

# 실선운항기록을 이용한 환경외란 중에서의 선박추진성능 해석

유병현, 김진환(카이스트 기계공학과), 김정중, 안영태(삼성중공업)

## Analysis of ship powering performance under environmental disturbances using ship operational data

Byunghyun Yoo, Jinwhan Kim (Department of Mechanical Engineering, KAIST)  
Jungjoong Kim, Youngtae Ahn (Samsung Heavy Industries)

### 요약

Recently, the regulations and requirements for minimum fuel efficiency of ships have been reinforced in response to increased interest in environmental pollution and global warming. Thus, there is a growing need for research toward improving fuel efficiency by analyzing ship's powering performance under various sea states and operational conditions. However, it is known that existing analytical methods or empirical formulas do not give satisfactory results. This study proposes regression models using measured and forecast data. Because physical knowledge is applied in the modeling procedure, the proposed model is effective and accurate. The results are compared with the measured data, model test results and ISO15016 to verify the validity and accuracy of the model.

**Keywords:** Statistical analysis, Ship performance, Regression model, Measured/forecast data

### 1. 서론

최근 환경 오염이 심각해지면서 국제해사기구(IMO)의 경우 규제 방안으로 에너지효율설계지표(EEDI)와 선박에너지효율관리계획서(SEEMP)의 기준을 권고하여 이산화탄소 배출량 감소를 강제화하고 있고, 이에 따라 이산화탄소 배출량과 직결되는 연료 소비량을 줄이기 위한 노력의 필요성이 절실한 상황이다.

연료 소비량을 줄이기 위한 방법으로는 일차적으로 사용 연료의 변경, 엔진 성능의 개선을 통한 연비 향상 등이 가능한 방법이며, 그 외에도 운항 효율을 높임으로써 전반적인 연비를 향상시키는 것이 가능하다. 선박 운항 효율에는 다양한 요인들이 영향을 미치기 때문에(Arasteh et al., 2012), 현재까지의 이론적 모델의 사용이나 전적으로 해석적인 방법에 의한 파악이 쉽지 않고, 수조 시험의

결과도 실제 환경과의 차이로 인해 한계점을 보인다.

이러한 한계를 극복하기 위한 관련 연구로는 모형 시험 데이터를 이용하여 모델 기반의 저항 및 마력 추정에 대한 연구들이 수행된 바가 있으며(Kristensen, et al., 2012), 엔진의 유효 출력과 연료 소비율의 데이터에 기반한 선박의 운항 효율 평가에 관련된 연구도 진행된 바 있다(Borkowski, et al., 2011). 또한, 실선 운항 기록을 활용하여 선박의 속도 변화를 추정하는 연구(Sogihara et al., 2010, Sasa et al., 2015)가 있으며, 최근 각광 받고 있는 기계학습 기법 중 Artificial Neural Network (ANN)와 Gaussian Process (GP)를 이용해 연료 효율을 추정하는 연구가 진행된 바 있다(Petersen, et al., 2012).

본 연구에서는 실선 운항 기록을 적용해 운항 성능을 추정하되, 계측 물리량들의 역학적 관계에 기반한 운항 성능 모델을 도출함으로써, 전반적인 회귀 모델의 구성 방식 및

배경 지식의 적절한 활용 방안에 대한 일련의 절차를 제시하고자 한다.

## 2. 실선운항기록 분석

### 2.1 실선운항기록의 개요 및 데이터 전처리

본 연구에서는 컨테이너선의 실해역 운항 기록을 사용하였다. 실제 운항 상태에서의 환경 조건(wave, swell, wind)과 관련된 기록은 계측 데이터와 예보 데이터를 활용하였으며 효과적인 모델링을 위해 환경 조건의 크기와 방향의 요소는 정면 방향 요소와 측면 방향 요소의 2가지로 변환하여 사용하였다.

### 2.2 추진 성능 모델링을 위한 도식 모델

선박 성능을 모델링에 앞서 계측 물리량 간의 관계를 명확히 파악하기 위해 각 영향 인자 변수들 간의 관계를 도식적으로 나타내고자 하였다. 모델링의 기반이 되는 준정적 프로펠러 조건 (Quasi-static propeller condition)에서의 관련 수식은 아래와 같다.

$$P_B = Q_B n \quad (1)$$

$$T = K_T \rho n^2 d^4 \quad (2)$$

$$Q_p = K_Q \rho n^2 d^5 \quad (3)$$

$$2\pi I_p \dot{n}_p = \eta_s \lambda Q_B - Q_p \quad (4)$$

$$(m + m_a) a = T - R \quad (5)$$

$$R = f_r(V, O, W) \quad (6)$$

$P_B$ 는 엔진 마력,  $Q_B$ 는 엔진 토크,  $n$ 는 RPM,  $T$ 는 추력,  $K_T$ 는 추력 계수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $d$ 는 프로펠러 직경,  $Q_p$ 는 프로펠러 토크,  $K_Q$ 는 토크 계수,  $I_p$ 는 프로펠러의 관성 모멘트,  $\eta_s$ 는 축 효율,  $\lambda$ 는 기어 비,  $m$ 는 선박의 질량,  $m_a$ 는 부가 질량,  $a$ 는 가속도,  $V$ 는 선박의 속도,  $R$ 은 저항,  $O$ 는 운항 조건으로 본 연구에서는 트림 및 흘수를 의미하고,  $W$ 는 환경 조건을 의미한다.

식 (1), (2), (3)은 각각 엔진 마력, 프로펠러 추력, 프로펠러 토크의 계산식을 나타낸다. 식(4)와 식(5)는 엔진과 선박의 운동방정식을 나타낸다. 식 (6)은 저항을 표현하는

식으로서 선속, 운항조건 및 환경조건의 함수인  $f_r$  로 가정하였다.

환경외란 조건을 포함한 선박의 추진 성능과 관련된 영향 인자 및 변수들간의 관계를 도식 모델로 표현하자면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서  $n_c$ 는 RPM의 설정 값을 의미하고, 위 첨자 t-1, t, t+1은 시간을 의미한다. Fig. 1(a)는 시간에 따른 변화를 포함하고 있으나, 회귀 모델에서 초점을 맞추고 있는 부분인 정상상태를 고려하여, 시간 t에서의 항들을 정리하고, 변화율에 해당하는 항들을 제거하면 Fig. 1(a)는 Fig. 1(b)로 간략화 될 수 있다. Fig. 1(b)는 정상상태 구간에서의 변수들의 관계를 나타내며, 이 도식 모델을 바탕으로 회귀 분석 모델을 구성하였다.

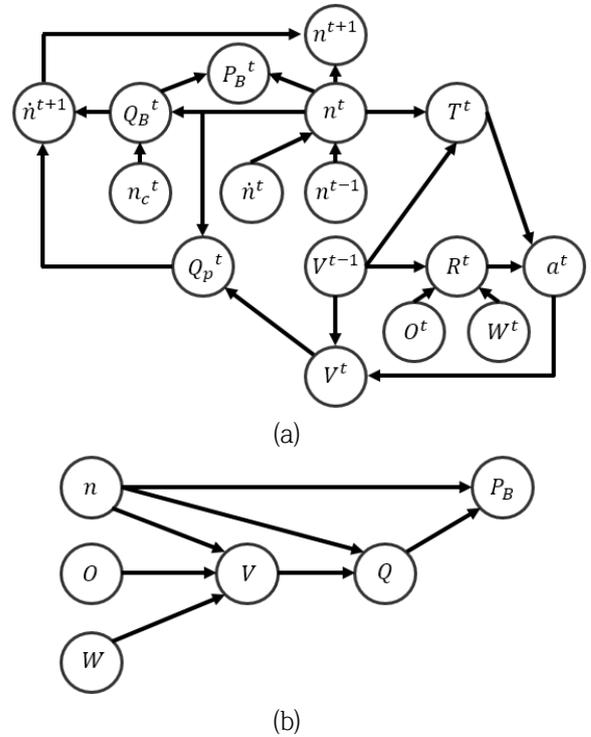


Fig. 1 Graphical models for ship powering performance

### 2.3 정상상태 구간 데이터 추출

본 연구에서는 운항 기간의 대부분을 차지하는 정상상태 구간에 대한 운항성능 모델을 구축하고자 하기 때문에, 전체 데이터에서 RPM이 일정하게 유지되고, 타각이 0도 근처인 직진 운동에 대한 데이터만을 추출하여 정상상태 구간의 데이터로 사용하기로 하였다.

### 3. 회귀 분석 모델

#### 3.1 엔진 마력 모델

엔진 마력 식은 아래와 같이 표기할 수 있다.

$$P_B = Q_B n = \frac{1}{\eta_s} Q_p n = \frac{1}{\eta_s} (K_Q \rho d^5 n^2) n \quad (7)$$

식 (7)에서  $K_Q$ 는 전진비  $J$ 에 대한 함수로 알려져 있고, 본 연구에서는  $K_Q$ 를  $J$ 에 대한 1차 함수 ( $K_{Q1} J + K_{Q2}$ )로 가정하였다.  $J = \frac{v(1-wf)}{nd}$  이고,  $\eta_s$ ,  $wf$  (wake fraction),  $\rho$ 가 고정된 상수라고 가정하고 프로펠러의 직경 또한 변하지 않는 항이기 때문에 상수 항을 하나로 묶으면, 엔진 토크는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_B = (c_1 \frac{v}{n} + c_2) n^2 \quad (8)$$

엔진 토크, RPM, 선박의 속도는 모두 계측 데이터에 포함되어 있으므로,  $c_1, c_2$ 를 데이터로부터 구할 수 있다.

#### 3.2 속도 모델

선체 저항의 경우 원칙적으로 속도의 제곱에 비례하며, 부가 저항의 경우 일반적으로 환경 조건의 제곱 및 타각의 제곱에 비례한다는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 물리적 특성을 반영하여 다항식의 형태로 저항을 구성하되 전후 운동의 비대칭성을 감안하여 환경외란의 전후 방향으로 독립된 별도의 계수를 추정하였다. 연구에서 사용된 데이터 상의 운항 조건 분석 결과 흘수와 트림 조건이 크게 다르지 않은 것으로 나타나 본 연구에서는 트림과 흘수가 저항 식에 반영되지 않았다. 식 (9)는 본 연구에서 구성한 속도 모델의 식이다.

$$\begin{aligned} V^2 &= b_1 n^2 - b_{21} H_{hwave}^2 - b_{31} H_{hswell}^2 \\ &\quad - b_{41} V_{hw}^2 - b_5 H_{cwave}^2 - b_6 H_{cswell}^2 \\ &\quad - b_7 V_{cw}^2 - b_8 \delta^2 \end{aligned}$$

If  $H_{hwave}, H_{hswell}, V_{hw} > 0$

$$\begin{aligned} V^2 &= b_1 n^2 - b_{22} H_{hwave}^2 - b_{32} H_{hswell}^2 \\ &\quad - b_{42} V_{hw}^2 - b_5 H_{cwave}^2 - b_6 H_{cswell}^2 \\ &\quad - b_7 V_{cw}^2 - b_8 \delta^2 \end{aligned}$$

If  $H_{hwave}, H_{hswell}, V_{hw} < 0$  (9)

$t_d$ 는 thrust deduction,  $H_{hwave}, H_{cwave}$ 는 정면, 측면 방향 파도의 높이,  $H_{hswell}, H_{cswell}$ 는 정면, 측면 방향 너울의 높이,  $V_{hw}, V_{cw}$ 는 정면, 측면 방향 바람의 세기,  $\delta$ 는 타각을 의미한다.

## 4. 분석 결과

#### 4.1 엔진 마력 모델

추정된 토크 계수의 정확도를 검증하기 위해 계측된 마력과 추정된 마력, 그리고 모형 시험으로 얻은 수치를 통해 구한 마력을 비교하였다. Fig. 2는 운항 기록 정보의 90%를 학습 데이터로 사용한 회귀 결과를 나머지 10%의 검증 데이터에 적용한 추진마력 추정 결과를 나타내며, Table 1은 학습 데이터의 양에 따른 계측 마력과의 오차를 나타낸다.

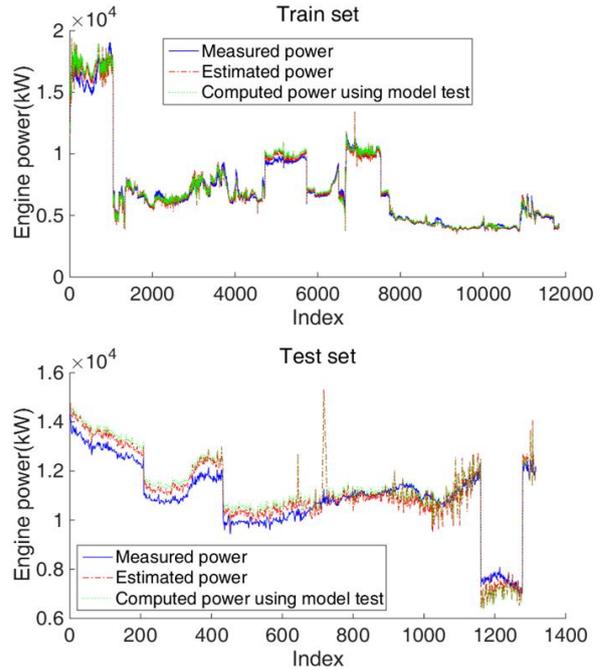


Fig. 2 Comparison of engine power

Table 1에 따르면 case 3과 같이 전체 데이터를 학습 데이터로 사용한 경우에, 모형 시험을 통해 얻은 수치를 이용하여 추정된 마력보다 본 연구에서 제시하는 방법이 실제 소요 마력에 가까운 것을 확인할 수 있다. 또한, case 1, 2와 같이 일부 데이터로 학습을 하고, 학습 과정에서 사용하지 않은 데이터를 이용해 오차를 계산한 결과에서도 제안한 방법이 더 정확한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 제안한 방법은 데이터 기반의 추정 기법이기 때문에 Table

1에 나타나듯이, 학습 데이터의 수가 많아질수록 소요 마력과의 오차가 줄어들게 되고, 이러한 결과를 통해 학습 데이터의 양이 증가할수록 더 나은 결과를 도출하게 될 것을 예측할 수 있다.

Table 1 Error of engine power with the number of training data

	Train data	Test data	NRMSE (%)	
			추정 값	모형 시험
Case 1	50%	50%	3.74	4.07
Case 2	90%	10%	3.58	4.01
Case 3	100%	0%	2.65	2.96

#### 4.2 속도 모델

3.2에서 기술한 기법을 토대로 각각의 환경 조건에 따른 속도의 변화를 Fig. 3에, 추정된 속도 모델의 계수를 Table 2에 나타낸다.

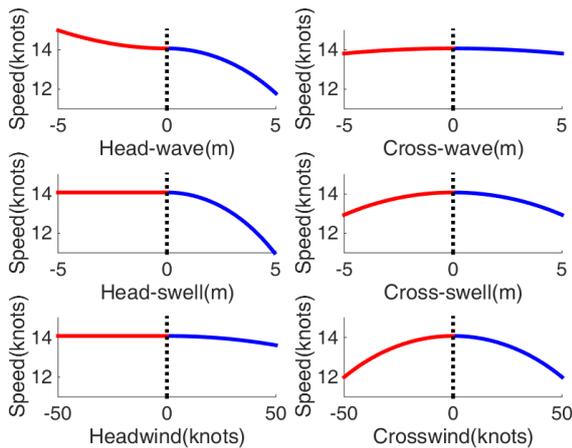


Fig. 3 Variation of ship speed according to environmental conditions

계측 데이터에 따르면 선수 및 선측 방향으로부터의 환경 외란 크기가 증가하는 경우 선속의 감소 경향이 뚜렷하나 선미방향에서 다가오는 환경외란과 선속과의 상관관계는 명확하지 않다. 특히 파도가 선미에서 작용하는 경우 선속이 증가하는 경향이 보이는데 이는 파도만에 의한 직접적 효과라기보다는 파도, 너울, 바람 계측치의 상관관계가 크다보니 해석 과정에서 그 영향이 명확히 구분되지 않은데서 기인한 것으로 추정된다. Fig. 4는 제안하는 모델의 추정 속도와 계측 된 속도를 비교한 그림이다.

추정 된 속도와 계측 된 속도의 RMSE는 0.34knots, NRMSE는 2.67%로 비교적 양호한 추정 결과를 나타내고 있다. 결과의 타당성을 확인하기 위한 또 다른 방법으로

선체 저항에 의한 마력과 모형 시험 데이터를 Fig. 5에 비교하였다. 선체 저항에 의한 추정 마력과 모형 시험 데이터가 충분히 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

Table 2 Coefficients of the velocity model

$b_1$	0.0551	$b_{22}$	1.0743	$b_6$	-1.2351
$b_{21}$	-2.3699	$b_{32}$	0.0000	$b_7$	-0.0217
$b_{31}$	-3.1684	$b_{42}$	0.0000	$b_8$	-0.2527
$b_{41}$	-0.0052	$b_5$	-0.2901		

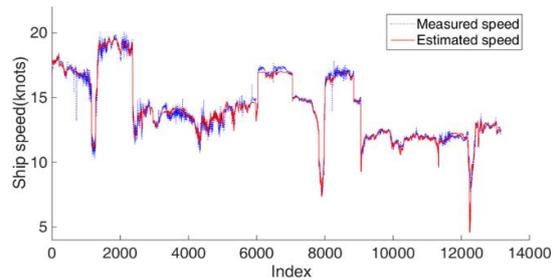


Fig. 4 Comparison of ship speed

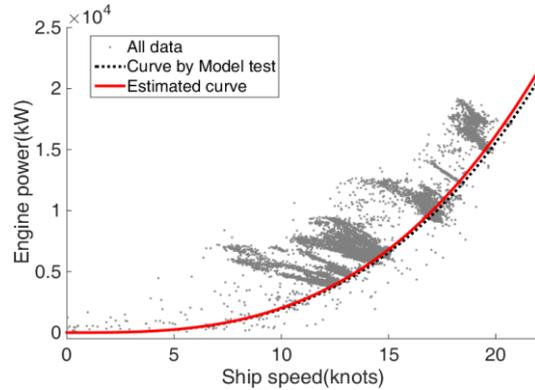


Fig. 5 Comparison of power due to hull resistance

#### 4.3 ISO15016과의 비교

제안하는 모델의 유용성을 검증하기 위해 ISO15016 표준에 따라 추정된 환경외란 중의 추진 마력 추정치와 비교하였다. 체계적인 검증을 위해 Beaufort number 1~7에 해당하는 데이터를 20개씩 추출하여 비교를 수행하였으며, Table 3은 계측 된 속도와 마력과의 오차에 있어서 제안한 모델과 ISO15016에 의한 결과를 비교한 표이다.

속도 추정에 있어서는, 제안한 모델이 모든 Beaufort number 데이터에 대해서 더 정확한 경향을 보이는 것으로 나타났으며 마력 추정에 있어서는 Beaufort number가 적을 때는 ISO15016이 만족스런 추정 결과를 주되 Beaufort number가 증가함에 따라 제안한 모델이 훨씬

개선된 결과를 보이는 것을 확인하였다.

Table 3 Error comparison with ISO15016

BF	Speed		Power	
	ISO15016	Proposed	ISO15016	Proposed
1	2.01	0.81	2.02	3.00
2	2.62	1.13	3.21	6.59
3	2.67	1.13	6.07	7.90
4	3.08	2.42	3.16	5.91
5	5.65	3.55	8.76	6.61
6	6.96	2.55	11.39	6.34
7	7.51	1.19	13.23	4.10
Mean	4.36	1.83	6.83	5.78

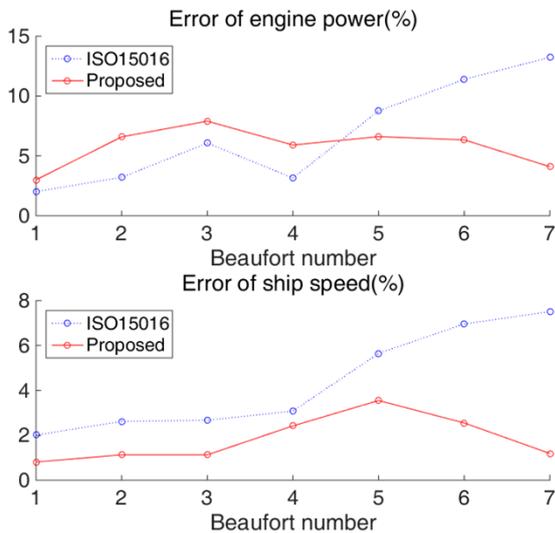


Fig. 6 Comparison with ISO15016

## 5. 결론

본 논문에서는 실선 운항 기록을 이용해 실제 해양 환경에서의 마력 및 속도 모델을 구성해보고, 모형 시험 데이터 및 ISO15016의 결과와 비교해보았다. 아직까지 개선의 여지는 있으나 실선 운항 기록을 통한 추정 결과가 모형 시험 및 ISO15016보다 전반적으로 개선된 결과를 보임을 통해 제안하는 방법의 유용성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 (주)삼성중공업의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며 연구비 지원에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- A. M. Arasteh, K. Lari, S. S. Shariati, 2012, Optimizing voyage plan in way of Persian Gulf and Red Sea using meteorology and oceanography satellite data, *International Journal of Marine Science and Engineering*, 2(1), pp. 121-128
- B. Yoo, J. Kim, 2013, Powering performance analysis and modeling of a full-scale ship using machine learning techniques, *Proceeding of the society of naval architects of Korea*, 2013.
- B. P. Pedersen, J. Larsen, 2009, Prediction of Full-scale Propulsion Power using Artificial Neural Networks, *Budapest, Hungary*, 537-550, May 2009.
- H.O. Kristensen, M. Lützen, 2012, Prediction of Resistance and Propulsion Power of ships, Project report, Project no. 2010-56, *Emissionsbeslutningsstøttesystem*
- J. P. Petersen, D. J. Jacobsen, and O. Winther., 2012, Statistical modelling for ship propulsion efficiency. *Journal of Marine Science and Technology*, 17(1), pp. 30-39
- K. Sasa, D. Terada, S. Shigeaki Shiotani, N. Wakabayashi, T. Ikebuchi, C. Chen, A. Takayama, M. Uchida, 2015, Evaluation of ship performance in international maritime transportation using an onboard measurement system - in case of a bulk carrier in international voyages, *Ocean engineering*, 104, pp. 294-309
- N. Sogihara, M. Ueno, K. Hoshino, M. Tsujimoto and N. Sasaki, 2010 Verification of calculation method on ship performance by onboard measurement, *The International Society of Offshore and Polar Engineers* 2010.
- T. Borkowski, Lech Kasyk, Przemysław Kowalok, 2011, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 18(2), pp. 31-39