소형 모형선을 이용한 실선마력추정에 대한 연구

하윤진¹·이영길^{2,†}

인하대학교 대학원 조선해양공학과¹

인하대학교 항공조선산업공학부 조선해양공학전공²

A Fundamental Study on the Power Prediction Method of Ship by using the Experiment of Small Model

Yoon-Jin Ha¹·Young-Gill Lee^{2,†}

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.

In this study, the self-propulsion tests are performed in INHA towing tank. And the effective wake characteristics of the KVLCC2 and the KCS models are compared by the experimental results. The form factor is independent of Reynolds number. To estimate the hydrodynamic performance of a full scale ship, the form factor is determined to consider attendant on Reynolds number. In this research, the power predictions are carried out considering the form factor difference of model and full scale ship. The results of this research could be used as one of the fundamental data to the powering performance prediction.

Keywords : Propulsive performance(추진성능), Propulsive coefficient(자항요소), Scale effect(축척효과), Form factor(형상계수)

1. 서 론

선형시험수조에서 자유수면이 있는 모형시험은 두 가지 무차원 수 중 실선과 모형선의 프루드 수(Froude number, F_n)를 동일하게 만족시켜준다. 하지만 프루드 상사법칙을 적용하게 되면 레이놀즈 수(Reynolds number, R_n)를 동일하게 만족시키기 어렵다. 실선과 모형선 주위 유동은 레이놀즈 수의 큰 차이 즉, 축척효과로 일컬어지는 영향으로 인하여 서로 다르다. 따라서 프루드 상사법칙을 적용한 모형시험결과로부터 실선성능을 추정하기에는 어려움이 따른다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 선미부에 빠른 압력회복이 나타나고 선미부경계층의 두께가 감소하여 형상계수가 증가하며, 프로펠러 면으로 유입되는 축방향 속도가 증가하게 되어 유효반류비가 감소하게 된다 (Choi, et al., 2011). 이러한 모형선 저항추진성능에 미치는 축척효과의 영향들을 조사하는 유용한 방법 중 하나는 기하학적으로 상사하고 축척비가 다른 모형선의 실험 결과를 이용하는 방법이 있다 (García-Gómez, 2000; Min & Kang, 2010). 하지만 대부분의 모형시험은 레이놀즈 수 범위가 $10^6 \sim 10^7$ 에서 이루어지나 실선의 레이놀즈 수의 경우 $10^9 \sim 10^{10}$ 이기 때문에 실선과의 그 차이가 매우 커 여전히 축척효과를 무시할 수 없다 (Choi, et al., 2011). 더욱이 크기

가 작은 소형 선형시험수조에서의 모형시험 시 레이놀즈 수가 $10^5 \sim 10^6$ 인 상태에서도 이루어지는 경우가 있기 때문에 소형 선형시험수조에서의 모형시험결과로 실선의 성능을 추정함에 있어서 매우 어렵다. ITTC 1978년 실선 성능해석법에서는 실선의 성능을 추정하기 위하여 형상계수(form factor, k)를 사용하게 된다. ITTC 1978년 실선 성능해석법에서 형상계수는 선체의 기하학적 형상에 의한 저항성분을 고려하기 위하여 도입되었다 (Min & Kang, 2010). 형상계수는 레이놀즈 수의 함수로 알려져 있기 때문에 이는 실선과 모형선이 서로 다를 수 있다.

García-Gómez (2000)과 Min and Kang (2010)에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 형상계수가 증가하는 것을 모형시험으로 확인한 바 있다. 형상계수는 실선의 저항성능을 추정하는 것 뿐 아니라 실선의 유효반류비를 추정할 때에도 고려된다. 하지만 ITTC 1978년 실선 성능해석법의 경우 형상계수 뿐 아니라, 선체효율(η_H), 프로펠러 단독효율(η_0) 등의 축척효과를 고려하지 않는다. 따라서 축척효과로 인하여 모형 크기마다 실선의 마력 추정결과는 다를 수 있다. 본 연구에서는 소형 저속비대모형선과 상대적으로 고속으로 항주하는 소형 고속모형선에 대한 자항시험을 수행하고 자항시험 시 모형선의 유효반류비 특성을 비교하여 보았다. 또한 실선마력추정방법에 대한 기초자료를 제시하

기 위하여 실선 형상계수 추정방법들로 소형모형선들의 모형시험 자료를 이용하여 실선미력을 추정하여보았고, 이를 다른 크기의 모형선 자료들로 추정한 실선미력추정결과와 비교 검토하였다.

2. 대상모형

대상모형들은 KVLCC2와 KCS 선형이다. 본 대상선형들의 실선과 모형의 주요제원 및 모형시험기관은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Principal dimensions and model test institute etc. of the KVLCC2

	Full scale	Model	
Scale ratio	1:1	1:160	1:58 (kim, et al., 2000) (Yang, et al., 2010)
$L_{BP}(m)$	320.0	2.00	5.52
$L_{WL}(m)$	325.5	2.03	5.61
$B(m)$	58.0	0.36	1.00
$T(m)$	20.8	0.13	0.36
$Dis.(m^3)$ [w/rudder]	312622.0	0.08	1.60
$W.S.A(m^2)$ [w/rudder]	27467.3	1.07	8.17
C_B	0.8098		
C_M	0.9980		
Towing range(F_n)		0.0910 ~ 0.1550	0.1411
Model test institute		IUTT	KRISO

Table 2 Principal dimensions and model test institute etc. of the KCS

	Full scale	Model		
Scale ratio	1:1	1:97	1:63.2	1:31.6
$L_{BP}(m)$	230.0	2.37	3.64	7.28
$L_{WL}(m)$	231.4	2.39	3.66	7.32
$B(m)$	32.2	0.33	0.51	1.02
$T(m)$	10.8	0.11	0.17	0.34
$Dis.(m^3)$ [w/rudder]	52030.0	0.06	0.21	1.65
$W.S.A(m^2)$ [w/rudder]	9530.3	1.01	2.39	9.54
C_B	0.6505			
C_M	0.9850			
Towing range(F_n)		0.1080 ~ 0.2810	0.2590	
Model test institute		IUTT	KRISO	KRISO

인하대학교 선형시험수조의 소형 모형선들 크기는 약 2m 급으로 모형시험 시 그 시험결과와 정동성, 인하대학교 선형시험수조 크기와 모형크기에 의한 벽면효과(blockage ratio < 1%)가 크지 않을 정도의 충분한 크기로 결정하였다.

3. 자항요소 비교

본 연구에서는 소형 모형선들에 대하여 자항시험을 수행하고, 두 모형선의 유효반류비 특성을 비교하여 보았다. 자항시험은 자유수면이 있는 상태에서 모형시험이 수행되므로, 프루드 수에 맞추어 실시된다. 하지만 마찰저항계수의 경우는 레이놀즈 수에 따라 결정되므로 모형선의 마찰저항계수가 실선에 비해 그 값이 크다. 따라서 자항시험 시 실선의 자항점에 맞추어 모형시험을 수행하기 위하여 마찰저항을 고려하였으며, 영국식방법(constant speed method)을 채택하여 각 예인속도 별로 자항시험을 수행하였다. 자항시험 결과들의 해석은 인하대학교 선형시험수조에서의 KVLCC2 1/160scale과 KCS 1/97scale 모형 프로펠러 단독시험 결과들을 이용하여 추력일치법을 사용하였으며, 실선미력추정은 ITTC 1978년 실선 성능추정방법을 사용하였다. Fig. 1과 2는 본 연구에서 수행된 KVLCC2 1/160scale와 KCS 1/97scale 모형선들의 속도에 따른 자항요소들을 보여준다. 자항요소들에는 추력과 토오크 계수들의 표준편차(σ)를 이용하여 우연오차에 대한 error bar도 함께 작성하였다. 그리고 KVLCC2 1/160scale의 자항요소들은 설계속도에서 모형시험이 수행된 Kim, et al.(2000)의 KVLCC2 1/58scale 모형선 자항요소들과 비교하였다. KCS 1/97scale의 자항요소들은 KRISO에서 수행된 다른 크기의 모형시험결과들과 비교하였다. 본 모형시험들의 경우 레이놀즈 수 $10^5 \sim 10^6$ 에서 모형시험이 수행되므로 반복시험을 통하여 신뢰할 수 있는 결과를 도출하고 자 하였다. Fig. 1과 Fig. 2의 추력감소 계수(t)를 보면, 속도에 따른 변화가 크지 않으며 Fig. 1의 KVLCC2 1/160scale의 t 를 보면 설계속도에서 KVLCC2 1/58scale의 t 와 근접한 결과를 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2의 KCS 1/97scale의 t 의 경우도 설계속도에서 다른 크기의 모형선 시험결과들과 근접한 결과를 확인할 수 있다. Fig. 1의 모형선 유효반류비(W_M)를 보면, Fig. 2와 비교하였을 때 속도에 따른 변화량이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 두 모형선에 대한 자항시험 시 레이놀즈 수의 차이는 크지 않다. 저속비대선의 경우 흔히 선미에서 빌지 보오텍스를 확인할 수 있는데, 이러한 빌지 보오텍스는 선측 표면에서 빌지부분으로부터 박리가 되어 선미에서는 반류계수가 큰 갈고리 모양의 영역을 만든다. 일반적으로 보오텍스의 크기는 경계층 두께와 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 본 모형선들의 자항시험은 천이영역에서 수행되었다. 모형시험 시 총류와 난류의 공존으로 인하여 경계층의 두께가 지속적으로 변화할 것이다. KVLCC2 1/160scale의 경우 이러한 경계층 두께 변화에 의한 영향으로 빌지 보오텍스의 크기가 계속 바뀔 것이다. 따라서 반류계수가 계속 바뀔 것으로 생각되며, 상대적으로 빌지 보오텍스의 크기가 작은 Fig. 2의 KCS 1/97scale과 비교하였을

때 이는 선미가 두꺼운 저속비대선이기 때문에 선형에 따른 영향으로 경계층의 두께가 지속적으로 바뀌어 빌지 보오텍스의 크기가 계속 변화하므로 KVLCC2 1/160scale 모형선의 W_M 변화가 큰 것으로 생각된다. Fig. 1의 설계속도에서 KVLCC2 1/160scale 모형선 W_M 과 KVLCC2 1/58scale 모형선 W_M 을 보면 약 53% 정도의 차이를 확인할 수 있는데, 앞서 언급한 것과 마찬가지로 두 모형선의 레이놀즈 수가 차이가 나기 때문에 축척효과로 인한 영향일 것으로 생각된다. 하지만 Fig. 2의 KCS 모형선들의 W_M 을 보면 상대적으로 KVLCC2에 비하여 축척효과에 의한 영향이 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 반류계측 결과에서도 확인할 수 있는 바와 같이 이는 앞서 언급한 것과 마찬가지로 선미에서 빌지 보오텍스의 크기가 작기 때문에 축척효과에 의한 영향이 크지 않은 것으로 생각된다. Fig. 1의 KVLCC2 1/160scale의 속도에 따른 실선 유효반류비(W_S) 추정결과를 보면, 속도에 따른 W_M 변화로 인하여 Fig. 2의 KCS 1/197scale의 속도에 따른 W_S 추정결과에 비하여 그 변화도 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 1의 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale의 실선 W_S 추정결과를 보면, 약 20%의 차이를 확인할 수 있는데 이는 ITTC 1978년의 실선 성능 추정방법에서 W_S 추정 시 k 의 축척효과를 고려하지 못함으로 생각된다. Fig. 2의 KCS 모형선들에서 추정된 W_S 를 보면 축척효과에 의한 영향이 KVLCC2에 비하여 작지만 조금의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 1과 2의 상대회전효율(η_R)의 경우 자항시험 결과로부터 추력일치법을 사용하였기 때문에, 자항상태와 단독상태의 토오크 비로 얻어내게 된다. 반복 시험을 통하여 어느 정도의 신뢰성을 가지는 결과를 도출하였으며, 속도에 따른 변화도 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 1과 2에서 모형 크기마다의 η_R 를 보면 약 1%이내의 차이를 보여 축척효과가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. ITTC 1978년 실선 성능 추정방법에서는 자항상태와 프로펠러 단독상태의 토오크는 같은 비율로 모형선에서 실선의 크기로 증가한다고 가정되기 때문에, 축척효과가 크지 않다 (Choi, et al., 2011). Fig. 1과 2의 선체 효율(η_H)을 비교하여 보면, KVLCC2 1/160scale의 속도에 따른 η_H 의 변화가 상대적으로 KCS 1/97scale의 η_H 에 비하여 큰 변화를 확인할 수 있는데, 이는 저속비대선의 모형선 W_M 변화로 인한 영향으로 생각된다. Fig. 1에서 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale의 η_H 를 보면, 축척효과로 인하여 약 11%정도의 차이를 확인할 수 있는데 이는 W_S 추정 시 k 의 축척효과를 고려해 주지 못함으로 생각된다. Fig. 2의 KCS는 1/160scale과 1/31.6scale이 약 4%정도 차이로 KVLCC2에 비하여 그 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 1과 Fig. 2의 프로펠러 단독효율(η_0)을 보면, 두 모형선 모두 속도에 따른 그 결과의 변화가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 자항시험 시 추력 계측 값이 잘 얻어진 것으로 생각된다. 하지만 Fig. 1의 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale η_0 들을 비교하여 보면 약 14%정도의 차이를 확인할 수 있는데 이는 축척효과로 인하여 자항시험 시 KVLCC2 1/160scale의 전진비가 1/58scale의 전진비에 비하여 작게 추정된 것으로 생각된다.

Fig. 1 Comparisons of the propulsive coefficients(KVLCC2 1/160scale($R_n = 6.6 \times 10^5 \sim 1.0 \times 10^6$), 1/58scale)

Fig. 2 Comparisons of the propulsive coefficients(KCS 1/97scale($Rn=9.0 \times 10^5 \sim 2.3 \times 10^6$))

Fig. 3 Axial velocity contours of the ship models on the propeller plane

Fig. 2의 KCS 모형선들도 KVLCC2에 비하여 그 차이는 크지 않지만 마찬가지로 작은 모형선의 전진비가 작게 추정된 것으로 생각된다. Fig. 1과 Fig. 2의 추진계수(η_D)를 보면 W_m , η_R , η_0 등의 축척효과로 인하여 모형선이 작은 경우 η_D 가 작게 추정되는 것을 확인할 수 있다.

4. 실선미력추정방법

본 연구에서는 축척비에 따른 실선미력추정결과를 비교하기 위하여 설계속도에서의 KVLCC2, KCS 모형시험결과들을 이용하였다. 추정된 유효미력(EHP)의 경우 2차원 외삽법(Froude 방법)을 이용하여 추정하였다. 식 (1)은 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에서의 실선유효반류비 추정방법이다.

$$W_{TS} = (t + W_R) + (W_{TM} - t - W_R) \frac{(1+k)C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k)C_{FM}} \quad (1)$$

여기서, W_{TS} 는 실선의 유효반류비, t 는 추력감소계수, W_R 는 러더효과로 0.04를 사용하고, W_{TM} 은 모형선의 유효반류비, k 는,

C_{FS} 는 실선의 마찰저항계수, C_{FM} 은 모형선의 마찰저항계수, ΔC_F 거칠기 저항을 나타낸다. 식 (1)의 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에서 W_S 를 포텐셜성분(W_M)과 마찰성분(W_F)으로 분리하고 W_F 는 모형선과 실선이 동일하게 한다. 포텐셜 유동에너지는 에너지 교환이 발생하지 않으므로 유효반류비의 포텐셜성분은 t의 포텐셜 성분과 같게 된다. W_F 는 실선과 모형선의 $(1+k)C_F$ 비율 즉, C_V 비율만큼 W_M 을 감소시킨다. 이 때 $(1+k)$ 의 축척효과는 무시한다고 가정하였다 (Choi, et al., 2010). Table 3은 ITTC 1978년 실선 성능추정방법을 이용하여 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale의 자항요소들로부터 전달마력추정 결과들을 보여준다. 그리고 Table 4는 모형 크기별로 KCS의 전달마력을 추정한 결과이다. Table 3의 KVLCC2에 대한 전달마력추정결과를 보면, 두 크기의 모형선이 약 9%정도의 차이를 보이며, KCS 1/97scale과 1/31.6scale의 경우도 실선 전달마력이 약 9%정도의 차이를 보인다. 이는 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에서 k , W_M , η_H 와 η_D 의 축척효과를 고려하지 않기 때문일 것으로 생각된다. η_D 를 추정함에 있어 η_R , η_H 와 η_D 를 고려하고 있는데, η_D 의 경우 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에서는 이를 실선과 모형선이 동일하다는 가정을 하고 있다. 고려하는 것이 된다.

Table 3 Comparisons of powering performance applied ITTC 1978 method(KVLCC2)

	1/160scale (IUTT) applied ITTC 1978 method	1/58scale (Kim, et al., 2000) applied ITTC 1978 method
t	0.182	0.190
W_M	0.679	0.443
W_S	0.366	0.305
η_R	1.010	1.009
η_H	1.291	1.165
η_D	0.534	0.620
EHP	15563	14958
DHP	22361	20603

Table 4 Comparisons of powering performance applied ITTC 1978 method(KCS)

	1/97scale (IUTT) applied ITTC 1978 method	1/63.2scale (KRISO) applied ITTC 1978 method	1/31.6scale (KRISO) applied ITTC 1978 method
t	0.187	0.204	0.188
W_M	0.347	0.282	0.262
W_S	0.274	0.261	0.246
η_R	1.013	1.009	1.011
η_H	1.120	1.077	1.077
η_D	0.553	0.632	0.640
EHP	20484	20256	20817
DHP	32618	29412	29867

본 연구에서는 축척효과를 고려한 실선의 k 추정방법의 대표적 연구인 García-Gómez (2000)와 Min and Kang (2010)의 연구결과들과 Min and Kang (2010)이 제안한 실선 k 추정방법을 수정한 Ha, et al. (2013)의 연구결과를 이용하여 W_S 를 추정하여 보고 η_H 와 η_D 나이가 전달마력까지 미치는 영향을 파악하여보았다.

4.1 García-Gómez의 실선 형상계수 추정방법 적용

García-Gómez (2000) 연구는 축척이 다른 4 가지 선형의 모형선들에 대한 k 를 모형시험으로부터 얻어내고, 각 선형마다 실선의 k 를 얻어내기 위하여 각 선형별로 축척비에 따른 k 의 분포를 고찰하였다. 그리고 최소자승법(1차 근사식에 대한)을 이용하여 오차의 제곱(R^2)들을 검토함에 따라 각 선형들의 실선 k 를 얻어내었다. 이들 각 선형마다 얻어진 실선 k 와 모형선의 k 와의 차($k_S - k_M$)를 전체 선형들에 대하여 축척비에 따라 분포시켜, 최종적으로 다른 일반 선형들에 적용 가능한 1차 근사식을 제안하였다. 식 (2)는 García-Gómez (2000)에서의 실선 k 추정방법을 나타낸다.

$$k_S - k_M = 1.91(\lambda - 1) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

여기서, k_S 는 실선의 형상계수, k_M 은 모형시험으로 얻어낸 모형선의 형상계수, λ 는 축척비를 나타낸다. Table 5와 6은 García-Gómez (2000)의 실선 k 추정방법을 이용하여 자항요소들로 전달마력까지 추정한 결과를 나타낸다. t와 η_R 의 경우 축척효과 크지 않기 때문에 변화가 없으며, η_D 의 경우 축척효과를 고려해줄 수 있는 방법이 없어 그 값의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. W_S , η_H 를 보면 k 의 축척효과를 고려해줌에 따라 ITTC 1978년 실선 성능추정방법을 사용한 경우보다 증가한 것을 확인할 수 있다. 하지만 García-Gómez (2000)의 실선 k 추정방법을 이용한 방법의 경우 실선의 k 를 과도하게 추정하여 모형크기에 따른 η_D 가 매우 커진 것을 확인할 수 있으며, 추정된 전달마력이 KVLCC 1/160scale과 1/58scale의 경우 약 10%, KCS 1/97scale과 1/31.6의 경우 약 6%정도의 차이를 보인다. KVLCC2의 경우 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 전달마력차이가 증가하였지만 KCS의 경우에는 그 차이가 감소하였다. Ha et al. (2013)에서는 García-Gómez (2000)의 실선 k 추정방법을 적용하여 상사모형선들의 실선 전저항계수를 추정한 바 있다. 이 연구결과에서는 모형선이 작은 경우 실선의 k 를 과도하게 추정하여 모형 크기 별 실선 전저항계수 차이가 ITTC 1978년 실선 성능추정방법을 사용하였을 때에 비하여 크게 나는 것을 확인하였다. García-Gómez (2000)에서는 선종별 선형특성을 고려하지 않고 ($k_S - k_M$)과 축척비와의 관계를 선형적으로 나타내었다. 모형선과 실선의 k 관계는 선종별로 선형특성이 다르기 때문에 차이가 날 수 있고, k 는 레이놀즈 수의 함수로 가정되기 때문에 축척비에 따른 영향을 파악하는 것보다 레이놀즈 수에 따른 영향을 파악하는 것이 보다 적절할 것으로 생각된다.

Table 5 Comparison of powering performance applied García-Gómez (2000) method(KVLCC2)

	1/160scale (IUTT) applied García-Gómez (2000) method	1/58scale (Kim, et al., 2000) applied García-Gómez (2000) method
t	0.182	0.190
W_M	0.679	0.443
W_S	0.424	0.375
η_R	1.010	1.009
η_H	1.421	1.296
η_0	0.534	0.620
η_D	0.766	0.811
EHP	15563	14958
DHP	20317	18449

Table 6 Comparison of powering performance applied García-Gómez (2000) method(KCS)

	1/97scale (IUTT) applied García-Gómez (2000) method	1/63.2scale (KRISO) applied García-Gómez (2000) method	1/31.6scale (KRISO) applied García-Gómez (2000) method
t	0.187	0.204	0.188
W_M	0.347	0.282	0.262
W_S	0.308	0.275	0.262
η_R	1.013	1.009	1.011
η_H	1.175	1.098	1.100
η_0	0.553	0.632	0.640
η_D	0.659	0.700	0.711
EHP	20484	20256	20817
DHP	31084	28865	29278

4.2 Min and Kang의 실선 형상계수 추정방법 적용

Min and Kang (2010)의 연구에서 k는 레이놀즈 수가 증가할 수록 커지며, 레이놀즈 수가 10^9 이상이면, 임의의 값에 수렴(실선 k)할 것이라는 가정으로 모형선과 실선의 k의 비가 레이놀즈 수 10^9 이상에서 1에 수렴한다는 가정을 하였다. 모형선과 실선의 k의 비(FCF)를 레이놀즈 수 증가에 따라 쌍곡선 함수의 형태로 근사하여 실선의 k 추정방법을 제안하였다. 식 (3)은 Min and Kang(2010)에서의 실선 k 추정방법을 나타낸다.

$$FCF = \frac{(1+k)_M}{(1+k)_\infty} = \frac{(1+k)_M}{(1+k)_S} = \tanh x \quad (3)$$

$$x = a(\log R_n)^n, \quad a = 0.015064, \quad n = 2.6752$$

(1+k)에서 아래첨자 M은 모형선을 나타내며, ∞는 종착

즉, S와 같다. Table 7과 8은 Min and Kang (2010)의 실선 k 추정방법을 이용하여 축척효과가 고려된 자항요소들로 전달미력까지 추정한 결과를 나타낸다. García-Gómez (2000)의 실선 k 추정방법에 비하여 η_D 를 과도하게 추정하지 않은 것을 확인할 수 있다. 그리고 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale의 경우 전달미력이 약 7%정도의 차이, KCS 1/97scale과 1/31.6scale의 경우에는 약 9%정도의 차이를 보인다. ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 KVLCC2의 경우 약 2%정도 감소하였지만 KCS의 경우에는 변화가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. Min and Kang (2010)의 연구에서도 García-Gómez (2000)과 마찬가지로 선종별 선형특성을 고려하지 않았으며, FCF 곡선을 레이놀즈 수 증가에 따라 쌍곡선 함수 형태로 근사하였다. 하지만 레이놀즈 수 증가에 따른 모형선과 실선의 k의 비인 FCF가 쌍곡선 함수의 형태가 아닐 수도 있을 것이다. 따라서 적절한 함수 형태를 찾는 것이 중요할 것으로 판단되며, 선종에 따라 선형특성이 다르기 때문에 이를 고려하는 것도 중요할 것으로 생각된다.

Table 7 Comparison of powering performance applied Min and Kang (2010) method(KVLCC2)

	1/160scale (IUTT) applied Min and Kang (2010) method	1/58scale (Kim, et al., 2000) applied Min and Kang (2010) method
t	0.182	0.190
W_M	0.679	0.443
W_S	0.382	0.312
η_R	1.010	1.009
η_H	1.324	1.177
η_0	0.534	0.620
η_D	0.714	0.737
EHP	15563	14958
DHP	21800	20309

Table 8 Comparison of powering performance applied Min and Kang (2010) method(KCS)

	1/97scale (IUTT) applied Min and Kang (2010) method	1/63.2scale (KRISO) applied Min and Kang (2010) method	1/31.6scale (KRISO) applied Min and Kang (2010) method
t	0.187	0.204	0.188
W_M	0.347	0.282	0.262
W_S	0.277	0.261	0.246
η_R	1.013	1.009	1.011
η_H	1.078	1.078	1.077
η_0	0.553	0.632	0.640
η_D	0.630	0.688	0.697
EHP	20484	20256	20817
DHP	32515	29369	29867

4.3 Ha, et al.의 실선 형상계수 추정방법 적용

Ha, et al. (2013)에서는 FCF 곡선을 제외하고 Min and Kang (2010)의 연구와 동일한 가정과 방법을 사용하였으며, García-Gómez (2000)와 Min and Kang (2010)에서 사용된 모든 모형시험결과들을 이용하여 레이놀즈 수에 따라 선종별로 FCF를 분포시켜 평균 제곱의 오차(RMSE)가 가장 작은 곡선들을 다양하게 추정하였다. 본 연구에서는 모형 크기마다 추정된 실선 k의 차이를 보다 줄이기 위하여 Ha, et al. (2013)의 FCF곡선을 수정하였다. 식 (4)는 최종적으로 결정된 수정된 Ha, et al. (2013)에서의 실선 k 추정방법을 나타낸다.

$$FCF = \frac{(1+k)_M}{(1+k)_\infty} = \frac{(1+k)_M}{(1+k)_S} = a \cdot e^{b(x+c)} + d \quad (4)$$

$$x = \log R_n$$

$$a_{L,M} = -38.480, \quad b_{L,M} = -1.000, \quad c_{L,M} = 0, \quad d_{L,M} = 1$$

$$a_H = -38.480, \quad b_H = -1.000, \quad c_H = -0.535, \quad d_H = 1.004$$

여기서, 아래첨자 L, M 은 중저속선, 아래첨자 H 는 고속선을 나타낸다. 이 연구에서는 레이놀즈 수에 따른 FCF 곡선이 설계속도 20knot를 기준으로 중저속선과 고속선으로 분포되며 지수함수 형태가 레이놀즈 수에 따른 FCF 곡선의 변화를 잘 반영하였다. Table 9와 10은 Ha, et al. (2013)의 실선 k 추정방법으로 축척효과가 고려된 자항요소들로 전달마력까지 추정한 결과를 나타낸다. Table 3, 4와 비교하였을 때, η_0 의 축척효과를 무시할 만큼의 실선의 k를 적절히 추정함을 확인할 수 있다. Ha, et al. (2013)의 연구에서는 모형 크기 별로 실선의 k를 추정하여 모형 크기 별 추정된 실선 전저항계수의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있어 레이놀즈 수에 따른 FCF 곡선은 쌍곡선 함수보다 지수 함수의 형태가 적절함을 보였다. 실선 전달마력을 추정한 결과 KVLCC2 1/160scale과 1/58scale은 약 5%정도의 차이를 보이며, KCS 1/97scale과 1/31.6scale도 약 5%정도의 차이를 보인다. 본 모형선들에 식 (4)를 적용하였을 때 W_S 를 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 상대적으로 크게 추정한다. 그리고 모형선 크기가 클수록 ITTC 1978년 방법에 비하여 W_S 변화는 작아진다. 크게 추정된 W_S 에 의하여 η_H 가 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 상대적으로 크게 증가하게 되는데, 이로 인하여 η_D 추진계수를 크게 추정하게 된다. Fig. 4, 5는 KVLCC2와 KCS에 대하여 ITTC 1978년 실선 성능추정방법과 Ha, et al. (2013)의 방법들로 추정된 전달마력 곡선들을 보여준다. 레이놀즈 수 차이에 의한 실선의 k를 고려해 줌에 따라 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 모형 크기마다 추정된 전달마력의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 소형 모형선에서 실선의 k를 추정할 때 레이놀즈 수에 따른 적절한 함수 형태를 찾아주어야 하며, 소형 모형선의 경우 실선의 k의 축척효과를 고려하였을 때, 전달마력을 다른 크기의 모형선들과 근접하게 추정할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

Table 9 Comparison of powering performance applied Ha, et al. (2013) method(KVLCC2)

	1/160scale (IUTT) applied Ha, et al. (2013) method	1/58scale (Kim, et al., 2000) applied Ha, et al. (2013) method
t	0.182	0.190
W_M	0.679	0.443
W_S	0.392	0.309
η_R	1.010	1.009
η_H	1.345	1.172
η_0	0.534	0.620
η_D	0.726	0.733
EHP	15563	14958
DHP	21437	20402

Table 10 Comparison of powering performance applied Ha, et al. (2013) method(KCS)

	1/97scale (IUTT) applied Ha, et al. (2013) method	1/63.2scale (KRISO) applied Ha, et al. (2013) method	1/31.6scale (KRISO) applied Ha, et al. (2013) method
t	0.187	0.204	0.188
W_M	0.347	0.282	0.262
W_S	0.304	0.262	0.247
η_R	1.013	1.009	1.011
η_H	1.168	1.079	1.078
η_0	0.553	0.632	0.640
η_D	0.655	0.688	0.698
EHP	20484	20256	20817
DHP	31274	29369	29824

Fig. 4 Estimations of the rpm, the effective horse power and the delivered horse power of the full scale ship(KVLCC2)

Fig. 5 Estimations of the rpm, the effective horse power and the delivered horse power of the full scale ship(KCS)

또한 실선과 모형선의 레이놀즈 수 차이에 의한 영향은 KVLCC2와 같은 저속비대선이 KCS와 같은 선형에 비하여 큰 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 KVLCC2와 KCS 소형 모형선들에 대하여 자항 시험을 수행하고 자항요소들을 비교함으로써 선형 차이에 따른 WM 특성을 파악하여 보았다. 또한 축척효과를 고려한 실선미력 추정방법에 대하여 기초자료를 제시하고자 하였다.

- 1) KVLCC2 1/160scale과 KCS 1/97scale 모형선들의 속도에 따른 W_M 를 비교하였을 때, 선체 주위 유동의 영향으로 KVLCC2 1/160scale 모형선의 속도에 따른 W_M 의 변화가 KCS 1/97scale 모형선에 비하여 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 W_M 변화는 다른 W_S , η_H 에 큰 영향을 미친다.
- 2) 모형선과 실선의 레이놀즈 수 차이를 고려한 실선 k추정방법들을 이용하여 실선미력을 추정하여 보았다. W_S 를 크게 추정함으로써 η_H 가 증가하였으며, 이로 인하여 전달미력을 ITTC 1978년 실선 성능추정방법에 비하여 작게 추정하였다.
- 3) KVLCC2와 KCS 소형 모형선들의 자항시험결과로부터 Ha, et al. (2013)의 연구결과를 이용하여 전달미력을 추정하였을 때 큰 모형선들과 비교하면 약 5%까지 줄일 수 있었다. García-Gómez (2000)와 Min and Kang (2010)의 연구결과를 적용하였을 때에 비하여 그 차이가 크게 줄었는데, 모형선과 실선의 레이놀즈 수 차이에 의한 k의 축척효과를 고려하기 위하여서는 적절한 함수의 형태 선정이 중요하다.
- 4) 소형 모형선에서 모형선과 실선의 레이놀즈 수 차이를 고려한 실선 k의 추정방법을 적용하여 η_D 를 추정하였을 때, ITTC 1978년 실선 성능추정방법으로 추정한 η_D 와 비교하면 KVLCC2와 같은 저속비대선의 경우 KCS에 비하여 η_D 의 변화가 큰 것을 확인

할 수 있다. 저속비대선의 경우 모형선과 실선 레이놀즈 수의 차이에 의한 영향이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

- 5) 향후, KLVG와 같은 중속선에 대하여 자항시험을 수행하고 이를 KVLCC2와 KCS 모형선들과 비교함으로써 선형차이에 의한 유효반류비 특성을 비교할 것이며, 다양한 축척비에 대한 자항시험결과들과 비교함으로써 실선미력추정방법에 대한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

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.
- Ha, Y.J. Lee, Y.G. & Kang, B.H., 2013. A Study on the Estimation of the Form factor of Full-scale Ship by the Experimental Data of Geosim Models. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(5), pp.291-297.
- Kim, W.J. Van, S.H. Kim, D.H. & Lee, C.J., 2000. Experimental Study on Local Flow Characteristics and Propulsive Performance of Two KRISO 300K VLCCs with Different Stern Shapes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(3), pp.11-20.
- 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.
- Yang, H., Kim, B.N., Yoo, J. & Kim, W.J., 2010. Wake Comparison between Model and Full Scale Ships Using CFD. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.150-162.

하 윤 진

이 영 길