

상사 모형선들의 실험결과를 이용한 실선의 형상계수 추정에 관한 연구

하윤진¹·이영길^{2,†}·강봉한¹
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 항공조선산업공학부 조선해양공학전공²

A Study on the Estimation of the Form Factor of Full-Scale Ship by the Experimental Data of Geosim Models

Yoon-Jin Ha¹·Young-Gill Lee^{2,†}·Bong Han Kang¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University, Incheon, Korea¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea²

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.

Generally, form factor is determined through ITTC method. Determining the form factor from ITTC method includes the assumption that the form factor of a full-scale ship is the same value as its model ship. In other words, the form factor is independent on Reynolds number. However, for the more appropriate prediction of the resistance performance of a full-scale ship, the form factor must be determined with the consideration of the variation attendant on Reynolds number. In this research, several Geosim ship models are adopted to investigate the scale effect, and correlation lines of form factor are improved to suggest the better extrapolation method for the prediction of the form factor of full-scale ship. The corrected form factors using the correlation lines are compared with those determined from the results of low-speed resistance tests. To consider the influence of hull form, the correlation lines are determined for the group of high-speed ships and the group of low-speed ships, respectively. The corrected form factors have shown good agreement among the prediction results from each Geosim ship model to the full-scale ship.

Keywords : Form factor(형상계수), Geosim model test(상사모형시험), Scale effect(축척효과), Resistance coefficient(저항계수)

1. 서론

선박의 유체역학적 성능평가는 대부분 모형시험을 이용하기 때문에, 선박유체분야에서 모형시험에 의한 결과들은 매우 중요한 자료가 된다. 선박의 모형시험 시에는 실선과 모형선의 프루드 수(Froude number)와 레이놀즈 수(Reynolds number)를 동시에 일치시키지 못하기 때문에, 프루드 상사법칙에 따라서 모형시험을 실시하게 된다. 그러므로 모형시험의 경우에는 모형크기가 제한이 되어 있으므로 인하여 실선의 대형화로 인하여 상대적으로 실선에 비하여 매우 작아진 모형선을 사용하게 됨에 따라 척도의 영향이 예전보다 크게 발생하게 된다. 즉, 예전보다 실선과 모형선의 큰 레이놀즈 수 차이로 인하여 실선과 모형선 주위의 유동이 크게 다르며, 이러한 영향으로 인하여 레이놀즈 수에 지배적인 영향을 받는 형상계수, 반류 등에도 실선과 모형선에서 많은 차이를 보이게 된다. 이러한 척도의 영향에 대하여 레이놀즈 수에 의한 영향을 고찰해 보고자, 최근에는 수치해석 기법과

계산기의 발전으로 인하여 수치시뮬레이션을 이용한 실선 크기의 선체주위 유동해석 연구가 많이 수행되고 있다 (Choi, et al., 2011; Kim, et al., 2011). Choi, et al. (2011)은 수치시뮬레이션을 이용하여 실선과 모형선의 축척효과에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에 따르면, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 선미부에 빠른 압력회복이 나타나며, 경계층 두께가 얇아져 유속이 빨라지고 축방향 속도가 증가함을 확인하였다.

1978년에 ITTC에서는 형상계수를 채택하여 3차원 외삽법으로 실선의 저항성능을 추정하는 방법을 제안한다. 그로 인하여 형상계수를 결정하는 저속모형시험이 실선의 저항성능을 추정함에 있어서 매우 중요한 역할을 하여 왔다. ITTC 방법에서는, 형상계수가 레이놀즈 수의 변화와 관계없이 실선과 모형선에서 형상계수를 동일하게 사용하고 있다. 이에 대하여 Choi, et al. (2011)과 García-Gómez (2000), Min and Kang (2010)의 연구에서는 수치해석과 모형시험결과를 통하여 레이놀즈 수가 증가함에 따라 형상계수가 증가함을 보였으며, 이와 더불어 García-Gómez

(2000)과 Min and Kang (2010)의 연구에서는 모형시험 자료들을 이용하여 레이놀즈 수의 영향을 고려한 실선의 형상계수 추정 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 선형과 모형시험 자료들이 공개된 선형들인 KVLCC2, KLNG 그리고 KCS 선형을 대상선형들로 선정하고, 이들에 대하여 모형시험을 수행하였다. 먼저, 인하대학교 선형시험수조(IUTT)가 대상선형들의 실선 크기에 비하여 그리 크지 않은 관계로, 한국해양과학기술원 선박해양플랜트 연구소(MOERI)의 모형시험 결과들 중에 본 선형시험수조에서 실험한 모형선과 동일한 축척비를 가지는 모형선에 대한 두 수조의 실험결과를 비교하여 그 실험정도를 검증하였다. 이러한 실험정도의 검증 후에, 레이놀즈 수의 변화를 고려한 형상계수 추정방법들을 실험결과들에 적용시켜 그 결과를 서로 비교 분석하였다. 또한, 대상선형들에 적용된 현행의 형상계수 추정방법들 보다 더 실선의 형상계수 예측에 효과적일 것으로 생각되는 수정된 형상계수 추정방법을 제안하였다. 또한 ITTC 1978년 방법에서 마찰저항곡선은 ITTC 1957년 모형선-실선 상관곡선을 기반으로 하기 때문에 모든 실험결과들의 해석은 ITTC 1957년 모형선-실선 상관곡선으로 하였다.

2. 대상 모형

본 연구에서는 선형과 모형시험 자료들이 공개되어 있고, 설계속력에서의 레이놀즈 수와 방형계수(C_B)가 서로 다른 KVLCC2와 KLNG, KCS 선형을 대상선형으로 선정하였다. Table 1은 각 선형들에 대한 축척비를 나타낸다.

Table 1 Principal dimensions of the KVLCC2, KCS and KLNG

	Ship model name		
	KVLCC2	KCS	KLNG
	Full scale		
L_{BP}	320.00m	230.00m	266.00m
L_{WL}	325.50m	231.40m	263.87m
B	58.00m	32.20m	42.60m
T	20.80m	10.80m	11.30m
Dis.	312622.00m ³	52030.00m ³	95940.00m ³
W.S.A [w/rudder]	27467.30m ²	9630.30m ²	13982.00m ²
C_B	0.81	0.65	0.75
Design speed	15.5Knot	24knot	19.5knot
Model scale ratios	1/160, 1/100, 1/58	1/160, 1/97, 1/63.2, 1/31.6	1/103, 1/69, 1/34

3. 저항실험 정도의 검증

본 연구에서는 인하대학교 선형시험수조의 실험결과와 한국해양과학기술원 선박해양플랜트 연구소(MOERI)의 모형시험 결과를 서로 비교하기 위하여, MOERI에서 제작된 동일 모형선, 동일 축척의 모형선들에 대한 저항실험을 수행하였다. KVLCC2 선형은 1/100, KLNG 선형은 1/69, KCS 선형은 1/63.2 축척비의 동일 모형선들을 사용하였다. 본 선형들은 벽효과에 의한 영향을 받지 않을 정도의 크기이다(blockage ratio가 1%이내). 각 선형시험수조마다 모형선-실선 상관계수나 수조 물의 온도 등이 다르기 때문에, 모형시험 결과의 직접적 비교를 위하여 세 가지 선형들의 모형시험 결과들 중 잉여저항계수를 택하여 서로 비교하였다. Fig. 1을 보면, 세 가지 모형선들에 대한 각각의 프루드 수에 따른 잉여저항계수는 약 5% 이내로 두 선형시험수조의 모형시험 결과가 매우 근접하고 있는 것을 확인할 수 있다. 잉여저항계수 약 5%정도의 차이는 일반적인 실험결과들의 실험오차라 생각된다. 따라서 이는 본 연구의 상사모형시험에 대한 연구 수행에 있어서, 본 선형시험수조에서 모형시험이 어려운 크기의 모형선은 공개되어진 자료를 바탕으로 형상계수를 직접 추정하였으며, 동일 모형크기 모형선과 그 외 모형선들은 인하대학교에서 수행되어진 모형시험결과들을 이용하여 형상계수를 추정하였다.

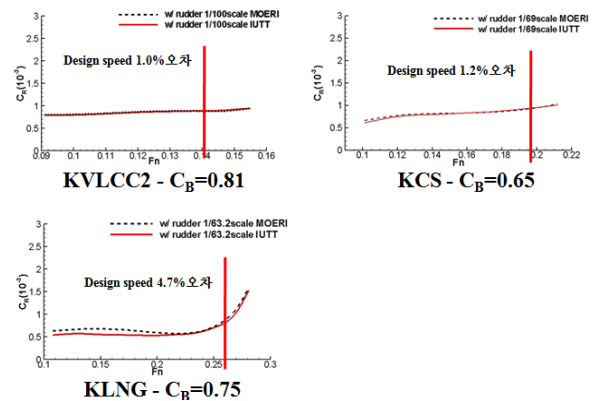


Fig. 1 Comparison of experimental results for the conventional resistance test in the two towing tanks

4. 실선 형상계수 추정기법에 있어서 대표적인 연구들

Choi, et al. (2011)과 García-Gómez (2000), Min and Kang (2010) 등의 연구에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 형상계수가 증가함을 보였으며, 특히 García-Gómez (2000)과 Min and Kang (2010)의 연구에서는 상사 모형시험 자료들을 이용하여 레이놀즈 수의 영향을 고려한 실선의 형상계수 추정 방법을 제안한 바가 있다.

García-Gómez (2000) 연구의 경우 축척이 다른 4 가지 선형

의 모형선들에 대한 형상계수를 모형시험으로부터 구하고, 각 선형마다 실선의 형상계수를 얻어내기 위하여 각 선형별로 축척비에 따른 형상계수의 분포를 고찰하였다. 그리고 최소자승법(1차 근사식에 대한)을 이용하여 오차의 제곱들을 검토함에 따라 신뢰성이 높은 추정식을 구하여 각 선형들의 실선 형상계수를 얻어내었다. 이들 각 선형마다 얻어진 실선 형상계수와 모형선의 그것과의 차를 전체 선형들에 대하여 축척비에 따라 나열하고, 최종적으로 다른 일반 선형들에 적용 가능한 추정식을 제안하였다. 한편, Min and Kang (2010)은 모형선과 실선 형상계수의 비가 실선의 레이놀즈 수에 가까워질수록 1에 수렴한다고 보고, 다양한 선형들에 대하여 모형선과 실선의 형상계수 상관곡선을 쌍곡선함수의 형태로 근사하여 실선의 형상계수를 추정하는 방법을 제안하였다. García-Gómez (2000)의 방법과 Min and Kang (2010)의 방법은, 모두 ITTC 1978년 방법과 마찬가지로 모형선의 형상계수를 추정하는데 있어 Prohaska 방법 (Prohaska, 1996)을 사용하기 때문에, 정도 높은 저속 저항시험이 필요하게 된다. 레이놀즈 수에

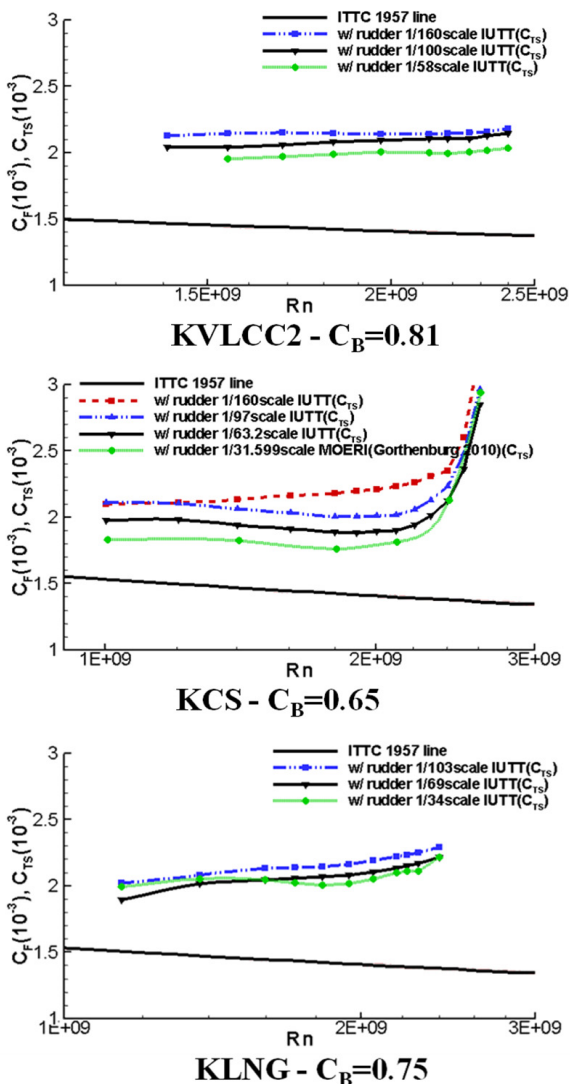


Fig. 2 Estimations of total resistance coefficients by the method of García-Gómez (2000)

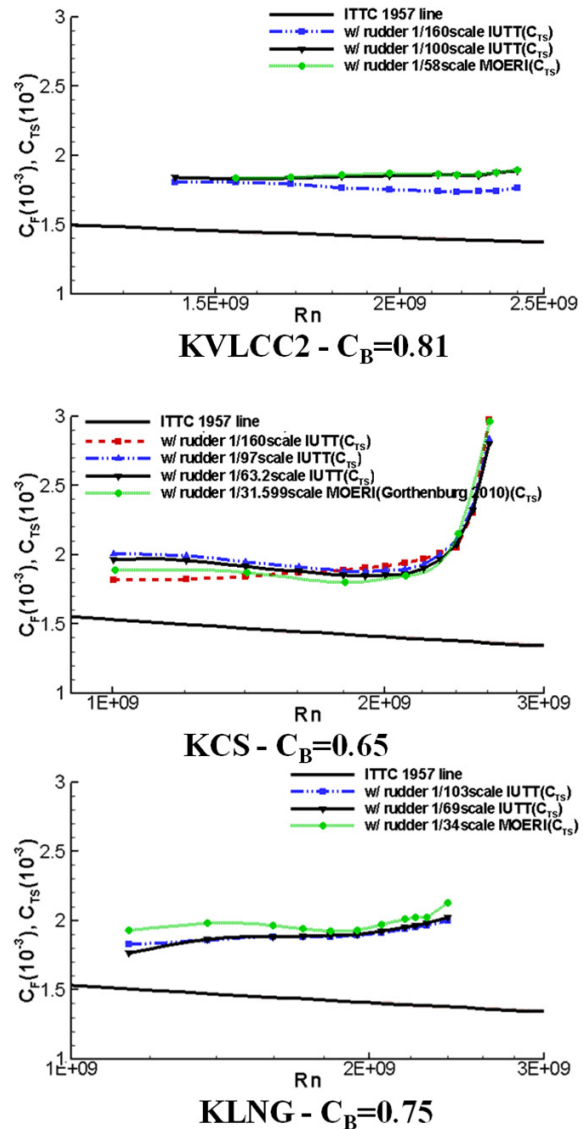


Fig. 3 Estimations of total resistance coefficients by the method of Min and Kang (2010)

따라 변화하는 형상계수의 특성이 반영된 두 가지 형상계수의 추정 방법들을 서로 비교하기 위하여, 본 연구에서의 대상선형들인 KVLCC2, KLNG 그리고 KCS 선형들에 대하여 수행한 상사모형 시험결과들에 두 가지 형상계수의 추정 방법들을 적용시켜 모형선 축척비에 따른 각 선형의 실선 전저항계수를 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2에서 보여주고 있는 García-Gómez (2000)의 방법은 축척비에 따라서 상사모형선들의 실선 저항추정 결과들이 서로 근접하지 못하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 García-Gómez (2000)방법에서 얻어낸 추정방법이 1980년대 이전에 선형들로 인하여 대상선형들에 적합하지 못한 것으로 생각된다. 특히, 비교적 고속선에 해당하는 KCS의 경우 모형선 축척비에 따른 실선의 전저항계수 추정결과가 다른 선형들에 비하여 더 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 이와 반면에, Fig. 3에서 보여주는 Min and

Kang (2010)의 방법에서는 상대적으로 상사모형선들의 실선저항 추정 결과들이 서로 근접하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 상사 모형선의 전저항계수 추정결과들이 상대적으로 더 근접하긴 하지만, 여전히 상사모형선들 간에 차이가 존재하여 신뢰할 만한 접근성을 보이지 못하고 있다.

5. 실선 형상계수 추정기법의 개선안

본 연구에서는 모형선과 실선의 형상계수 상관곡선을 개선하고자, 참고문헌의 표본 자료와 더불어 본 연구의 대상선형들의 표본을 추가한 후 각 대상선형들의 상사모형선 실험자료를 이용

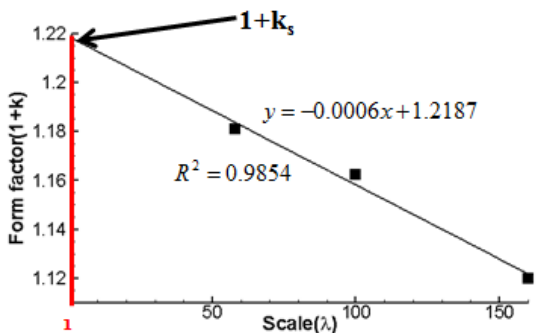


Fig. 4 Prediction of the form factor of KVLCC2 on full-scale using the method of García-Gómez (2000)

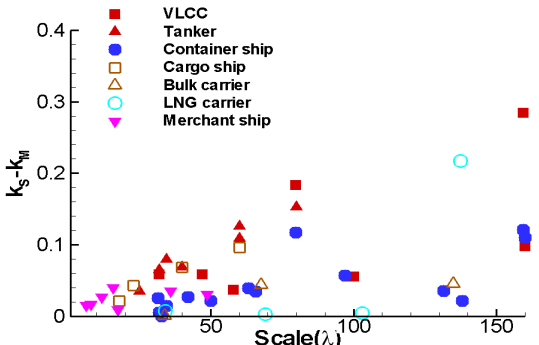
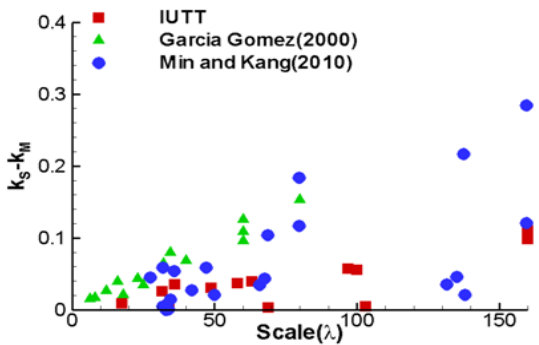


Fig. 5 Sample form factors determined from low-speed resistance tests

하여 실선의 형상계수를 추정하였다. 그 결과 수집된 모형시험 자료들이 일반적으로 일컬어지는 중저속선과 고속선으로 구분되어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 모형선과 실선의 형상계수 상관곡선을 작성하여 실선의 형상계수 추정방법을 연구하기 위해서는 대상선형의 설계속도에 따른 선형 특성을 고려할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

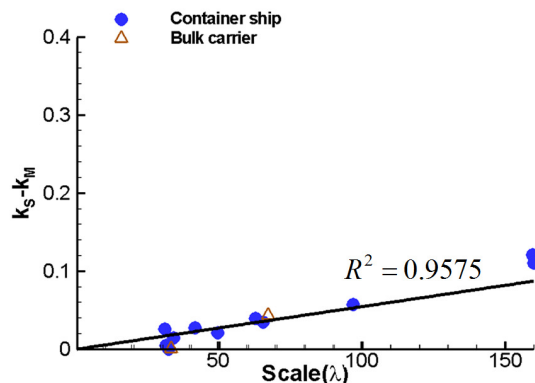
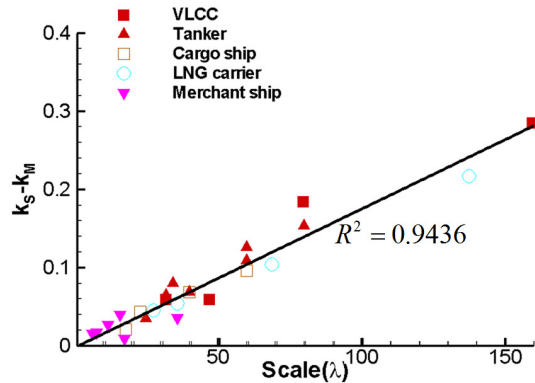


Fig. 6 Correlation lines of form factors among the geosim models

그 결과 수집된 모형시험 자료들이 일반적으로 일컬어지는 중저속선과 고속선으로 구분되어지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 모형선과 실선의 형상계수 상관곡선을 작성하여 실선의 형상계수 추정방법을 연구하기 위해서는 대상선형의 설계속도에 따른 선형 특성을 고려할 필요가 있다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 이유로 중저속선과 고속선에 대해 각각의 상관곡선을 작성하여 Fig. 6과 같이 나타내었으며, 각각의 추정식은 식 (1)과 (2)에서 보여준다. 식(1)은 중저속선에 대한 추정식이며, 식 (2)는 고속선에 대한 추정식이다. 여기서, 중저속선과 고속선의 구분은 설계속도 20knot를 기준으로 설계속도 20knot 이하의 선박들을 중저속선들이라 하였으며, 설계속도 20knot 이상의 선박들을 고속선이라 하였다. 본 연구의 대상선형 중 중저속선이라 생각되는 KLNG, KVLCC2선형과 고속선인 KCS 선형에 대해 각각 식 (1)과 (2)를 이용하여 실선의 전저항계수를 추정한 후, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보이고 있는 상사모형선

들의 실선 저항추정 결과들은 선행된 연구에 비해 좀 더 많은 모형시험 자료들을 이용하고, García-Gómez (2000)가 제안한 형상계수 추정방법을 설계속도별로 분류하여 모형선과 실선 형상계수 상관곡선을 사용한 것이다.

$$k_S - k_M = 1.80(\lambda - 1) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$k_S - k_M = 0.80(\lambda - 1) \times 10^{-3} \quad (2)$$

여기서, 하첨자 s는 실선, 하첨자 m은 모형선 그리고 λ 는 축척비를 말한다. Fig. 2와 Fig. 7을 비교하면, 대체적으로 García-Gómez (2000)가 제안한 형상계수 추정방법보다 전저항계수의 차

는 여전히 서로 차이가 좀 있는 결과를 보이고 있지만, García-Gómez (2000)가 제안한 형상계수 추정방법 보다 비교적 근접한 것을 볼 수 있다. 이는 García-Gómez (2000)가 상관곡선을 작성할 때 이용한 모형시험 자료의 선형들은 설계속도에 따라 구분하지 않아, 수정된 형상계수 추정방법이 보다 근접하는 결과를 얻은 것이라 생각된다.

한편, Min and Kang (2010)의 추정방법에 사용된 모형시험 자료들은 고속선과 중저속선이 고르게 분포되어 있지만, 그 수가 적어 적합한 모형선-실선 형상계수 상관곡선을 작성하기 어렵다는 약점을 가지고 있다. 이러한 약점을 개선하고자 본 연구에서는 선행된 연구들의 모형시험 자료를 종합하여 총 54척의 모형선 자료를 바탕으로 모형선-실선 형상계수 상관곡선을 작성하였다.

또한, 설계속도에 따라 실선의 형상계수를 추정함에 영향을 미칠 것이라 생각되어 Fig. 5와 같이 설계속도에 따라 구분지어 모형선-실선 형상계수 상관곡선을 작성하였다.

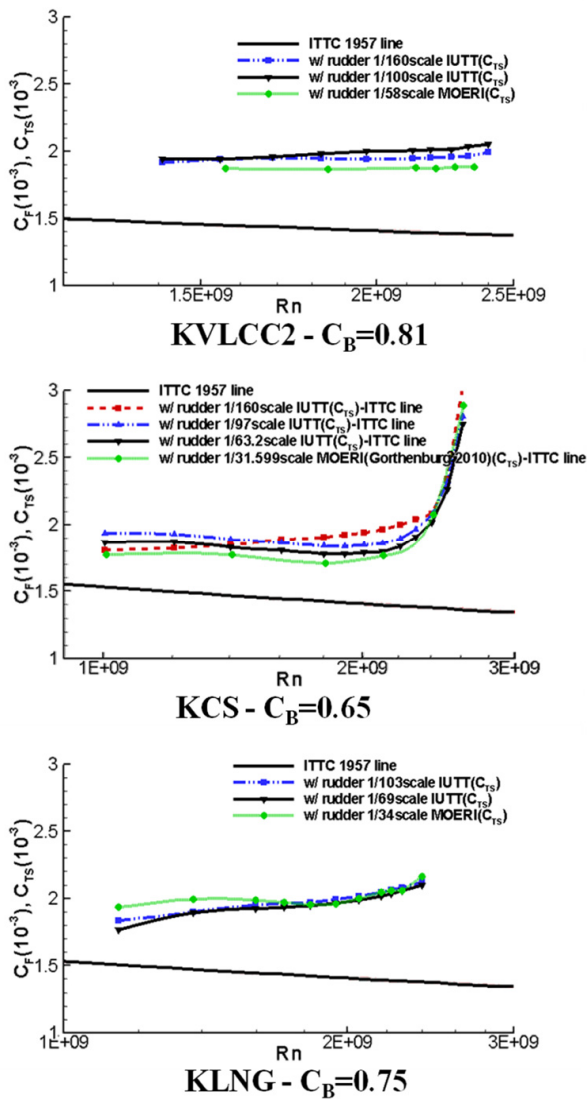


Fig. 7 Estimations of total resistance coefficients by the modified method of García-Gómez (2000)

이가 확연히 줄어 든 것을 볼 수 있다. 그러나 KCS 선형의 경우

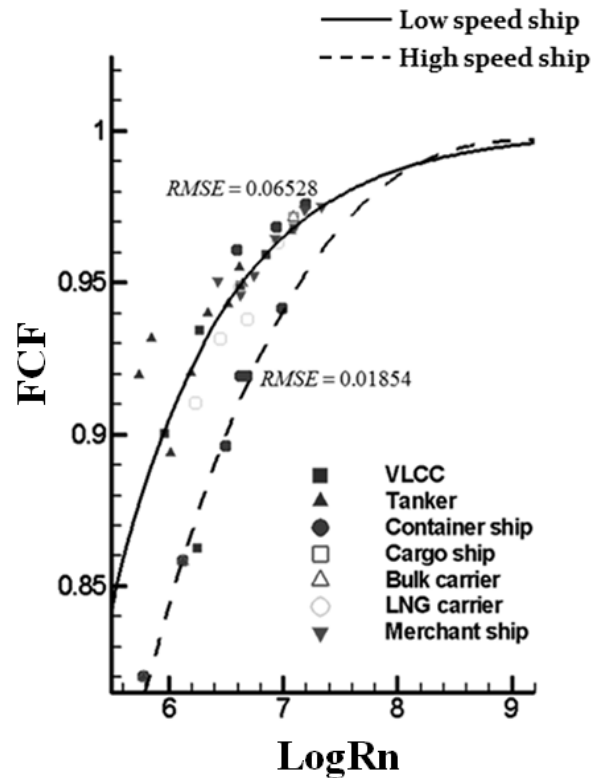


Fig. 8 Correlation lines of form factors by the modified method of Min and Kang (2010)

모형선과 실선의 형상계수 상관곡선의 적합한 함수형태를 찾기 위해 쌍곡선 함수, 지수함수, 다항식 등 다양한 함수형태로 추정하여 보았고, 각 함수별로 평균 제곱의 오차가 작은 곡선들을 얻어 내었다. Fig. 8은 다양한 함수형태로 추정된 모형선과 실선의 형상계수 상관곡선 중 가장 오차가 적은 상관곡선을 대표적으로 보여준다. 축척비에 따른 실선의 전저항계수 차이가 지수함수 일 때 가장 그 차이가 작으며, 얻어낸 모형선과 실선의 형상계수

상관곡선들 중 지수함수의 형태일 때 가장 근접하는 결과를 얻을 수 있었고 최종적인 추정식은 식(3)와 같다.

$$FCF = a \cdot e^{bx} + c \quad x = \text{Log}R_n \quad (3)$$

$a_L = -38.480, b_L = -1.000, c_L = 1.172$
 $a_H = -2.030, b_H = -1.000, c_H = 0.842$

여기서, 하첨자 L은 중저속선, H는 고속선을 말한다.

식 (3)과 같이 형상계수 수정인자(FCF)를 얻어내고 Min and Kang (2010)에서 제안한 방법을 이용하여 전저항계수 추정결과를 Fig. 9에 나타내었다. 여기서 FCF는 실선의 형상계수(종착형상계수)와 모형선의 형상계수의 비를 나타낸다 (Min & Kang, 2010). 추정한 실선의 전저항계수가 Fig. 3에 비하여 그 차이가 줄어들었음을 확인할 수 있으며, 다른 추정방법이지만, Fig. 7과 비교하였을 때도 그 차이가 많이 줄어들었음을 확인할 수 있다.

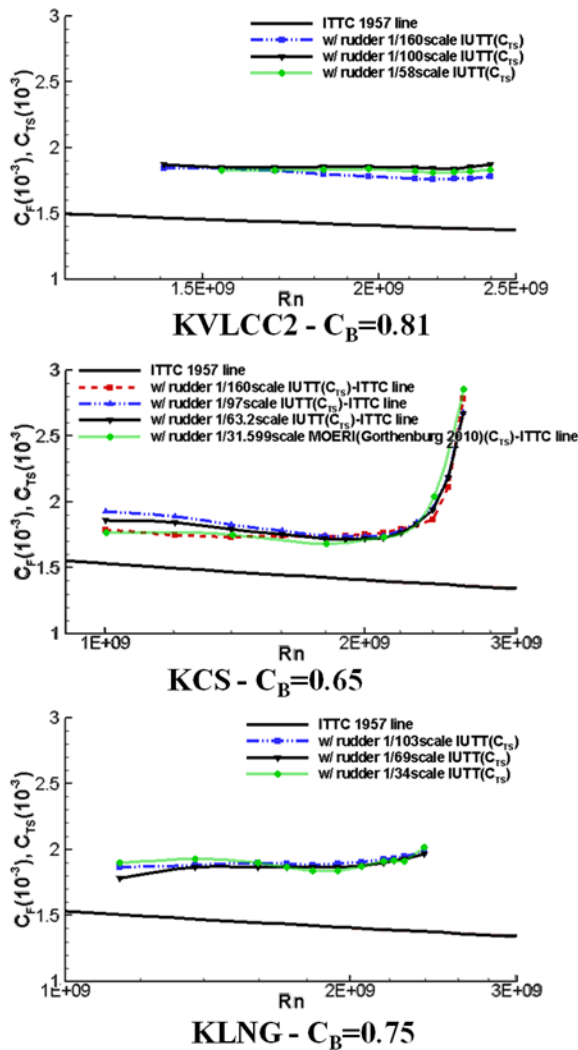


Fig. 9 Estimations of total resistance coefficients by the modified method of Min and Kang (2010)

6. 결론

본 연구에서는 설계속력과 방형계수가 서로 다른 세 가지 모형에 대하여 상사모형시험을 수행하였고, 한국해양과학기술원 선박해양플랜트 연구소(MOERI)의 모형시험 결과와 비교 검증하였으며, 레이놀즈 수의 변화를 고려한 형상계수 추정방법들을 적용시켜 그 결과를 서로 비교 분석하였다. 또한, 대상선형들에 적용된 형상계수 추정방법들의 정도를 개선하기 위해 수정된 형상계수 추정방법을 제안하였다.

- 1) 세 가지 선형의 모형선들에 대하여 MOERI의 실험결과와 비교하였을 때, 잉여저항계수는 약 5% 이내로 두 선형시험수조의 모형시험 결과가 매우 근접한 것을 확인하였다. 따라서 소형 예인수조에서의 상사모형시험 결과의 신뢰성을 확보하였으며, 본 연구 진행 시 MOERI의 실험결과와의 적용가능함을 확인하였다.
- 2) 레이놀즈 수의 변화를 고려한 형상계수를 추정하는 대표적인 연구들 중 García-Gómez (2000)과 Min and Kang (2010)의 추정방법을 대상선형에 적용하여 비교 검토해 보았다. García-Gómez (2000)의 연구에서 사용된 모형선 자료들은 대부분이 중저속선에 속하기 때문에, 대상선형들에 적용하였을 때 고속선에 해당하는 KCS의 실선 전저항계수 추정결과가 축척비에 따라서 큰 차이를 보이는 것으로 생각된다. Min and Kang (2010)의 추정방법에서 사용된 표본들은 고속선과 중저속선이 고르게 분포되어 있어, García-Gómez (2000)의 추정방법에 비해 실선의 전저항계수를 추정하였을 때 축척비에 따라 비교적 근접하는 모습을 보여주지만, 모형시험 자료의 수가 적어 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다.
- 3) 기존의 연구들에서 사용된 표본들과 상사모형시험을 통한 실험결과를 합쳐 총 54척의 모형시험 자료를 확보하였고, 형상계수들의 분포가 고속선과 중고속선으로 나뉘어 분포되는 것을 확인하였다. 두 가지 그룹에 대해 각각 모형선-실선 형상계수 상관곡선을 조사하였다.
- 4) García-Gómez (2000)의 추정방법을 수정하여 설계속도에 따라 구분되는 중저속선과 고속선 그룹에 대한 추정식을 대상선형에 적용하였다. 기존의 García-Gómez (2000) 방법보다 실선 전저항계수 추정결과들이 서로 근접하는 경향을 보인다. 특히, 고속선에 대한 추정식을 KCS 선형에 적용했을 때, 다른 선형들에 비하여 그 차이가 가장 줄어든 것으로 보아 실선의 형상계수를 추정할 때 설계속도에 따른 선형 특성들을 반영할 필요가 있을 것으로 생각된다.
- 5) Min and Kang (2010)의 추정방법에서 모형선 실험자료의 추가적인 확보로부터 형상계수 수정인자를 설계속도에 따라 수정하였다. 또한 형상계수 상관곡선의 표본들에 가장 적합한 함수형태에 대한 연구를 수행함으로써, 그 중 여러 함수형태 중 지수함수의 형태가 가장 적합함을 확인하였다. 이를 Min and

Kang (2010)의 방법에 적용하였을 때, 실선 형상계수의 축척비에 따른 차이가 줄어들었음을 확인하였다. 또한 수정된 García-Gómez (2000)의 추정방법과 비교하였을 때, 축척비에 따른 형상계수의 분포보다 레이놀즈 수에 따른 형상계수의 분포 경향을 파악하는 것이 중요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 '고정도 예인시험 시스템 구축'(과제번호: 10033777)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi, J.E. Kim, J.H. & Lee, H.G., 2011. Computational Study of the Scale Effect on Resistance and Propulsion Performance of VLCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.222-232.
- García-Gómez, A., 2000. On the Form Factor Scale Effect. *Ocean Engineering*, 27(1), pp.97-109.
- Kim, J. et al., 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.

Min, K.S. & Kang, S.H., 2010. Study on the Form Factor and Full-scale Ship Resistance Prediction Method. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(2), pp.108-118.

Prohaska, C.W., 1996. A simple method for evaluation of form factor and low speed wave resistance. *Proceedings of 11th ITTC*, pp.65-66.



하윤진

이영길

강봉한