

## CFD 기반 소형 선박의 EEDI 평가 방법에 관한 연구

박동우\*†

\* 동명대학교 조선해양공학부

Study on the Evaluation Method for EEDI  
of the Small Vessel using CFD

Dong-Woo Park\*†

\* School of Naval Architecture &amp; Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan 48520, Korea

**요 약** : 본 논문의 주 관심사항은 전산유체역학과 기존 모형시험 데이터를 활용하여 주어진 선박의 저항 및 추진성능을 추정하고 그 결과를 이용하여 에너지효율설계지표(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 평가하는 방법을 제시하는 것이다. 대상선박의 모형선 크기에서의 전 저항을 계산하기 위해 점성 유동 해석을 수행하였다. 유동계산은 STAR-CCM+를 사용하였으며 자유표면, 트림과 싱키지를 고려하였다. 점성 유동 해석 결과를 바탕으로 대상선박의 유효동력을 산정하였다. 준 추진효율 계수는 기 보유한 모형시험 데이터베이스를 이용한 추정식 및 유사선박의 시험자료를 활용하여 산정하였다. 최종적으로 EEDI 산정식에 대하여 유체동역학적 결과, 선박의 정보, 사용하는 연료에 대한 CO<sub>2</sub>의 환산계수, 연료소모량 등을 바탕으로 일반화된 계산 프로그램을 작성하였다.

**핵심용어** : 전산유체역학, 저항성능, 유효마력, 준추진효율계수, 제동마력, 에너지효율설계지표

**Abstract** : This study aimed to predict the resistance and propulsion performance of a ship using computational fluid dynamics (CFD) and a database as well as establish an assessment method for the energy efficiency design index (EEDI) using the results. First, the total resistance of the studied ship is obtained using CFD. A flow analysis is conducted with the free surface and trim and sinkage using a commercial CFD code (STAR-CCM+). The effective power of the ship is assessed based on the CFD results. The quasi-propulsive efficiency is calculated from an empirical prediction equation using experimental data and similar material. Finally, a general calculation program for the EEDI is established based on the hydrodynamic results, ship information for principal particulars, conversion factor of CO<sub>2</sub> for fuels, and fuel consumption.

**Key Words** : CFD, Resistance performance, Effective power, Quasi-propulsive efficiency, Brake power, Energy efficiency design index

## 1. 서 론

연안선박의 온실가스 감축과 관련해서 국제해사기구(IMO)에 의한 규제가 강력하다. 신조로 등록될 선박은 모형시험과 전산유체역학 등을 기반으로 에너지효율설계지수(Attained EEDI, 이하 Attained EEDI 라고도 함)를 평가하여 재화중량(Deadweight, DWT)에 따른 에너지효율설계지수 허용값(Required EEDI, 이하 Required EEDI 라고도 함) 보다 크면 운항이 금지된다.

본 선박의 경우, 해외에서 건조하여 국내 연안에서만 운항될 선박이다. 그러나 해외 조선소에서 국내까지 운항을

위해서도 에너지효율설계지수의 평가가 반드시 필요하다.

선박의 에너지효율설계지수는 설계단계에서 선박의 CO<sub>2</sub> 배출특성을 나타내는 것으로 식(1)과 같다.

$$EEDI = \frac{\text{Engine Power(kW)} \times \text{SFC(g/kWh)} \times C_F}{\text{Deadweight(DWT)} \times \text{Speed(knots)}} \quad (1)$$

식(1)의 Engine Power는 엔진출력, SFC는 연료소모량, CF는 연료에 대한 CO<sub>2</sub>의 환산계수, Capacity는 재화중량 그리고 Speed는 엔진출력에서의 선속이다.

특히, 국내에서는 선박의 온실가스 규제가 현실화되면서 조선·해운업계에 친환경 기술 연구 개발의 중요도도 급격히 높아지고 있다.

† dwpark@tu.ac.kr, 051-629-1654

본 논문에서는 우선 식(1)의 분모 중 선박속도인 Speed를 추정하는 방법을 제시하였다. 선속은 평가 규정에 따라 실선의 Full Load에서의 속도이다. 이 속도는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 바탕으로 추정하였다.

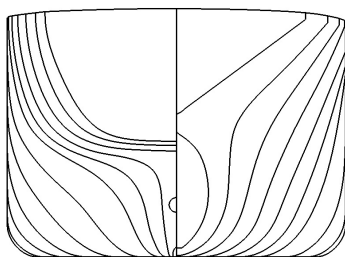
식(1)의 Attained EED 산정식에 대하여 유체동역학적 결과, 선박의 정보 등을 바탕으로 일반화된 계산 프로그램을 완성하였다. 이 프로그램은 공개 및 배포가 가능 하다.

본 논문에서는 CFD 해석을 통해 유효동력을 추정하였다. 해석은 자유표면, 트림과 싱키지를 고려하였다. CFD의 저항값을 이용하여 ITTC-1978의 3차원 해석법을 통해 유효동력을 추정하였다. 준 추진효율 계수(ETAD,  $\eta_a$ )는 Holtrop에 의한 추정식(Holtrop, 1988) 및 기존 유사선의 모형시험 자료를 사용하였다.

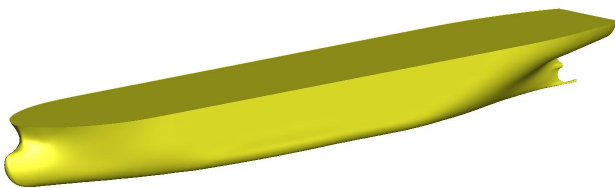
유사연구로는 Park and Cho(2017)은 대형 컨테이너선의 저속 운항 시 선수부 개조 전후 EEOI 변화에 대한 연구를 수행하였다. Yang and Kim(2005)은 저항추진 성능에 미치는 자세변화로 인한 속도성능을 수치해석과 모형시험으로 분석하였다. Park et al.(2013)은 선박의 트림자세가 저항 성능에 미치는 영향에 대한 조사를 하였다. Park et al.(2004)은 자유수면을 고려한 점성유동 해석을 통하여 선체 주위의 파형과 선체 저항성능에 대한 연구를 수행한 바 있다. Park(2018a; 2018b)은 CFD에 의한 선박의 저항성능 추정방법을 제시하였으며 모형시험과의 비교를 통해 타당함을 확인하였다.

## 2. 대상선박

대상선박의 모습, 실선의 제원과 계산조건은 Fig. 1(a)와 (b) 그리고 Table 1에 나타내었다.



(a) Body plan



(b) 3D shape used in the calculation

Fig. 1. Object vessel.

Table 1. Particulars of the object vessel

	Object vessel	
	Full Scale	Model Scale used in CFD
Scale ratio	-	13.0333
Length between perpendiculars, $L_{PP}$ (m)	78.2	6.0
Breadth, B (m)	13.0	0.997
Draft at F.P.&A.P, $T_F/T_A$ (m)	4.599/ 5.082	0.353/ 0.390
Deadweight (ton)	ab.4000	-
Displacement ( $m^3$ )	3890.0	1.757
Wetted surface of a ship, $W_{SA}$ ( $m^2$ )	1497.3	8.815
Wetted surface of a bilge keel, $W_{BK}$ ( $m^2$ )	15.0	-
75 % MCR (kW)	1378.5	-

## 3. CFD에 의한 전 저항 해석

### 3.1 좌표계 및 지배방정식1)

본 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 유동 방향이 양(+)의 x 축이고, 선박의 우현이 양의 y 축이며 중력의 반대 방향이 양의 z 축인 우수 직교 좌표계이다. 좌표계의 원점은 선체 중심면(center plane)과 중양면(midship) 그리고 자유수면(free surface)이 만나는 점에 위치한다. 계산 영역은 원점에서 선수부 방향으로  $1.5L_{PP}$ , 선미부 방향으로  $2L_{PP}$ 이며 폭 방향으로  $1.5L_{PP}$ 이다. 선체에서 발생한

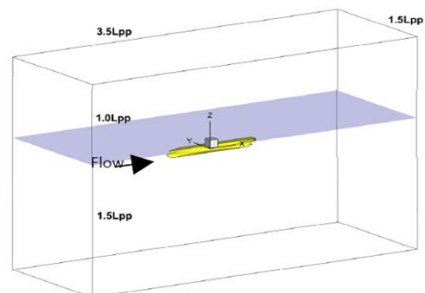


Fig. 2. Coordinate system.

1) 좌표계 및 지배방정식에서 수치계산 영역 등은 본 저자가 선박의 저항성능 해석에 사용하는 표준화된 방법으로 Park(2018a; 2018b)에도 유사하게 기술되어 있음. 본 논문에서는 대상선박이 다름에 따라 수치계산 영역 등의 구체적인 값에는 차이가 있음.

자유 수면이 계산 영역의 입구, 측구 및 대칭 경계 조건에 의해 왜곡되지 않도록 계산 영역을 설정하였다. 또한 침수 효과가 발생하지 않도록 깊이 방향으로 자유 수면으로부터 1.5L<sub>pp</sub>에 바닥 경계면이 위치하며, 공기에 해당하는 영역의 높이는 1.0L<sub>pp</sub>이다.

### 3.2 격자 및 수치해석 조건<sup>2)</sup>

선체 표면 및 공간 격자 생성은 트리머(trimmed mesh)와 경계층 격자(prism layer)를 사용하였다. 생성된 전체 격자수는 약 130만개로 격자의 구성은 Fig. 3과 같다.

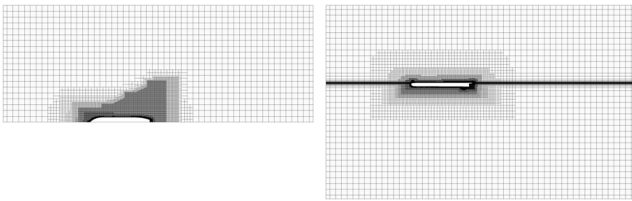


Fig. 3. Trimmed mesh.

그림에서 보듯이 트리머는 유동 특성이 복잡한 영역에서 격자를 조밀하게 구성하며 단순한 영역에서 격자의 크기를 크게 설정하는 방법을 통해 적은 격자수로 효과적인 유동해석이 가능한 장점이 있다. 또한 계면에서 수직한 격자를 생성함으로써 자유 수면을 보다 정확하게 모사할 수 있는 장점이 있다. 트리머에 의해 만들어진 다면체 격자에서는 물리량의 공간 구배를 계산함에 있어 2차 정확도를 위해 최소자승법(least square method)을 사용해야 하며, 격자 수준이 변하는 영역에서 격자의 면을 통과하는 플럭스를 내삽할 때 공간 차분 정도가 감소하는 단점이 있다. 따라서 전단력이 중요하게 작용하는 벽면 근처에서 트리머를 적용할 경우 저항 값에서 오차가 크게 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 선체 주변에 경계층 격자를 적용하였다. 총 6개의 층을 생성하였으며, 첫 번째 격자 간격은 선체 전체의 y+ 평균값이 30~40이 되도록 하였다. 양질의 경계층 격자를 생성하기 위해 선체 갑판부에는 경계층 격자를 적용하지 않았으나, 갑판에 작용하는 힘은 공기에 의한 전단력으로 전체 저항에서 무시할 수 있는 수준이다. 갑판에 경계층을 생성한 경우와 생성하지 않은 경우의 힘의 차이는 전체 저항값의 0.1% 미만이다.

자유 수면을 고려하기 위해 VOF(volume of fluid)를 사용하

여 다상 유동을 수치 해석하였다. 유동장 계산은 동적 트림을 고려하기 위해 DFBI(dynamic fluid body interaction) 기법을 적용하였다. DFBI 기법은 선체의 자세 변화에 따라 계산 영역 전체가 이동 및 회전하는 방법으로 선체의 싱키지(sinkage)는 계산 영역 전체의 z 방향 수직 이동으로 나타나며, 트림(trim)은 계산 영역 전체의 y 방향 회전으로 나타난다. 계산 시간 간격은  $\Delta t=0.02s$ 를 적용하여 총 60초까지 계산을 수행하였다. 매 시간 간격에서 5회의 내부 반복 계산을 수행하였으며, 초기 조건에 따른 자세 오차를 배제하기 위해 계산 1초 후부터 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 통해 선체의 동적 자세 변화를 고려하였다. 선체의 동적 자세를 고려함에 따라 저항값이 주기적인 변화를 보이는데, 45초 이후부터 60초까지의 평균값을 계산하여 저항 값으로 사용하였다. 평균값을 계산하는 시간에 따른 오차는 약 0.3% 미만이다. 난류 모델은 Reynolds stress model을 적용하였고 입구 경계 조건은 고정 속도 조건 및 자유 수면 높이 고정 조건을 사용하였다.

### 3.3 결과 검토

본 계산에서 사용한 수치 기법 및 격자 구성은 기존 연구를 통해 예인수조 모형시험 대비 1-2% 수준의 오차를 갖는 방법이며, 이후 많은 응용 연구를 통해 수치적 정확도가 검증되었다.

점성 유동해석 결과로부터 선체의 수직방향 응력과 수평방향 응력으로부터 선체에 작용하는 전저항(R<sub>TM</sub>)을 식(2)로부터 구할 수 있다.

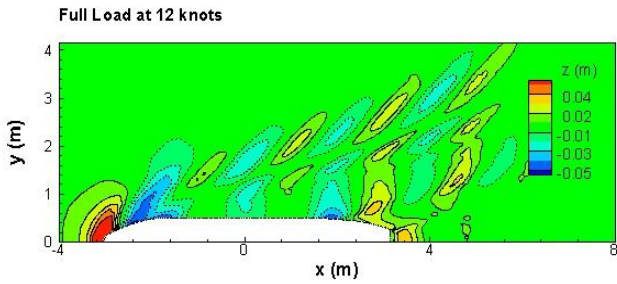
$$C_{TM} = \frac{1}{S} \iint (-C_p n_x + C_{f_x}) dS \quad (2)$$

여기서 S는 선체의 접수면적, C<sub>p</sub>는 선체에 수직으로 작용하고 있는 수직응력의 압력계수, n<sub>x</sub>는 선박의 축 방향 단위 벡터, C<sub>f<sub>x</sub></sub>는 선체에 수평으로 작용하는 수평응력 계수이고, C<sub>TM</sub>은 선체에 작용하는 전저항 계수이다.

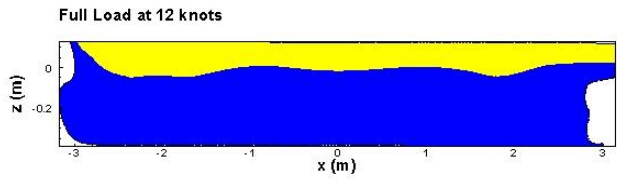
Fig. 4 ~ Fig. 6은 설계속도 근처인 13노트와 전후의 선속에서의 자유수면 파형, 선측파형, 선체표면에 작용하는 압력분포를 나타내었다. 파형 관점에서 보면 12와 13노트에서 파고의 오르내림(fluctuation)이 심한 것을 확인하였다. 그리고 14노트에서는 선수부와 선수어깨에서 큰 파형이 생성됨을 확인할 수 있었다.

CFD 계산의 목적은 모형선 크기에서의 전저항을 추정하는 것이다. Fig. 4(c), 5(c), 6(c)의 선체에 작용하는 힘을 바탕으로 12노트에서 62.88 N, 13노트에서 85.35 N 그리고 14노트에서 114.05 N이 추정되었다.

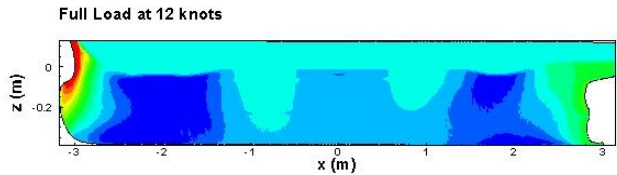
2) 격자 및 수치해석 조건은 본 저자가 일반상선의 저항해석에 사용하는 표준화된 방법으로 Park(2018a; 2018b)에도 유사하게 기술되어 있음. 본 논문에서의 대상선박의 크기 등이 다름으로 인해 격자구성 등에 있어 구체적인 부분에는 명확한 차이가 있음.



(a) Wave contour (12.0 knots)

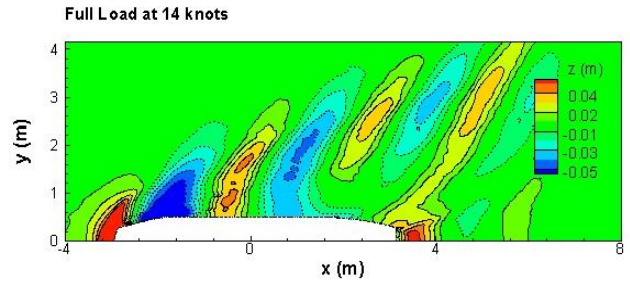


(b) Wave height along the hull surface (12.0 knots)

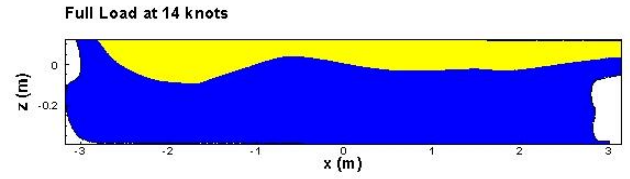


(c) Pressure distribution applied to the hull surface (12.0 knots)

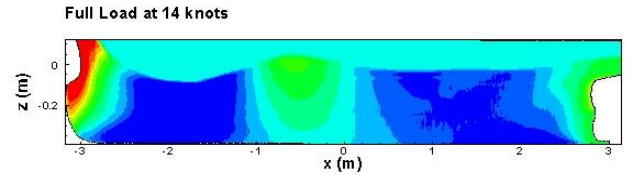
Fig. 4. Wave contour, wave height and pressure (12.0 knots).



(a) Wave contour (14.0 knots)



(b) Wave height along the hull surface (14.0 knots)

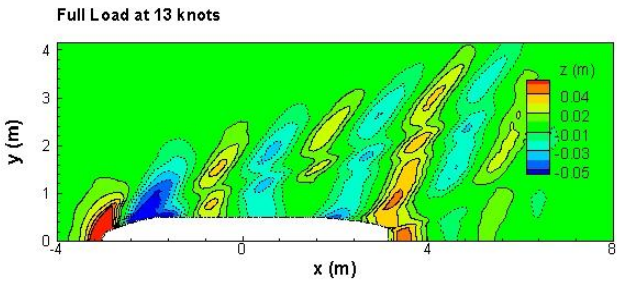


(c) Pressure distribution applied to the hull surface (14.0 knots)

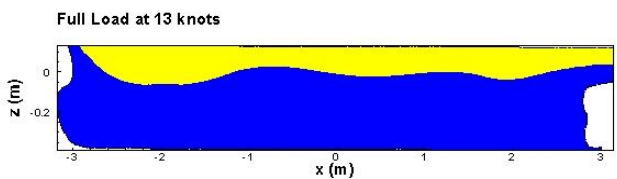
Fig. 6. Wave contour, wave height and pressure (14.0 knots).

#### 4. EEDI 평가를 위한 속도성능 추정

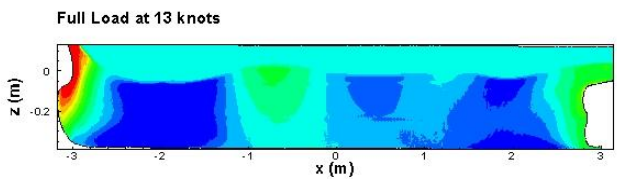
CFD로부터 계산된 전저항( $R_{TM}$ )을 이용하여 ITTC-1978 3차원 해석법에 따라 유효마력과 제동마력을 추정하였다(ITTC-1978). 해석 결과는 Table 2에 나타내었다. 계수들에 대한 정의는 ITTC-1978을 참조 바란다. 형상계수는 1978년 이후 네 차례에 걸친 Holtrop의 논문에 의해 제시된 추정식을 사용하였다. Holtrop의 통계적 추정법은 단축선 및 쌍축선에 대한 무작위의 모형시험 결과와 실선 속도 시운전 시험결과를 회귀분석(Regression analysis)한 결과를 바탕으로 개발된 것이다(Holtrop, 1988). 공기저항은 투영면적을 이용하여 ITTC-1978 해석법에서 제안한 식을 이용하여 추정하였다. 준추진효율 계수는 경험식 및 유사선종의 모형시험 자료로부터 선속별로 결정되었다. Table 2의 제동마력(Brake Power, PB) 추정과정에서는 마력보정 계수인 CP는 0.95를 사용하였다. 해상상태(Sea Margin)는 0%를 사용하였다. Table 1의 75% MCR에서 속도성능을 추정하였고, 이 추정된 속도는 다음 절의 EEDI 평가에 적용된다.



(a) Wave contour (13.0 knots)



(b) Wave height along the hull surface (13.0 knots)



(c) Pressure distribution applied to the hull surface (13.0 knots)

Fig. 5. Wave contour, wave height and pressure (13.0 knots).

Table 2. Prediction of the effective power and brake power for the object vessel

\*\* See Nomenclature

- $T_F=4.599$ ,  $T_A=5.082$
- Form Factor (1+k): 1.300
- Roughness Allowance( $\Delta C_F$ ):  $0.6548 \times 10^{-3}$
- Air Resistance Coeff.( $C_{AA}$ ):  $0.0883 \times 10^{-3}$

$V_S$ (kts)	$V_M$ (m/s)	$F_N$	$R_{NM} \times 10^{-6}$	$R_{TM}(N)^{1)}$	$C_{TM} \times 10^3$	$C_{FM} \times 10^3$	$C_{VM} \times 10^3$	$C_W \times 10^3$
11.0	1.5673	0.2020	8.4464	48.07	4.4442	3.0900	4.0170	0.4272
12.0	1.7098	0.2204	9.2142	62.88	4.8848	3.0431	3.9560	0.9288
13.0	1.8523	0.2387	9.9821	85.35	5.6496	3.0009	3.9012	1.7484
14.0	1.9948	0.2571	10.7499	114.05	6.5094	2.9627	3.8515	2.6579
15.0	2.1373	0.2755	11.5178	175.45	8.7231	2.9277	3.8060	4.9171

$V_S$ (kts)	$R_{NS} \times 10^{-9}$	$C_{FS} \times 10^3$	$C_{VS} \times 10^3$ <sup>2)</sup>	$C_{TS} \times 10^3$ <sup>3)</sup>	$R_{TS}(kN)$	$P_E(kW)$	$\eta_d$ <sup>4)</sup>	$P_B(kW)$ <sup>5)</sup>
11.0	0.3809	1.7318	2.9061	3.4507	85	480	0.684	674
12.0	0.4156	1.7121	2.8805	3.9264	115	709	0.668	1,019
13.0	0.4502	1.6942	2.8573	4.7225	162	1,085	0.652	1,596
14.0	0.4848	1.6780	2.8361	5.6107	223	1,609	0.629	2,455
15.0	0.5195	1.6630	2.8167	7.8503	359	2,770	0.621	4,280

- 1)  $R_{TM}$  : Total resistance by CFD
- 2)  $C_{VS} = (1+k) \times C_{FS} + \Delta C_F$
- 3)  $C_{TS} = [(W_{SA} + W_{BK}) / W_{SA}] \times C_{VS} + C_W + C_{AA}$ ,  $W_{SA}$  and See Table 1 for  $W_{BK}$
- 4)  $\eta_d$  : Prediction from model test database and the materials of the similar vessel
- 5) Brake power( $P_B$ ) : Effective power( $P_E$ )/ $\eta_d \times C_P(0.95) / ETAT(0.99) \times w/o$  S.M.(S.M.=0%)
  - $C_P$  : Power correction is defined 0.95 using model test database
  - ETAT : Shaft loss coefficient is defined 0.99 using model test database
  - S.M. : Sea Margin is defined 0%
  - Symbol explanation : See Nomenclature

### 5. EEDI 평가

식(1)의 EEDI 산정식은 3절과 4절에서 구한 유체동역학적 결과, 선박 정보, 사용하는 연료에 대한 CO<sub>2</sub>의 환산계수, 연료소모량 등을 바탕으로 일반화된 계산 프로그램으로 작성하였다. 식(3)은 식(1)을 구체적으로 수식화한 것이다.

일반화된 프로그램에서는 모든 선종에 대하여 식(3)에 포함된 계수들의 정의가 필요하다.

본 논문에서 작성된 EEDI의 자동계산 프로그램은 공개 및 배포가 가능하다.

$$EEDI = [(C_F \times P_{ME} \times SFOC_{ME}) + (C_F \times P_{AE} \times SFOC_{AE}) + (P_{PTI} - P_{AE\text{eff}}) \times C_{FAE} \times SFOC_{AE}] / (DWT \times V_{ref}) \quad (3)$$

- $C_F$  : Carbon factor (defined in Annex 2 of MEPC61/5/3) [t-CO<sub>2</sub>/t-fuel]
- $P_{ME}$  : Power of M/E (75% MCR) [kW]

- $P_{AE}$  : Power of A/E (MCR이 10,000 kW보다 큰 경우  $0.025 \times MCR_{ME} + 250$ , MCR이 10,000 kW보다 작은 경우  $0.05 \times MCR_{ME}$ ) [kW]
- $SFOC_{ME}$  : SFOC of M/E at 75% load (from maker's catalog without margin) [g/kWh]
- DWT : 100% of Full DWT
- $V_{ref}$  : Ship speed at 75% MCR, draught at 70% of Full DWT, 0% S.M. [knots]
- $P_{PTI}$ ,  $P_{AE\text{eff}}$  : Power of power take in system [kW]

본 선박의 계산 예는 식(3)을 바탕으로 식(4)에 나타내었다. 식(4)의 분모의 12.56노트는 3절과 4절을 통해서 추정된 값이다.

$$EEDI = [(3.206 \times 1378.5 \times 190) + (3.206 \times 91.9 \times 195) + (0 - 0) \times 3.206 \times 0] / (2,838 \times 12.56) = 25.17 \quad (4)$$

식(4)의 25.17[g/ton-nm]은 1톤의 화물을 1해리 운송할 때 발생하는 CO<sub>2</sub>의 배출량<sup>3)</sup>으로 에너지효율설계지수라고 한다. 이 값은 재화중량(DWT)에 따른 에너지효율설계지수 허용값(Required EEDI) 보다 크지 않으면 운항이 가능하게 된다.

## 6. 결론

본 논문의 관심사항은 CFD를 활용하여 대상선박의 속도를 추정하고 그 결과를 이용하여 에너지효율설계지표(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 평가하는 방법을 제시하는 것이다. 최종적으로 EEDI 산정식에 대한 일반화된 계산 프로그램을 작성하였다. 결론은 다음과 같다.

- 1) 대상선박의 속도성능을 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)과 기 보유한 모형시험 데이터베이스(Data Base)를 이용한 추정식 및 유사선박의 시험자료를 활용하여 평가하였다.
- 2) 주어진 선형의 유효마력을 추정하기 위해서 점성 유동 해석을 수행하였다. 점성 유동장 계산은 상용 CFD 코드인 STAR-CCM+를 사용하였으며, 자유수면과 동적트림(자세변화)을 모두 고려하였다. 즉, 실제 수조 모형시험의 환경과 동일한 조건이며 따라서 EEDI 평가에 신뢰성이 있다고 판단된다. 유효마력은 ITTC-1978 방법에 의하여 추정하였다.
- 3) 제동마력은 준 추진효율 계수(EATD,  $\eta_d$ ) 추정을 통해 가능하다.
- 4) EEDI 평가를 위해 추정된 제동마력을 바탕으로 주어진 엔진마력인 75% MCR에서 속도를 추정하였다.
- 5) 추정된 속도를 바탕으로 에너지효율설계지표(EEDI)를 산정하였다.

## 사 사

이 논문은 2017년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호/2017A018).

## Nomenclature

$A_T$	Transverse projected area above waterline of ship
$C_{AA}$	Air resistance coefficient, $C_{AA}=0.001 \cdot A_T/S_S$
$C_F$	Frictional resistance coefficient calculated from the ITTC 1957 model-ship correlation line, $C_F = 0.075 \cdot (\text{Log}_{10} R_N)^2$

3) 에너지효율설계지수의 정의로 사용됨.

$\Delta C_F$	Roughness allowance = $105 \cdot [(k_s/L_{WL})^{1/3} - 0.64] \cdot 10^{-3}$
$C_P$	Trial correction factor for power
$C_W$	Wave resistance coefficient
$C_T$	Total resistance coefficient
$F_N$	Froude number, $F_N=V/(gL_{WL})^{1/2}$
$g$	Gravitational acceleration
$k$	Three dimensional form factor determined by Prohaska's method on the base of ITTC 1957 model-ship correlation line
$k_s$	Hull roughness of ship, $k_s=150 \times 10^{-6}$ m
$L_{WL}$	Length on waterline
$P_B(PB)$	Brake power
$P_E(PE)$	Effective power
$R_T$	Total resistance
$R_N$	Reynolds number, $R_N=V \cdot L_{WL}/\nu$
$S_S$	Wetted surface area
$S_{BK}$	Wetted surface area of bilge keel
$\eta_d$	Propulsive efficiency or quasi-propulsive efficiency
$\nu$	Kinematic viscosity of water
$\rho$	Mass density of water

Subscript 'M' refers to model value

Subscript 'S' refers to ship value

## References

- [1] Holtrop, J.(1988), A Statistical Prediction Method with a Speed Dependent Form Factor, SMSSH'88, Vamar.
- [2] ITTC(1978), Report of Performance Committee, 15th ITTC, Hague.
- [3] Park, D. W.(2018a), Assessment of the Resistance Performance of Hull Appendages Attached to Fishing Vessels Using CFD, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 2, pp. 267-274.
- [4] Park, D. W.(2018b), Resistance Performance Map through Studies on the Dimension Parameters of the Bilge Keel attached on the Fishing Vessel, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 5, pp. 583-590.
- [5] Park, I. R., J. Kim and S. H. Van(2004), Analysis of Resistance Performance of Modern Commercial Ship Hull using a Level-set Method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 79-89.
- [6] Park, D. W., S. B. Lee, S. S. Chung, H. W. Seo and J. W. Kwon(2013), Effects of Trim on Resistance Performance of a Ship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 2, pp. 88-94.

- [7] Park, G. Y. and K. H. Cho(2017), A study on the change of EEOI before and after modifying bulbous at the large container ship adopting low speed operation, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 41, No. 1, pp. 15-20.
- [8] Yang, J. M. and H. C. Kim(2005), Prediction of Propulsive Performance of VLCC at Heeled and Trimmed Conditions, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 307-314.

---

Received : 2019. 07. 29.

Revised : 2019. 08. 14.

Accepted : 2019. 08. 28.