

선형변수 및 모형시험결과 데이터베이스를 활용한 저속비대선의 잉여저항계수 추정

김유철·김명수·양경규·이영연·임근태·김진·황승현·김정중·김광수[†]
선박해양플랜트연구소(KRISO)

Prediction of Residual Resistance Coefficient of Low-speed Full Ships using Hull Form Variables and Model Test Results

Yoo-Chul Kim·Myung-Soo Kim·Kyung-Kyu Yang·Young-Yeon Lee·Geun-Tae Yim·Jin Kim·Seung-Hyun Hwang·JungJoong Kim·Kwang-Soo Kim[†]
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)

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.

In the early stage of ship design, the rapid prediction of resistance of hull forms is required. Although there are more accurate prediction methods such as model test and CFD analysis, statistical methods are still widely used because of their cost-effectiveness and quickness in producing the results. This study suggests the prediction formula for the residual resistance coefficient (C_r) of the low-speed full ships. The formula was derived from the statistical analysis of model test results in KRISO database. In order to improve prediction accuracy, the local variables of hull forms are defined and used for the regression process. The regression formula for these variables using only principal dimensions of hull forms are also provided.

Keywords : C_r prediction(잉여저항계수 추정), Low-speed full ship(저속비대선), Regression(회귀분석), Hull form variables(선형변수)

1. 서론

선박은 자동차와 같은 대량생산물과는 달리 완제품이 나오면 설계 변경이 거의 불가능한 상품이다. 따라서 설계 단계에서 선박의 저항 성능을 추정하는 것은 우수한 선형을 설계하기 위한 필수 조건이다. 선박의 저항 성능을 추정하기 위한 방법으로는 통계적 추정법, CFD(전산유체해석)를 활용하는 방법, 모형 시험을 통한 추정법으로 나눌 수 있다. 전자로 갈수록 정확도는 낮아지지만 비용과 효율면에서 장점을 갖으며, 후자로 갈수록 정확도는 향상되지만 비용과 시간이 많이 필요한 방법이다. 선박의 초기 설계시에는 추정의 정확도가 다소 낮더라도 신속한 추정 시스템이 필요하며, 실시 설계 단계에서는 정확한 추정 시스템이 필요하게 된다. 최근 컴퓨팅 능력의 비약적인 발전으로 인하여 CFD를 이용한 추정법이 초기 설계 단계에 활용될 수 있을 정도로 발전되었지만, 여전히 초기 설계 단계에서는 통계적인 추정법이 널리 사용되고 있다.

초기 설계 단계에서 저항 추정을 위한 방법으로 계열 시험 자료를 활용하는 방법과 모형선 저항 시험 결과를 통계적으로 분석하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 경우, C_b (방형계수), $L/\nabla^{1/3}$ (길이-배수량비), B/T (폭-흘수비), LCB (중방향부심)와 같은 주요 선형 변수에 대한 변화를 포함한 계열 선형의 저항 시험 결과를 이용한다. 경우에 따라서 특정 선형 변수에 따른 보정을 수행하기도 한다. 이와 같은 방법은 1930년대 테일러의 표준계열(Taylor standard series; Taylor, 1933) 실험을 시작으로, 이를 재분석한 Gertler의 차트(Gertler, 1954)가 있으며, NSMB (Netherlands Ship Model Basin)의 Lap 차트(Lap, 1956)가 이에 속한다. 이후 1965년에 Gulddammer and Harvald(1965)가 상선의 설계에 중요한 부분을 포함하는 실험 데이터를 공개한 바 있다. 후자의 경우는 유사한 선형들의 모형 시험 결과를 회귀 분석하여 저항 추정식을 얻어내는 방법으로, Holtrop 방법(Holtrop and Mennen, 1978, Holtrop and Mennen, 1982, Holtrop, 1984)이 가장 잘 알려져 있으며, 현재도

널리 사용되고 있다. Kim and Kim(1995)은 당시 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 모형시험 결과 데이터뱅크를 이용한 추진 성능 추정 방법을 발표한 바 있다. 최근에는 단순 회귀분석방법에서 발전된 신경망 이론을 적용한 선박의 저항 및 추진 성능 추정법(Kim and Park, 2015, Kim and Kim, 1998)에 대한 연구도 발표되고 있다.

전술한 바와 같이 전통적인 통계적 방법을 활용한 선박의 저항 성능 추정법은 그 분석 대상이 2000년대 이전의 선형들로서 최신의 선형 트렌드를 반영하지 못하는 단점을 안고 있으며, 최신 선형들에 대한 분석은 몇몇 대형 조선소들이 각사의 데이터베이스(DB)를 활용하여 추정법을 개발하여 사용하고 있으나, 그 결과들이 공유될 수 없는 상황으로 좁은 스펙트럼의 선형에 대한 추정법이 존재하는 것이 현실이다.

KRISO의 선형시험수조는 40여년의 역사를 통해 다양한 선종, 크기 등 넓은 스펙트럼의 선박에 대한 저항시험 결과를 보유하고 있다. 본 연구에서는 기계학습, 신경망이론 등의 진보된 통계 해석 방법을 이용한 저항 성능 추정의 전단계로서 KRISO가 보유한 저속비대선의 저항 시험 결과와 데이터베이스화 된 선형 변수를 회귀 분석하여 최신의 선형 트렌드를 반영하는 저항 추정식을 도출한다. 추정식의 검증을 위하여 Supramax 선형의 파생 선형들을 설계하고, 회귀식에 의한 저항 성능 추정치를 CFD 계산 결과, 모형시험 결과와 비교를 수행한다.

2. 통계 분석 대상

본 연구에서는 현재 국내 조선소의 신조 선형 중 약 40%를 차지하는 저속비대선을 대상으로 분석을 수행하였다(KOSHIPA, 2018). 대상선종은 벌크선과 탱커선을 포함한다. 분석에 사용된 선형은 총 163척(상세 선형변수 추출 선형)으로 모두 1990년 이후에 설계된 선형으로, 각 선형에 대한 상세 선형 변수를 추출하고 회귀 분석에 사용하였다. 분석에 사용된 선형의 용적 분포는 Fig. 1과 같이 MR급(Medium Range) 선형에서부터 VLCC급(Very Large Crude Carrier)까지 다양하게 분포되어 있음을 알 수 있다. Fig. 2는 대상 선형의 Cb 분포를 보이고 있다. 중간값은 0.825 근처로 정규성 분포를 보이고 있다. 대상 흘수 조건은 설계 흘수 조건으로 제한하였고, 밸러스트 흘수 조건은 분석 대상에서 제외하였다.

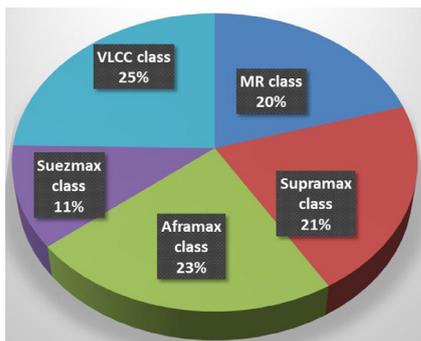


Fig. 1 Distribution of ship sizes

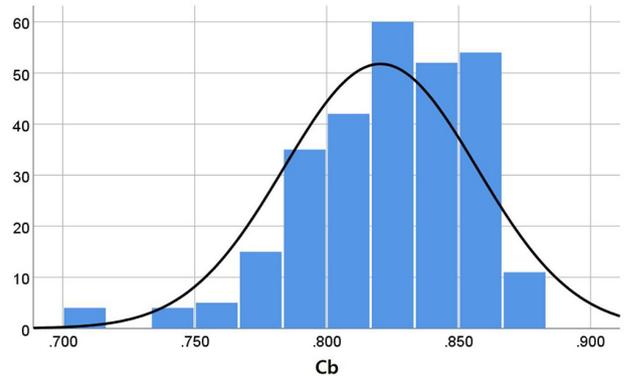


Fig. 2 Histogram of the Cb

3. 상세 선형 변수 정의

일반적으로 초기 설계시에 주어지는 선형 변수로는 수선간 길이(LBP; Length Between Perpendiculars), 폭(B; Beam), 흘수(T; draft), Cb, LCB, 배수량(∇)이다. 이러한 변수들은 선형의 전체적인 형상을 반영하는 값들로 국부적인 선형 변화의 영향을 판별할 수 있는 정보를 제공하기 어렵다. 따라서 국부적인 선형 변화에 따른 잉여저항계수의 변화를 반영하기 위해서는 상세 선형 변수들을 정의하고, 이 값들을 잉여저항계수와 연결하는 과정이 필요하다.

본 연구에서는 상세 선형 변수로서, 주요 제원을 포함한 형상 계수들(Fig. 3), 유체정역학적 계수들, Cp 곡선, Cp 곡선의 미분치, 선수 형상 관련 계수들(Fig. 4), 선미 형상 관련 계수들(Fig. 5), 무차원화된 오프셋 등 총 60여종의 선형 변수들을 정의 하였다(Table 1).

Table 1 Detail variables for hullform

| | Hullform variables |
|------------------------|---|
| Main particulars | LOA (length overall), B, LBP, LWL (length on waterline), LOS (length overall submerged), D (depth), ∇ (displacement), etc. |
| Geometric coefficients | Cb, Cba (aft Cb), Cbf (fore Cb), Cm (midbody coeff.), Cp (prismatic coeff.), Cpa, Cpf, Cw (waterplane area coeff.), Cwa, Cwf, etc. |
| Hydrostatic var. | LCB, KB, BM, KMT, etc. |
| Bow geometry | profile, bulb area ratio (bulbareaf, bulbareas), bulbl (bulb length), entrance angle at 19.25, 19.5, 19.75 st.(Fig. 6), etc. |
| Stern geometry | profile, shaftcen (shaft center height), tipclear (tip clearance), hullslope, run angle at 2, 2.5, 3 st.(Fig. 6), engine room breadth, etc. |

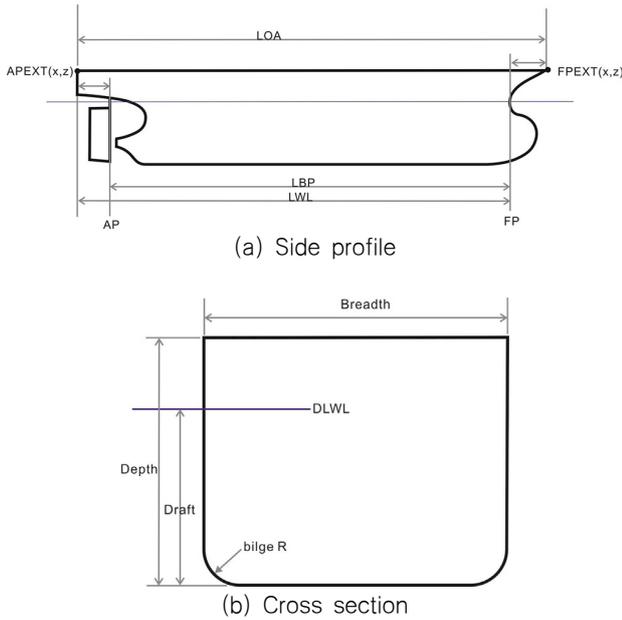


Fig. 3 Main particulars

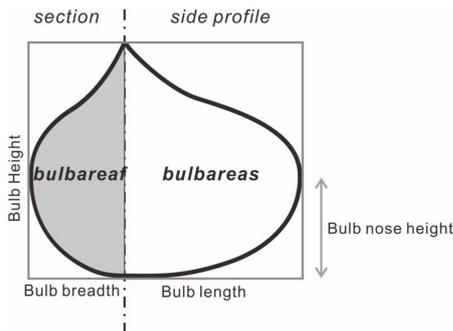


Fig. 4 Bow bulb shape

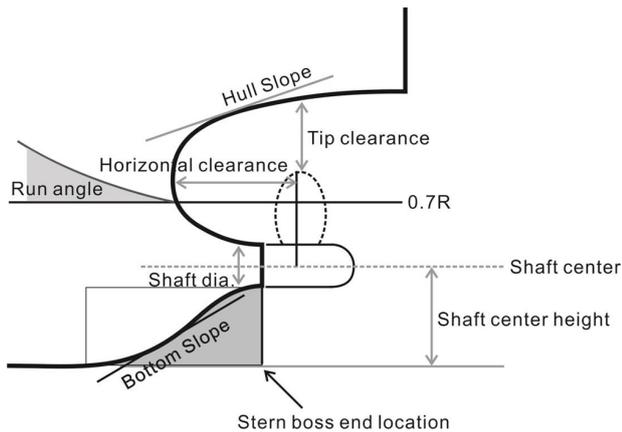


Fig. 5 Stern geometry

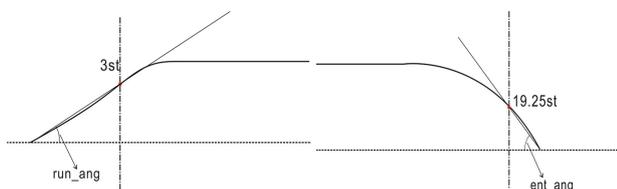


Fig. 6 Definition of run and entrance angles

이렇게 정의된 상세 선형 변수들은 IGES 형식의 선형도면 파일로부터 자동으로 추출되도록 하였으며, 데이터베이스화 하였다. 선형 변수들 중 흘수 조건에 따라 변하는 값들은 각각의 흘수 조건에 따라 정의되도록 하였다.

4. 잉여저항계수 회귀분석

본 연구에서는 잉여저항계수(Cr) 추정식을 도출하기 위하여 저속비대선을 Cb가 상대적으로 큰 선형(비대형 선형; blunt)과 작은 선형(세장형 선형; slender)으로 분류하여 분석을 실시하였다. 분류 기준은 2장에서 보인바와 같이 대상 선형의 Cb 평균값(0.825)으로 정하였다. Holtrop 방법에서는 3차원 해석법을 적용하여 선박의 저항 성분을 조파저항 성분과 형상저항 성분으로 나누어 형상 계수(k)와 조파저항계수(Cw)에 대한 회귀분석식을 도출하였다. 하지만, KRISO 선형 시험수조는 2차원 해석법을 사용하고 있기 때문에 본 연구에서는 잉여저항계수를 직접 회귀분석하는 방법을 사용하였다. 잉여저항계수는 ITTC-1957 모형선-실선 상관곡선의 마찰저항계수(Cf)와 전저항계수(CT)를 사용하여 얻어진 값을 사용하였다(Cr=CT-Cf). 먼저 Harvald(1965)의 방법과 유사하게 잉여저항계수에 가장 큰 영향을 주는 Fn(프루드 수)의 다항식으로 잉여저항계수를 근사하였다. 근사식은 Fig. 7과 같이 5차 다항식으로 정의하였으며, 각각의 결정계수(R²)는 0.635와 0.706으로 얻어진다. 5차 다항식은 다음과 같다.

$$Cr5p_{slender} = 1.176 - 16.152Fn + 216.865Fn^2 - 1092.559Fn^3 + 415.884Fn^4 + 8271.551Fn^5 \quad (1)$$

$$Cr5p_{blunt} = 4.983 - 122.474Fn + 1267.504Fn^2 - 4783.943Fn^3 - 2563.743Fn^4 + 41472.808Fn^5 \quad (2)$$

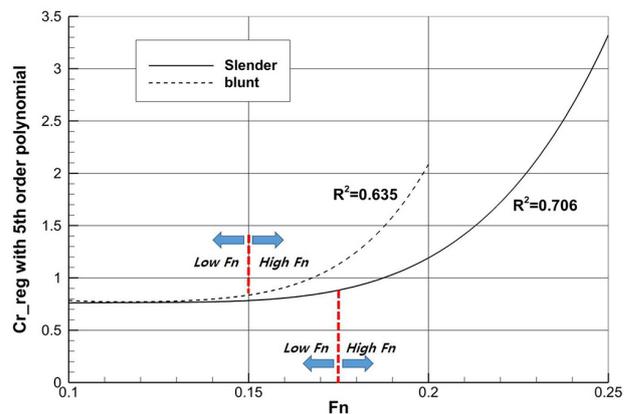


Fig. 7 Regression results for Cr by Fn polynomial

Fig. 7에서와 같이 Cr이 낮은 Fn 영역에서는 거의 일정하게 유지되다가 Fn가 0.15와 0.175 부근에서 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 조파저항 성분이 개입하는 시점으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 Fn를 기준으로 회귀분석 구간을 구분하여 해석을 수행하였다.

4.1 변수 선정

회귀분석식 도출에 사용된 상세 선형변수를 선정하기 위하여 먼저 상관 분석을 실시하였다. Fn의 다항식으로 근사한 Cr5p에 곱해지는 항과 더해지는 항을 결정하기 위하여 3장에서 정의한 상세 선형변수를 Cr5p에 곱한값을 새로운 변수로 설정하고 Cr과의 상관분석을 수행하였다. 상관분석을 통해 유의미할 것으로 판단되는 변수들을 선정하고, 이 변수들을 사용하여 회귀분석을 실시하였다. 최종적으로 회귀식에 사용된 상세 선형변수를 Table 2에 나타낸다.

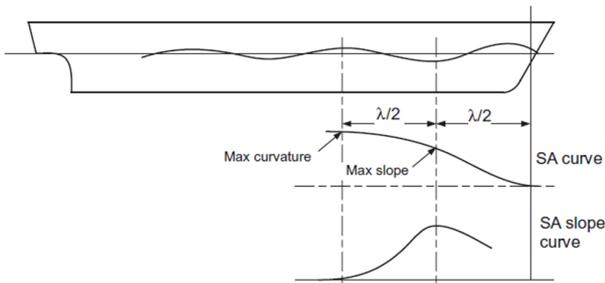


Fig. 8 Suitable location of maximum slope of SAC (Molland et al., 2017)

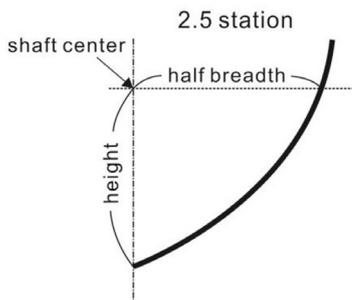


Fig. 9 Stern section to present the skag shape

Table 2 Local hull form variables adopted in the regression analysis

| Variables | Description |
|------------------|---|
| $L/\nabla^{1/3}$ | Length-displacement ratio |
| RA | Run angle at station 3 |
| EA | Entrance angle at station 19.25 |
| Cbf | Block coeff. of fore ship |
| Cba | Block coeff. of aft ship |
| Cwf | Waterplane area coeff. of fore ship |
| Cpaf | Prismatic coeff. ratio of aft and fore ship Cpa/Cpf |
| τ | Parameter of shape of skag in aft ship (Fig.9) Engine room breadth at 2.5 station/shaft center height |
| Vbulb | Parameter related with bow bulb volume (Fig. 4) bulbareaf×bulbares×T |
| L1 | Length between max. curvature position (Cp curve) and λ (Fig. 8) $ \lambda - \text{curvature max pos.} /LBP$ |
| L2 | $\lambda/(2 \times LBP)$ (Fig. 8) |
| λ | $LWL \times 2\pi Fn^2$ (Fig. 8) |

4.2 잉여저항계수 회귀 분석

회귀분석에 사용된 선형은 이상점(outlier)을 제외한 총 157 척이며, 비대형 선형 분석에 712 케이스, 세장형 선형 분석에 628 케이스의 Cr을 이용하였다. 전술한 바와 같이 Fn 구간을 나누어 분석하여 총 4개의 회귀식을 도출하였다.

$$Cr_{low} = (-0.098L/\nabla^{1/3} - 0.403L1 + 1.491Cpaf) Cr5p + 0.305\tau - 0.324RA - 0.221 \tag{4}$$

$$Cr_{high} = (2.422Cb + 2.272L1 - 0.031V_{bulb} - 1.603Cpaf) Cr5p + 0.569\tau - 0.834RA + 7.843L2 - 0.968$$

$$Cr_{slender} = \begin{cases} Cr_{low} & \text{at } Fn \leq 0.16 \\ \frac{Cr_{low}(0.19 - Fn) + Cr_{high}(Fn - 0.16)}{0.03} & \text{at } 0.16 \leq Fn \leq 0.19 \\ Cr_{high} & \text{at } 0.19 \leq Fn \end{cases}$$

$$Cr_{low} = (-0.564L/\nabla^{1/3} + 3.592Cb + 0.734EA - 3.748Cbf + 4.627Cwf + 0.464L1) Cr5p + 0.157\tau + 2.149L2 \tag{5}$$

$$Cr_{high} = (-0.521L/\nabla^{1/3} + 22.911Cb + 1.47EA - 15.623Cbf + 8.736Cwf + 2.014L1 - 0.014V_{bulb} - 10.123Cpaf) Cr5p + 0.215\tau + 7.416L2 - 0.646$$

$$Cr_{tkunt} = \begin{cases} Cr_{low} & \text{at } Fn \leq 0.135 \\ \frac{Cr_{low}(0.165 - Fn) + Cr_{high}(Fn - 0.135)}{0.03} & \text{at } 0.135 \leq Fn \leq 0.165 \\ Cr_{high} & \text{at } 0.165 \leq Fn \end{cases}$$

4.1절에서 보인 유의미할 것으로 판단된 변수들을 이용하여 Cr 회귀분석을 실시하였다. 회귀식은 다음과 같은 형태로 정의하였다.

$$Cr_{reg} = Cr5p \cdot \sum_1^n a_i V_i + \sum_{n+1}^m a_i V_i \quad (3)$$

여기서 a_i 는 회귀계수를, V_i 는 상세 선형변수를 의미한다.

회귀분석은 먼저 모든 독립변수를 포함하여 분석후 회귀계수의 유의확률(P)을 검토하여 0.05보다 큰 변수들은 유효하지 않다고 판단하고 제거하는 방식을 사용하였다. 또한 변수들간의 공선성을 판단할 수 있는 분산 팽창 인수(MF; Variance Inflation Factor)를 사용하여 공선성이 있는 변수들을 제거하였다. Fn가 큰 구간과 작은 구간에서 각각 회귀분석을 수행하였기 때문에 불연속점이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 Fn의 앞뒤 0.03의 구간을 블렌딩하는 방법을 사용하였다. 식 (4)와 (5)는 분석을 통해 얻어진 세장형 선형과 비대형 선형의 Cr 회귀식을 보인다.

Fig. 10과 11은 비대형 선형과 세장형 선형의 모형시험 Cr과 상세 선형변수로 예측한 Cr의 비교를 보인다. 전체적으로 결정계수 0.91로 회귀식으로 설명할 수 있는 확률이 90퍼센트 이상임을 알 수 있다. 회귀식을 이용하여 예측된 Cr을 모형선의 R_T (전저항)로 환산하여 표시하면 Fig. 12, 13과 같다. 가로축이 모형시험에서 얻어진 값이며, 세로축은 회귀식으로부터 얻어진 값으로 회귀식이 모형시험의 값을 100% 정확히 예측할 경우, 모든 점이 기울기가 1인 점선상에 놓이게 된다. R_T 가 커지는 높은

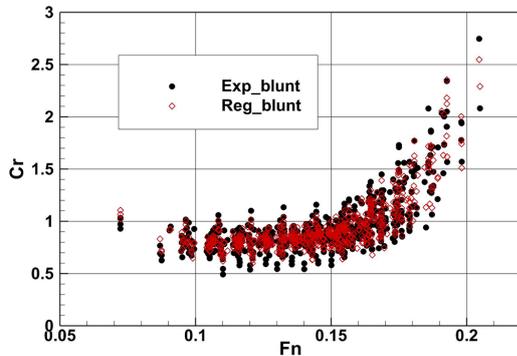


Fig. 10 Regression results for blunt hull forms

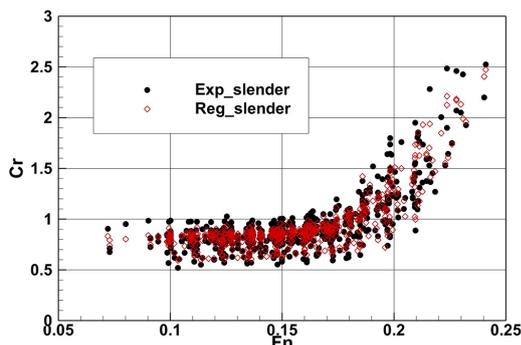


Fig. 11 Regression results for slender hull forms

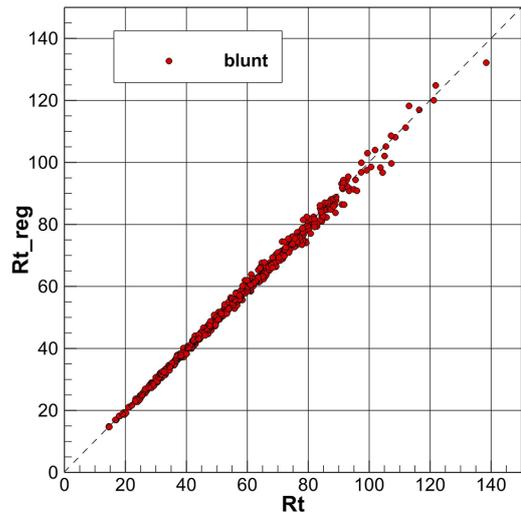


Fig. 12 RT prediction of blunt hull forms

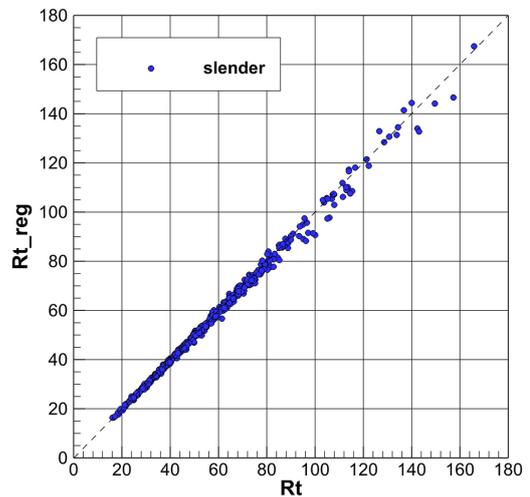


Fig. 13 RT prediction of slender hull forms

Fn 영역에서 상대적으로 예측 오차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 추정 평균 오차는 비대형 선형의 경우 약 1.7%, 세장형 선형의 경우 약 1.6%로 나타났다.

Fig. 14는 3척의 샘플 선형의 Cr 예측치를 Holtrop 방법 (Holtrop and Mennen, 1978)으로 계산한 Cr과 비교한 결과이다. 일부 선형에서는 Holtrop 방법의 예측치와 유사한 결과를 주는 경우도 있으며, 일부 선형에서는 저속영역에서 Holtrop 방법보다 개선된 결과를 보인다. 이는 Holtrop 방법의 추정식이 예전 선형들의 실험 결과에 바탕을 두고 있으며, 현재 방법에서 사용된 국소 선형 변수들을 고려하지 않았고, 본 연구가 저속비대선이라는 대상선에 더욱 초점이 맞춰진 것에 기인하는 것으로 판단된다.

데이터베이스화된 상세 선형 변수들과 모형 시험에서 얻어진 잉여저항 계수(Cr)를 이용하여 추정식을 도출하기 위한 과정을 정리하면 다음과 같다.

- $C_b=0.825$ 를 기준으로 상대적으로 세장형($C_b \leq 0.825$)의 선형과 비대형($C_b > 0.825$) 선형으로 분석 대상을 분류한다.

- 각 선형 분류에서 Cr을 1차 회귀분석하여 Fn의 5차 다항식으로 표현되는 회귀식을 도출한다.
- 각 선형 분류에서 Fn를 기준으로 고속영역과 저속영역으로 회귀분석 구간을 분류한다.
- 각 회귀분석 구간에서 Fn 다항식으로 표현된 Cr과 상세 선형 변수를 이용하여 최종 회귀식을 도출한다.

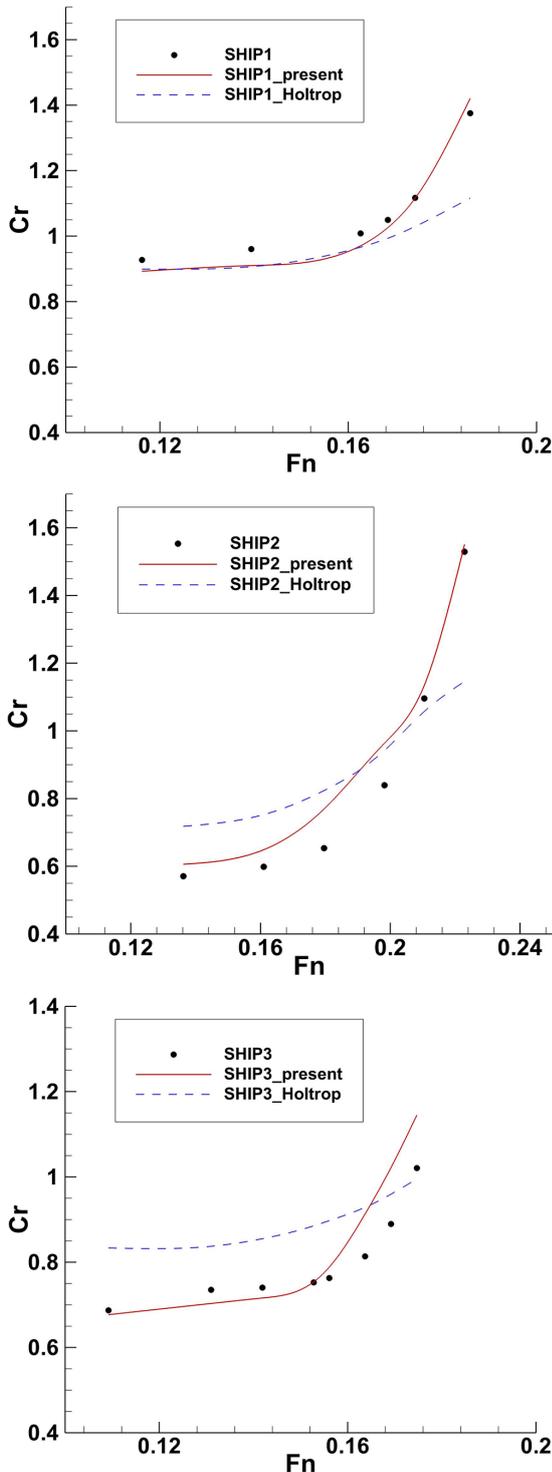


Fig. 14 Comparison of Cr prediction for sample hull forms of Holtrop's formula and the present method

4.3 주요목을 이용한 잉여저항계수 추정

선박의 초기 설계 단계에서 선형의 상세 형상 변수를 모두 정의하는 것은 사실상 어렵다. 따라서 주요목(LBP, B, T, Cb, ∇, LCB) 만으로 어느정도 신뢰할 수 있는 저항 성능을 예측하는 방법이 필요하다. 4.2에서 상세 선형 변수로 표현되는 Cr 추정식을 도출했기 때문에, 각 상세 선형 변수를 주요목으로 추정하는 식을 정의하면 상기의 목적을 달성할 수 있다.

Table 3 Regression formula of the hull form variables

| Variable | Regression formula | R ² |
|---------------------------|---|----------------|
| LWL | 0.985+1.015LBP | 1.0 |
| Cbf | -0.007+1.006Cb+0.022LCB | 0.999 |
| Cba | 0.007+0.994Cb-0.022LCB | 0.998 |
| Cwf | 0.255+0.758Cbf-0.009B/T | 0.943 |
| Cpaf | 0.902-0.049LCB+0.057Cb+0.011L/∇ ^{1/3} | 0.967 |
| EA[rad] | 2.442+0.084L/B-4.193Cwf | 0.912 |
| RA[rad] | -0.709+1.715Cba-0.124L/B+0.139L/∇ ^{1/3} -0.000332LBP | 0.682 |
| τ | -7.693+0.39B/T+10.867Cba+0.024T | 0.714 |
| Cp curvature max pos./LBP | -0.118+0.011L/B-0.011LCB+1.001Cbf | 0.737 |
| Vbulb | 4.18-1.334B/T-1.593L/∇ ^{1/3} +0.035LBP+8.341Cb | 0.888 |
| WSA | LBP(52.998+0.046Cb·B·T-3490.667/LBP) | 0.999 |

상세 선형 변수에 대한 회귀식은 주요목에 대한 선형식으로 가정하였으며, 상세 선형 변수가 포함된 식도 주요목을 이용하여 순차적으로 계산할 수 있는 형태로 구성하여, 실제로 상세 선형 변수의 일부를 알고 있는 경우에도 활용할 수 있도록 하였다. Table 3은 도출된 상세 선형 변수에 대한 회귀식을 보인다. 결정계수는 0.7~1.0 수준을 보이며, 결정 계수가 낮은 변수들로 인하여 최종 Cr의 경우, 상세 변수로 표현된 Cr보다 결정계수가 다소 낮아질 것을 예상할 수 있다. Fig. 15는 선수부의 수선면적계수의 회귀분석 결과 예를 보인다.

Fig. 16과 17은 각각 비대형 선형과 세장형 선형에 대하여 주요목으로 추정한 Cr과 모형시험 결과의 비교를 보인다. 주요목만을 사용하기 때문에 선형의 국부적인 형상에 대한 반영이 적극적으로 못하여 상세 선형 변수를 사용한 결과에 비하여 상대적으로 Cr5p 주변에 결과가 다소 집중되에 나타나는 것을 볼 수 있으며, 세장형 선형의 경우 높은 Fn 영역에서 Cr을 다소 과대평가하는 경향이 보인다. 조파저항 성분이 선박의 국부적인 형상에 더 의존하는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 전체적인 결정계수는 약 0.86으로 상세 선형 변수를 사용한 결과에 비해 떨어지는 결과를 주고 있다.

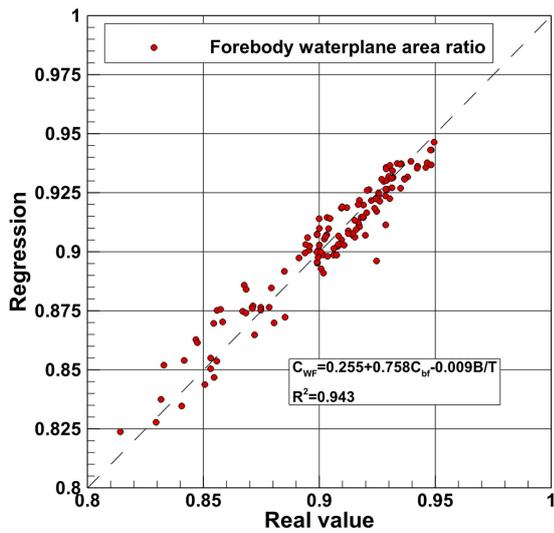


Fig. 15 Regression result of forward waterplane area coefficient

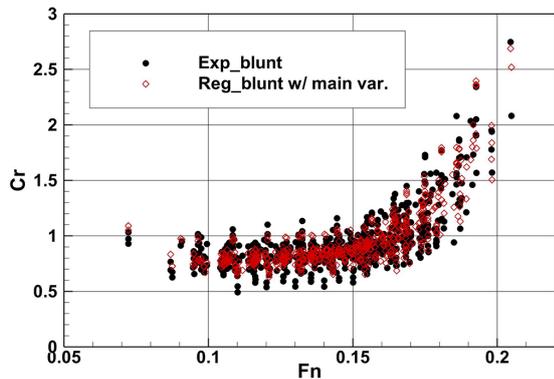


Fig. 16 Regression results for blunt hull forms with main dimensions

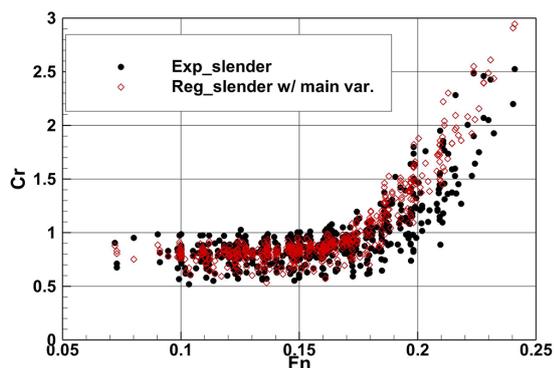


Fig. 17 Regression results for slender hull forms with main dimensions

5. 잉여저항계수 추정식의 검증

본 연구에서 도출된 C_r 추정식의 검증을 위해서, Supramax 급 선형을 대상으로 선형 변환을 실시하고, 추정식에 의한 C_r 추정값과 CFD 계산 결과를 비교하고, 이를 바탕으로 최종

결정된 선형에 대한 모형시험을 수행하여 정량적 차이를 검증하였다.

5.1 대상선

추정식 검증을 위한 기준선으로 Supramax급 선형을 선정하였다. 본 선형은 공개 선형으로 정수 중 선형 최적화 및 파랑중 부가저항 저감 선형 개발에서 기준선으로 사용된 바 있다 (KRISO, 2016). 주요 제원은 Table 4에 표시한다. Fig. 18은 모형시험 데이터베이스 상의 벌크선들의 C_b 분포와 대상선의 위치를 보이고, Fig. 19는 C_b 가 0.83에서 0.85사이의 벌크선들의 C_r 분포와 대상선의 C_r 를 비교한 그림이다. 그림에서와 같이 현재의 대상선은 저항성능이 상대적으로 불리한 제원을 갖고 있음을 알 수 있으며, 실제로 데이터베이스 상의 유사 선형에 비해서 상대적으로 큰 C_r 를 갖는 선형이다.

Table 4 Principal dimension of the Supramax 60K

| Hullform | Supramax DB org. |
|-------------------------|------------------|
| LBP[m] | 192.0 |
| B[m] | 36.0 |
| T[m] | 11.2 |
| Volume[m ³] | 65,028 |
| LCB[% from midship] | 3.0 |
| C_b [-] | 0.84 |
| Design Speed[knot] | 14.5 |

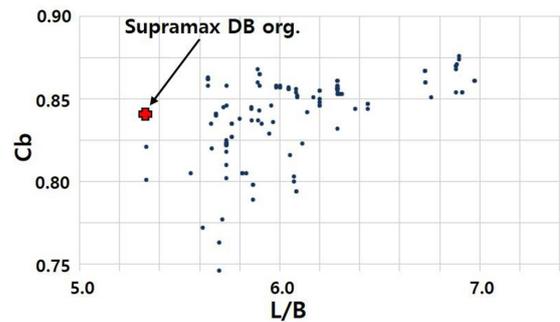


Fig. 18 L/B- C_b distribution

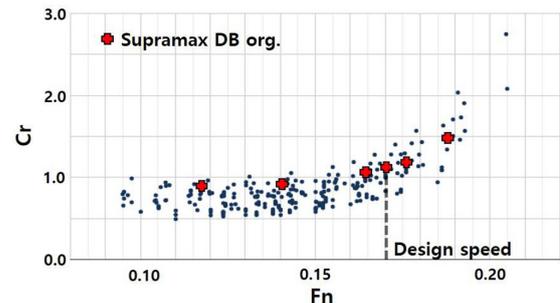


Fig. 19 C_r of the Supramax DB org.

5.2 선형 변환 및 잉여저항계수 추정

선형 변환은 일반적으로 조선소에서 수행하는 LCB의 위치를 조정하는 방법, 유사 실적선의 lines를 활용하는 방법, 부분적인 부피 분포를 조정하는 방법을 활용하였다. Table 5는 각 선형 변환의 방법을 보인다. M1 선형은 기준선에서 LCB의 위치를 선미방향으로 이동한 것이고, M2는 유사 실적선의 선형을 기준선의 L, B, T에 맞춘 것으로 기준선 대비 약간의 용적 감소가 있다. M3는 M2 선형의 LCB 위치를 이동한 것으로 여전히 용적 감소가 있는 선형이며, M4는 M3 선형의 부피 부족분을 선미 상부에 보충하여 기준선과 배수량을 맞춘 선형이다.

각각의 변환된 선형으로부터 상세 선형 변수를 추출하고 추정식을 이용하여 Cr을 예측하고, CFD 저항 계산을 병행하여 비교를 수행하였다. CFD 계산은 KRISO의 in-house 코드인 WAVIS(Kim et al., 2011)를 활용하였다. Fig. 20은 상세 선형 변수를 사용하여 얻어진 각 선형의 Cr을, Fig. 21은 CFD 계산을 통하여 얻어진 Cr을 보인다.

M1 선형의 경우, LCB가 선미방향으로 이동하면서 선수 부분이 날씬해지는 결과로 인해 높은 Fn 영역에서 Cr이 감소하는 경향을 잘 예측하고 있다. CFD 계산 결과는 추정식의 결과와 비교하여, 전 Fn 영역에서 Cr 감소를 예측하는 부분에서 차이를 보인다. M2 선형의 경우, 새로운 lines로, 기준선 대비 형상 저항 성분이 감소하는 경향을 보이지만, 조파저항 성분의 많은 개선은 없는 것으로 예측하고 있다. CFD 결과도 유사한 경향을

Table 5 Hull form variation strategy

| Hull form | Variation strategy | Volume change |
|-----------|--|---------------|
| M1 | LCB 3% → 2.5% | - |
| M2 | Modifying a mother ship with constraints of the Supramax DB org. | decrease |
| M3 | M2 LCB 3.5% → 2.5% | decrease |
| M4 | Changing M3 stern volume distribution | - |

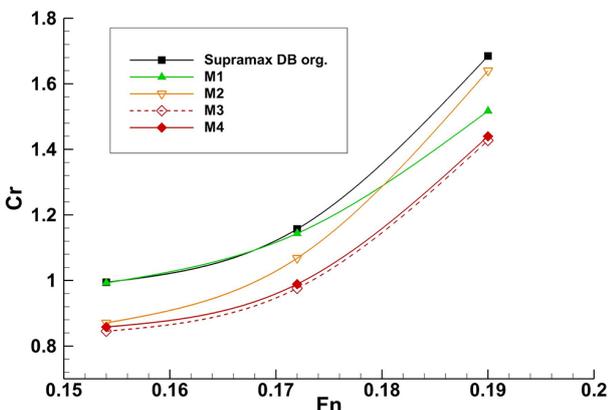


Fig. 20 Cr prediction based on DB regression

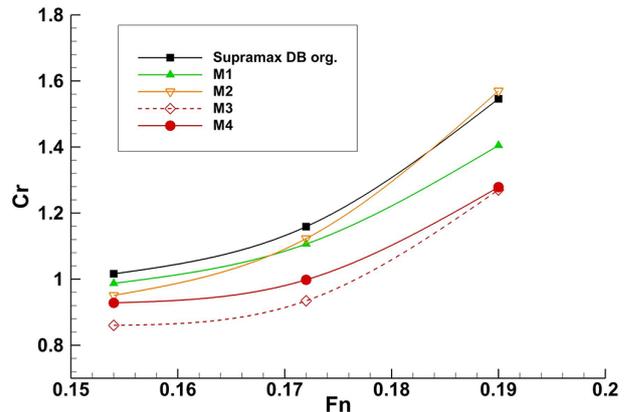


Fig. 21 Cr prediction based on CFD analysis

보인다. M3 선형은 조파저항 성분 감소를 위해 LCB를 선미로 이동 시킨 결과, 전 영역에서 고른 저항 감소를 보인다. M4 선형의 경우, 기준선의 제한 조건을 만족하기 위해 부피의 추가가 이루어져 M3 선형에 비해 약간의 저항 증가를 예측하고 있다. 전반적으로 정량적인 차이는 다소 발생하고 있으나, 추정식을 이용한 예측과 CFD 계산 결과의 경향성은 매우 좋은 일치를 보임을 알 수 있다. 결과를 바탕으로 최종적으로 M4 선형을 Supramax 기준선의 개선 선형으로 선정하였다.

5.3 모형 시험을 통한 검증

M4 선형을 최종 개선 선형으로 선정 후, Supramax 기준선(Supramax DB org.)과 M4 선형(Supramax DB opt.)에 대한 모형 시험을 수행하였다. 모형 시험은 KRISO 선형 시험 수조에서 수행되었다. Fig. 22는 선수부분의 생성된 파의 형태를 비교한



Fig. 22 Comparison of developed waves

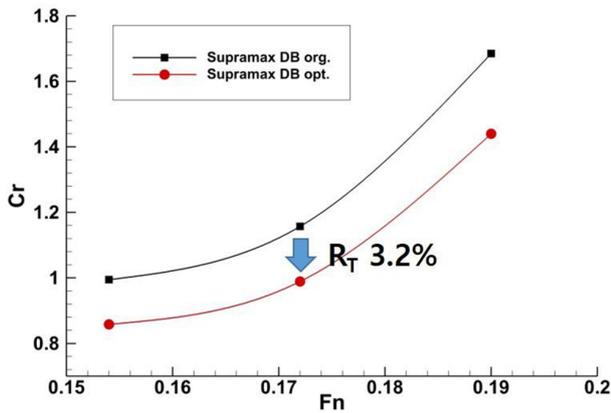


Fig. 23 Cr prediction of Supramax DB opt.

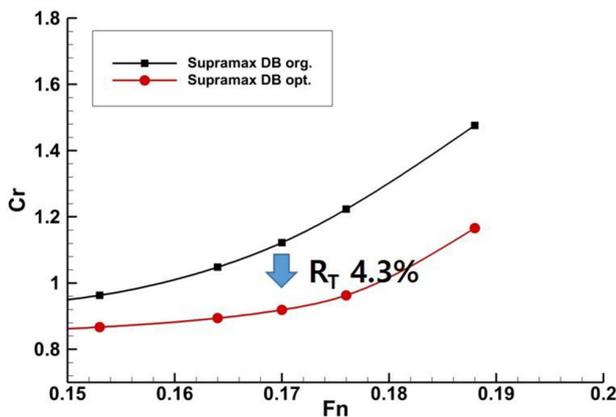


Fig. 24 Results of the model test

그림이다. 조파저항 성분의 개선을 확인할 수 있다. Fig. 23은 Supramax DB opt. 선형에 대한 Cr 추정 결과를 보이고, Fig. 24는 모형시험 결과를 보인다. 저항성능 개선 효과가 전 Fn 영역에서 보인다. 설계 속도 기준 전저항 저감량은 추정식이 약 3.2%, 모형시험이 약 4.3% 결과를 보여준다. DB 추정식에 의한 Cr 예측은 모형시험과 정량적 차이는 다소 있지만, 충분히 활용 가능한 수준의 예측을 보여주고 있다. 다만 높은 Fn 영역에서 예측도가 다소 떨어지는 것은 Fig. 10, 11에서 보이는 바와 같이 높은 Fn 영역의 데이터 수가 절대적으로 부족한 것에 기인한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 데이터베이스 기반 저항 추정식들이 비교적 시기적으로 오래된 결과에 바탕을 두고 있는 점을 개선하기 위하여 1990년대 이후 KRISO에서 수행된 모형 시험 결과를 이용하여 저속비대선의 잉여저항계수(Cr)를 추정하는 식을 새롭게 제안하였다. 추정식의 정도를 높이기 위해 선형의 국부 형상을 반영할 수 있는 상세 선형 변수들을 정의하고, 회귀분석에 사용하였다. 또한 초기 설계시 필요한 주요목 만으로의 예측을 위하여 각 상세 선형 변수들을 주요목으로 회귀분석하여 추

정식을 제안하였다. 몇몇 샘플 선형에서 기존 Holtrop 방법에 비해 개선된 결과를 확인할 수 있었으며, 선형 변화에 따른 Cr 변화를 CFD 결과와 비교하여 그 경향성을 확인할 수 있었다. 실제 모형 시험 결과와 비교를 통하여 총저항 추정에 있어서 정량적 차이는 있지만 충분히 활용 가능한 수준임을 확인하였다.

현재의 대상 선형인 저속비대선 이외에 컨테이너선, LNG선 등의 중고속선에 대한 연구가 필요하며, 프로펠러 데이터베이스 구축과 함께 추진 성능 예측에 대한 후속 연구가 필요하다고 생각된다. 또한 다소 전통적인 회귀분석 방법에서 발전된 신경망 이론, 기계학습을 활용한 통계적 접근 방법의 시도도 필요할 것으로 생각된다.

후기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 “KRISO 모형시험 및 선형정보 DB 구축과 DB 분석시스템 기반기술 개발”로 수행된 결과입니다.(PES3210).

References

- Gertler, M., 1954. *A reanalysis of the original test data for the Taylor standard series*. Navy Department The David W. Taylor Model Basin, Report 806.
- Guldhammer, H.E. & Harvald, Sv. Aa., 1965. *Ship resistance effect of form and principal dimensions*, Akademisk Forlag, Copenhagen.
- Holtrop, J., 1984. A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, 31, pp.272-276.
- Holtrop, J. & Mennen, GGJ., 1982. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 29, pp.166-170.
- Holtrop, J. & Mennen, GGJ., 1978. A statistical power prediction method. *International Shipbuilding Progress*, 25, pp.253.
- Kim, E.C., & Kang, K.J., 1995. Study on the prediction method of ship's powering performance using the data bank. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 32(2), pp.68-74.
- Kim, H.C., & Park, H.G., 2015. Practical application of neural networks for prediction of ship's performance factors. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(2), pp.111-119.
- Kim, J., Park, I.R., Kim, K.S., Van, S.H., & Kim, Y.C., 2011. Development of a numerical method for the evaluation of ship resistance and self-propulsion

performances. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.147–157.

Kim, S.Y., & Kim, H.C., 1998. A development of neurofuzzy system for a conceptual design of ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(3), pp.79–87.

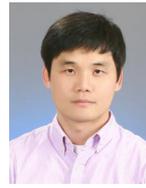
KOSHIPA, 2018. *Shipbuilding yearbook*, pp.48

KRISO, 2016. *Development of the key technology for a ship drag reduction and propulsion efficiency improvement*. Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Final report.

Lap, A.J.W., 1956. Resistance (Fundamentals of ship resistance and propulsion). *International Shipbuilding Progress*, 3(24), pp.441.

Molland, AF., Turnock, SR., & Hudson, DA., 2017. *Ship resistance and propulsion*. Cambridge university press.

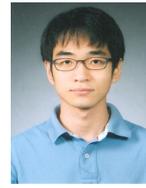
Taylor, DW., 1933. *Speed and power of ships*. Washington, DC: Press of Ransdell.



김유철



김명수



양경규



이영연



임근태



김진



황승현



김정중



김광수