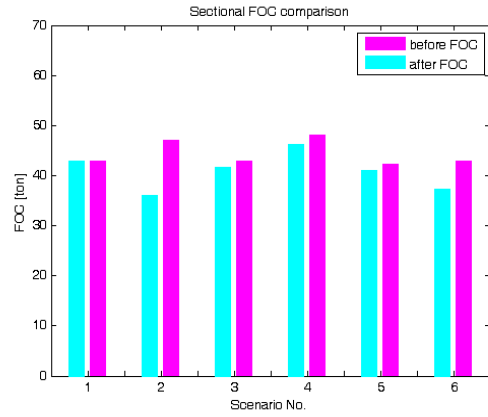
수 있다. 한편, 해상상태가 좋지 않은 2, 4, 6구간에서는 시스템 적용전에 비해 적용후 더 낮은 RPM으로 권고하였음을 알 수 있다.

시스템 적용 전후 구간별 선속 감소 및 FOC 결과를 Fig.6, Fig.7에 각각 나타냈다. BF 6 해상조건이 적용된 시나리오 2,

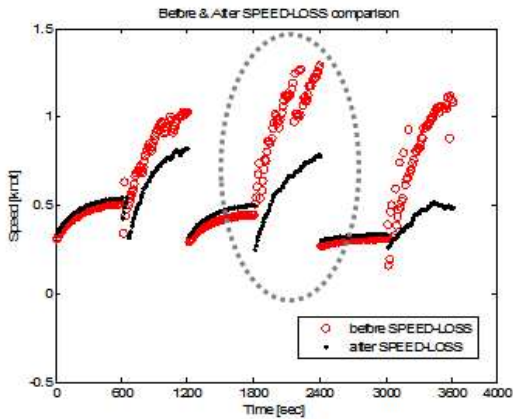
4, 6 구간의 선속 감소량이 BF 3 해상조건 시나리오 1, 3, 6 구간에 비해 크고, 기상·해상 조건이 선수사파로 작용하는 시나리오 4 구간의 선속 감소율이 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig.7 결과로부터 시스템 적용전 구간별 FOC 결과는 선수사파가 적용된 4 구간에서 세 선박 모두 연료소모량



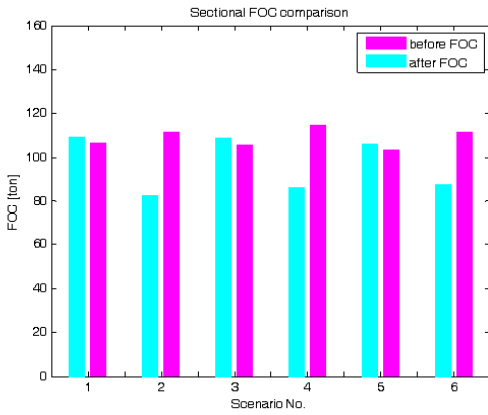
(a) Speed loss comparison results of Bulk



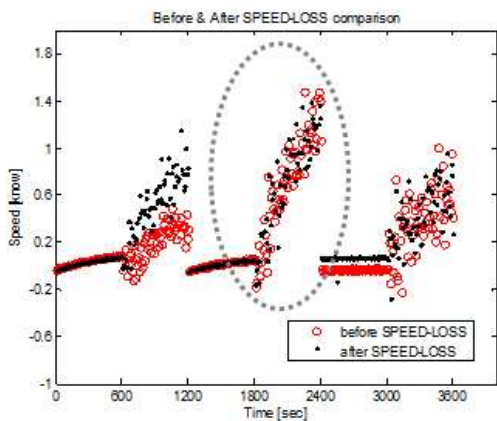
(a) Sectional FOC comparison results of Bulk



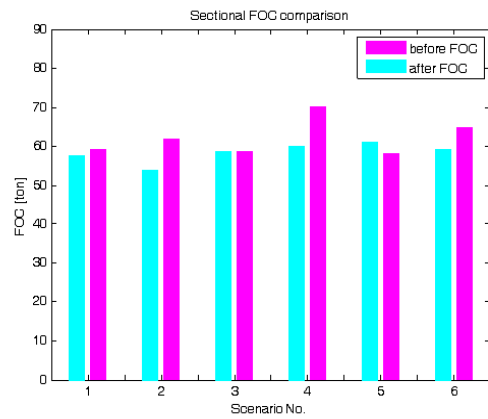
(b) Speed loss comparison results of Container



(b) Sectional FOC comparison results of Container



(c) Speed loss comparison results of VLCC



(c) Sectional FOC comparison results of VLCC

Fig. 6 Speed loss comparison results before and after energy-saving system applied

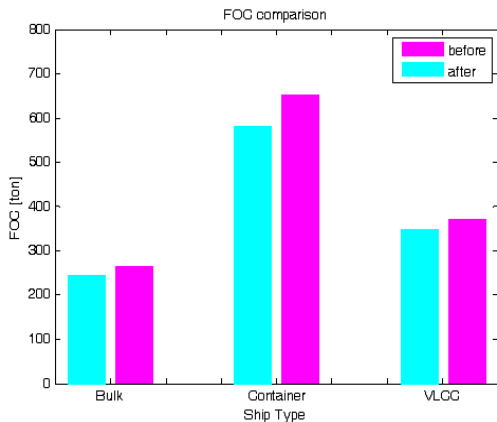
Fig. 7 Sectional FOC comparison results before and after energy-saving system applied

이 가장 높게 나타났다. 시스템 적용후 연료소모량 차이는 벌크선은 선수과가 적용된 2 구간에서 크게 나타났고, 컨테이너와 VLCC는 선수과와 선수사과가 적용된 2, 4 구간에서 크게 나타났다.

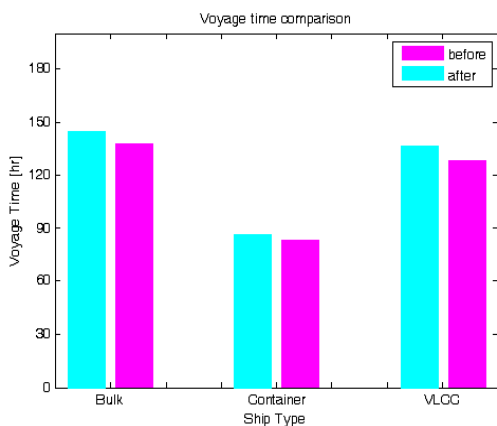
선박에너지절감시스템 적용 전후의 전체 연료소모량 및 항해시간 결과를 Fig.8에 나타냈다. 시스템 적용전 벌크, 컨테이너, VLCC의 선종별 연료소모량은 각각 266.6[ton], 653.1[ton], 373.1[ton]이 소모되었으며, 시스템 적용후 선종별 연료소모량은 각각 245.4[ton], 581.5[ton], 350.4[ton]으로 시스템 적용전과 비교하여 각각 -21.2[ton], -71.6[ton], -22.7[ton]의 연료절감을 나타냈다. 시스템 적용전 벌크, 컨테이너, VLCC의 선종별 전체 항해시간은 각각 137.7[hr], 83.3[hr], 128.4[hr]이며, 시스템 적용후 선종별 전체 항해시간은 각각 144.7[hr], 87[hr], 136.3[hr]로 시스템 적용후에 항해시간이 각각 +7[hr], +3.7[hr], +7.9[hr] 늘어났음을 알 수 있다.

Table 3 Overall results of simulator test

Description (before)	Bulk	Container	VLCC
Distance [NM]	1,800	1,800	1,800
Mean speed [kt]	13	21.6	14
Voyage time [hr]	137.7	83.3	128.4
FOC [ton]	266.6	653.1	373.1
EEOI InceX	2.2×10^{-6}	1.08×10^{-5}	2.31×10^{-6}
Description (after)	Bulk	Container	VLCC
Distance [NM]	1,800	1,800	1,800
Mean speed [kt]	12.5	20.8	13.3
Voyage time [hr]	144.7	87	136.3
FOC [ton]	245.4	581.5	350.4
EEOI InceX	2.05×10^{-6}	9.57×10^{-6}	2.17×10^{-6}
FOC saving rate [%]	8	11	6.1



(a) Overall FOC comparison results according to ship type



(b) Overall voyage time comparison results according to ship type

Fig. 8 Overall FOC and voyage time comparison results before and after energy-saving system applied

선박에너지절감시스템 적용 전후의 선종별 항차 종합결과를 Table 3에 나타냈다. 선박의 온실가스 배출량 지표를 나타내는 EEOI 지표는 모든 선종에 있어서 시스템 적용후에 감소하였음을 알 수 있다. 벌크, 컨테이너, VLCC 선종별 연료소모량은 시스템 적용전과 비교하여 적용후에 각각 8%, 11%, 6.1%의 절감율을 보였다. 선종별 항해시간은 시스템 적용후에 세 선박 모두 ETA의 약 5% 정도로 증가하였다.

4. 결론

선박에너지절감시스템의 에너지절감효과 검증을 위해 가장 효과적인 방법은 다양한 선박에 시스템을 설치하여 다양한 기상조건 및 해상환경에서 장기간의 항차결과를 종합하여 비교·분석하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 운항 일정이 정해져 있는 실선에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 실선대비 저렴한 비용으로 실제 선박의 운항환경에서는 시험할 수 없는 다양한 선종 및 해상환경을 적용할 수 있는 선박조종시뮬레이터를 이용하여 에너지절감시스템 적용 전후의 연료사용량을 비교·분석하고 에너지절감효과를 평가하였다.

벌크, 컨테이너, VLCC 선종을 이용한 선박에너지절감시스템 성능평가 결과는 선박조종시뮬레이터를 사용하여 바람 및 파랑이 다르게 적용된 환경에서 세 선박 모두 시스템 사용전과 비교하여 사용후에 연료절감효과를 나타냈다. 하지만 단순한 수확 모델링에 따른 RPM별 선박조종시뮬레이터 연료소모량 산출 결과는 실제 운항선박의 실시간 부하변동을 반영한 정확한 연료소모량 산출 결과와는 차이가 있을 수 있으며, 향후 에너지절감시스템이 적용된 실선 운항선박의 장기적인 항차데이터를 기반으로 추가적인 성능평가 수행이 필요하다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부 지원으로 수행된 2013년 해상 ESCO 시범사업 연구보고서 결과의 일부분입니다.

References

- [1] Ballou, P., Chen, H. and Horner, J. D.(2008), “Advanced Methods of Optimizing Ship Operations to Reduce Emissions Detrimental to Climate Change”, MTS/IEEE Proceedings, pp. 1-12.
- [2] Fujiwara, T., Ueno, M. and Nimura, T.(2001), “An Estimation Method of Wind Forces and Moments Acting on Ships”, Mini symposium on prediction of ship manoeuvring performance, pp. 83-92.
- [3] IMO(2009), Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI), IMO MEPC.1/Circ.684.
- [4] IMO(2011), Air Pollution and Energy Efficiency - Estimated CO₂ Emissions Reduction from Introduction of Mandatory Technical and Operational Energy Efficiency Measures for Ships, IMO MEPC 63/INF.2
- [5] IMO(2013), Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP), MARPOL Annex VI, Reg.22.
- [6] MAN Diesel and Turbo(2012), Basic Principles of Ship Propulsion, MAN Diesel and Turbo, pp. 5-42.
- [7] Park, J. and Kim, N.(2014), “A Comparison and Analysis of Ship Optimal Routing Scenarios considering Ocean Environment”, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 51, No. 2, pp. 99-106.
- [8] Port-MIS(2013), Available at: <http://portbusan.go.kr/>
- [9] Pyorre, J.(2012), “Overcoming the Challenges in Vessel Speed Optimization”, HANSA International Maritime Journal, Vol. 149, pp. 130-135.
- [10] Transas(2003), Mathematical Models Technical Description, Transas Marine Ltd.
- [11] Transas(2009), Description of Transas Mathematical Model, Transas Ltd.

Received 6 July 2015

Revised 2 November 2015

Accepted 3 November 2015