

자유항주모형시험을 이용한 KCS 선형의 축척비별 조종성능에 관한 연구

윤근항^{1,†}·최후재²·김동진¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소¹
아비커스²

An Experimental Study on the Manoeuvrability of KCS with Different Scale Ratios by Free Running Model Test

Kunhang Yun^{1,†}·Hujae Choi²·Dong Jin Kim¹
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering¹
Avikus Co., Ltd.²

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.

There have been many experimental studies on the manoeuvrability of KRISO Container Ship (KCS). However, the scale ratio of the model ship and the test procedure for each institute are slightly different, so direct comparison for the data is technically difficult to perform. This paper presents the manoeuvrability of the ship with different scale ratios: 1/65.8, 1/42.0, and 1/31.6 in model scale. KRISO conducted Free Running Model Tests (FRMT): 35° turning circle tests and 20/20(10/10) zigzag manoeuvring tests. The test results indicated that advance and tactical diameter in turning circle tests were similar, and overshoot angles in two zigzag manoeuvring tests increased as the model ship size increased. In addition, a basic concept for the FRMT method with an auxiliary X-thrust device was proposed so that the scale effect could be considered in model ship tests.

Keywords : Scale(축척비), Auxiliary thrust(보조추력), Manoeuvrability(조종성능), KCS(KRISO 컨테이너선), FRMT(자유항주모형시험)

1. 서론

선박의 저항추진, 내항조종 등의 운항성능은 선박이 건조되기 전 설계 단계에서 모형시험을 통하여 예측된다. 일반적으로 모형시험은 설계 선박의 운항조건을 고려하여 시험시설이 허용하는 최대크기로 제작된 모형선으로 수행되는데, 그 이유는 실선박과 모형선의 Froude 수 상사조건을 맞추되 유체력을 정밀하게 계측하여 모형시험의 불확실성을 최소화하기 위함이다.

한편 선박의 운항성능 중 조종성능을 추정하기 위한 시험의 경우, 구속모형시험과 자유항주모형시험으로 크게 구분할 수 있다 (Kim et al., 2011, Shin & Choi, 2011). 구속모형시험은 저항추진 시험과 같이, 일반적으로 예인수조에서 수행된다. 선박해양플랜트연구소의 경우 모형선의 크기는 앞서 설명한 바와 같이 최대크기로 할 때 약 7~8 m 정도로 제작하고 있다 (Yeo, 2012). 이에 반하여 자유항주모형시험의 경우, 실용적인 관점

에서 모형선의 크기가 결정되고 있는데, 다루어야 할 모형선의 시험 속도, 배수량, 시험 장소 등이 고려된다. 자유항주모형시험을 위한 모형선의 크기는 일반적으로 1~2 m/s의 속도, 200 kg 이내의 배수량, 4 m 이내의 길이에 해당하는 소형으로 결정된다 (Park et al., 2020). 예를 들면, 선박해양플랜트연구소가 보유한 해양공학수조(56×30×4.5 m (L×W×D))에서 시험을 수행하는 경우, 35도 선회시험, 10/10, 20/20 지그재그시험 수행을 위한 모형선의 최대 시험속도는 모형선의 가감속 시간 등을 고려할 때 통상적으로 최대 약 1.2 m/s 이내의 속도로 결정되고, 이 경우 사용되는 모형선의 길이는 상사비에 따라 3.5m 내외이다 (Kim et al., 2019; Kim et al., 2020).

따라서, 선박의 조종성능 추정을 위한 두 가지 모형시험법에서는 사용하는 모형선 크기에 있어 축척비 차이가 발생하고, 이에 따라 관련 실험 조건 및 작용하는 유체력의 크기, 특성에서 상호간 차이가 발생할 수 있어 동일한 실선성능 추정에 어려움이 있다. 자유항주모형시험의 경우, 축척효과 중 하나로 모형선

의 크기가 작아질수록 마찰저항 성분의 증가에 따라 시험속도에 도달하기 위한 프로펠러 회전수가 실선대비 일부 증가하게 된다. 이는 방향타의 유입류 속도 측면에서 볼 때 타력의 증가효과를 가져오나 반류 역시 작은 모형선에서는 증가하게 되어 결과적으로는 서로 상쇄하는 것으로도 알려져 있다 (ITTC, 2014). 하지만 아직까지 축척효과에 대한 표준화된 보정방법은 제시되지 않았으며, 일부 시험방법이 제안되고 있다 (Ueno et al., 2014).

본 연구에서는 다른 축척비에서 일반적으로 수행되고 있는 두 가지 조종성능추정 시험법에 의한 추정결과 정도의 차이를 확인하고 이를 보완하기 위하여, 축척비별 세 가지 KCS 선형에 대한 조종성능시험을 수행하였다. 이를 통하여 구속모형시험과 자유항주모형시험 각 시험에서의 축척비에 따른 조종성능 변화뿐만 아니라, 동일 축척비에서의 구속모형시험과 자유항주모형시험의 오차를 비교하여 축척비에 따른 시험수행 결과의 정확도를 상호 비교하고자 하였다. 이러한 목적 아래 본 논문에서는 일차적으로 KCS 선형의 축척비별 자유항주모형시험으로부터 조종성능의 변화를 관찰하였다. 특히 선회시험 중 계측된 타력을 이용하여 그 원인을 분석하고자 하였으며, 전진방향 보조추력장치를 이용한 기초시험을 추가로 수행하여 타력에 영향을 미치는 타유입류 변화 조건에서의 조종성능 변화 정도를 확인하였다.

2. 자유항주모형시험

본 연구에서는 Table 1과 같이 1/65.8, 1/42.0, 1/31.6 축척비의 KCS 선형을 대상선으로 정하였다. 축척비별 제시된 값 중 GM, Kzz, Kxx는 모형선 준비, 장비설치 상태에서 계측된 값이며, 괄호안의 값은 기준 대비 오차를 의미한다. 모든 시험은 실선기준 24노트 대응 속도에서 수행되었으며, 각 모형의 프로펠러 회전속도는 해당 대응 속도를 내기 위한 속도시험을 통해 사전 결정되었다.

1/65.8 축척비 모형선의 경우, 동일한 날개 수를 가지는 형상이 비슷한 프로펠러가 활용되었고, Kzz값이 다른 모형선 대비 작은 값으로 시험이 수행되었다는 차이점을 가지고 있다.

Table 1 Principal dimensions of KCS model ships

Item	Full-scale	Model-scale 1	Model-scale 2	Model-scale 3
Scale	1	1/65.8	1/42.0	1/31.6
Lpp(m)	230.0	3.494	5.476	7.278
GM(m)	0.60	0.009 (+0.6%)	0.014 (-0.9%)	0.019 (+0.8%)
Kzz(L)	0.25	0.20 (-18.1%)	0.25 (+2.0%)	0.25 (+0.9%)
Kxx(B)	0.40	0.43 (8.0%)	0.42 (7.2%)	0.42 (4.6%)
Propeller RPS	-	16.4	12.7	10.8

각 모형선의 자유항주모형시험은 모두 옥외에서 수행되었고 그 형상은 아래의 Figs. 1-3과 같다. 선박의 조종성능 확인을 위한 일반적인 표준시험항목 중, 선회시험, 지그재그시험을 수행하였다.

위치, 속도, 가속도 등을 계측하기 위해 모형선에 탑재된 센서장비와 시험 운용프로그램 및 시험 절차는 세 모형선에서 모두 동일하다 (Yun et al., 2020). 단, 1/42.0과 1/31.6 축척비 모형선에는 출력이 더 높은 1 kW급 추진모터가 설치되었으며, 프로펠러 및 타에 걸리는 추력, 타력이 추가로 계측되었다. 또한 두 모형선 상부에는 바람을 생성하여 추가적인 추력이 발생 가능한 보조추력장치가 계측센서와 함께 설치되었다.



Fig. 1 KCS model ship - 1/65.8 scale

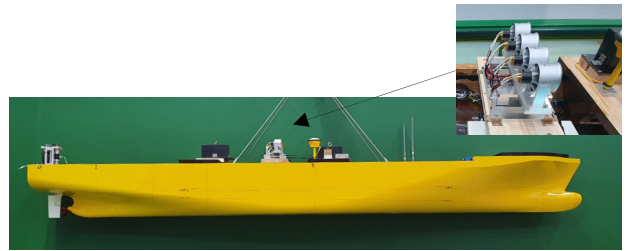


Fig. 2 KCS model ship - 1/42.0 scale



Fig. 3 KCS model ship - 1/31.6 scale

3. 시험 결과 및 고찰

자유항주모형시험에서 사용된 좌표계는 Fig. 4와 같고, 타각의 방향은 지그재그시험의 편의를 위하여 선체의 회전과 반대 방향을 양의 부호로 설정하였다.

세 가지 축척비의 KCS 모형선에 대하여 실선기준 24노트 대응 시험속도에서 35도 선회시험, 20/20, 10/10 지그재그시험을

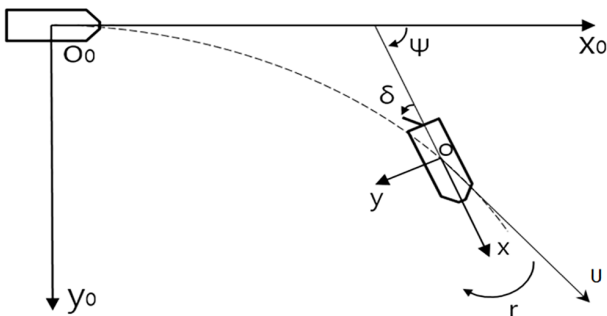


Fig. 4 Coordinate systems for free running model test

좌우현 방향에 대하여 각각 수행하였다. 계측된 조종성능 관련 지표는 상호비교를 위하여 모두 실선기준 대응값으로 단순 변환하였고 모두 좌우 평균값으로 나타내었다.

3.1 선회시험 및 지그재그시험 결과

선회 및 지그재그 시험결과를 축척비에 따라 단순히 비교해 보면, Table 2와 같이 선회시험의 경우 전진거리와 전술직경이 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 Table 3과 Table 4의 지그재그시험의 경우, 모형선이 클수록 오버슈트각이 증가하는 것을 각각 볼 수 있다.

MARIN에서 수행한 약 1/37.9 축척비 KCS 선형 모형선의 자유항주모형시험 결과는 Table 5와 같다 (SIMMAN, 2020). 선회 시험 결과 상호 비교 시 전진거리, 전술직경 지수는 축척비와 관계없이 비슷한 결과를 보여주고 있고, 선수동요각속도 등에서

Table 2 ±35° turning indices(average) with scale

Scale		1/65.8	1/42.0	1/31.6
Index	Advance, Ad(L)	2.99	2.95	2.97
	Time to reach Ad(s)	76.1	76.9	78.2
	Tactical diameter, TD(L)	2.79	2.70	2.74
	Time to reach TD(s)	145.4	148.9	151.8
	Maximum yaw rate(°/s)	1.77	1.62	1.58
	Final yaw rate(°/s)	1.22	1.17	1.14
	Maximum roll angle(°)	14.98	15.03	15.50
	Final roll angle(°)	4.92	4.58	4.64
	Final speed(knots)	11.89	10.96	10.79
	Final drift angle(°)	19.67	19.53	18.98
	Propeller RPS	2.02	1.96	1.92

Table 3 ±20/20 zigzag indices(average) with scale

Scale		1/65.8	1/42.0	1/31.6
Index	First overshoot angle(°)	23.12	25.55	26.61
	Time to reach first OA(s)	64.7	71.8	76.5
	Second overshoot angle(°)	20.80	22.83	23.12
	Time to reach second OA(s)	166.2	180.2	189.7

Table 4 ±10/10 zigzag indices(average) with scale

Scale		1/65.8	1/42.0	1/31.6
Index	First overshoot angle(°)	12.74	13.68	14.89
	Time to reach first OA(s)	32.9	59.9	69.1
	Second overshoot angle(°)	20.01	22.25	25.63
	Time to reach second OA(s)	169.4	183.9	196.1

Table 5 Manoeuvre indices by MARIN(1/37.9 KCS, average)

Turning tests		±35°	
Index	Advance(L)	2.92	
	Time to reach Ad(s)	77.87	
	Tactical diameter(L)	2.74	
	Time to reach TD(s)	153.55	
	Maximum yaw rate(°/s)	1.56	
	Final yaw rate(°/s)	1.11	
	Maximum roll angle(°)	16.98	
	Final roll angle(°)	5.09	
	Final speed(m/s)	10.50	
	Propeller RPS	1.87	
Zigzag tests		±20/20	±10/10
Index	First overshoot angle(°)	23.81	11.88
	Time to reach first OA(s)	69.34	66.42
	Second overshoot angle(°)	20.81	20.54
	Time to reach second OA(s)	176.32	177.03

1/31.6 축척비 결과와 비슷한 양상임을 확인할 수 있다. 그러나 지그재그시험 결과는 오버슈트각을 비교해볼 때 반대로 1/65.8 축척비 결과와 비슷한 양상을 보인다. 시험기관별로 시험을 수행하는 절차, 모형선 준비상태 등이 동일하지 않음을 고려하여, 실험의 불확실성 등 기관별 추가적인 상호 비교가 계속 필요할 것으로 판단된다.

3.2 선회시험 결과 고찰

세 가지 축척비별 선회시험 결과는 실선기준으로 변환되어 Fig. 8과 Fig. 9에 나타나 있다. 타각 사용량이 큰 35도 선회시험의 경우, 궤적 및 상태변수 시계열 그래프에서 유사한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있으며, 특히 횡동요각 변화, 선수동요각속도 변화 등이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 5는 1/42.0 축척비 모형선의 선회시험 중 계측된 타력을 나타낸 그림이다. 타력을 계측하는 2축 센서는 방향타와 같이 회전하도록 설치되어 있어, 타의 접선 및 수직방향으로의 힘이 시험 전구간 계속되었다. 자유항주모형시험 중 모형선은 구속 모형시험의 타각시험 등과 같이 정적시험 상태에 있지 않으므로, 그림에서와 같이 선회시험 중 첫 번째 선회 이후 선수동요각속도, 횡동요각 등이 정상선회 중인 구간에 대해서만 타력 해석을 수행하였다. 특히 선회에 의한 원심력, 횡경사에 의한 하중 등이

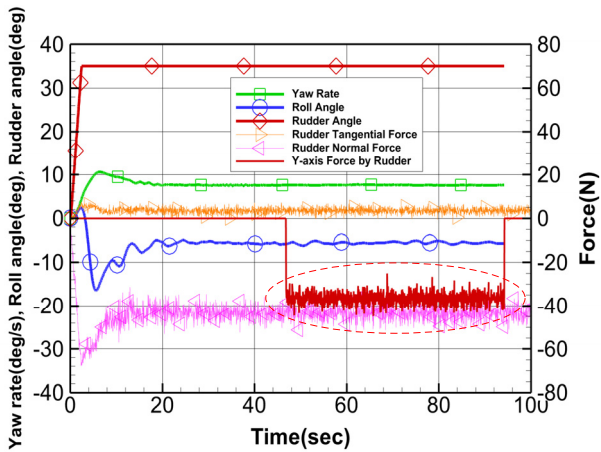


Fig. 5 +35° STBD turning test, rudder force - 1/42.0 scale

Table 6 Rudder coefficient during a steady turn with scale

Scale		1/31.6	1/42.0	Ratio
CRy	±35° turning tests	1.34	1.38	103.4%
	±20° turning tests	0.43	0.45	105.0%

타력에 포함되어 계측되므로, 이를 정상선회 상태의 선회반경, 방향타의 질량 및 수중 무게 등을 이용하여 이론적으로 제거하고 오일러변환을 통해 횡방향 성분을 추출하였다.

Table 6은 두 가지 축척비 모형선의 좌우 선회시험에 대하여, 정상선회 중 방향타에 의한 횡방향 힘을 위와 같은 방법으로 계산하여 비교한 것으로, 타면적과 선회 중의 속도로 무차원화한 타력계수 CRy의 값으로 표시하였다. 1/42.0 축척비 모형선에서의 타력계수는 1/31.6 축척비 모형선에 비하여 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 서론에서 설명한 바와 같이, Table 2에서 보이는 프로펠러 회전속도 증가에 따른 타유입류 변화와 그에 따른 타력의 변화로 추정되며, 여기에는 반류에 의한 영향이 포함되어 있다. KCS 선형의 경우, 20도 선회시험에서의 타력계수 증가율이 30도 선회에 비하여 조금 더 높은 것으로 측정되었다.

3.3 지그재그시험 결과 고찰

세 가지 축척비별 지그재그시험 결과는 실선기준으로 변환되어 Figs. 10-13에 나타나 있다. 축척비에 따른 20/20 지그재그시험의 1차 오버슈트각 변화는 Fig. 6에 나타나 있고, 10/10 지그재그시험의 1차, 2차 오버슈트각 변화는 Fig. 7에 나타나 있다. 10도 타각 및 20도 타각의 지그재그시험의 경우, 그 조종지표에서 축척비에 따른 영향이 조금 더 나타난 것을 확인할 수 있다. 특히 10/10 지그재그시험의 경우, 변침 상황이 누적되어 나타나는 2차 오버슈트각의 변화 기울기가 1차 오버슈트각 변화 기울기 보다 증가한 것을 볼 수 있다.

또한 오버슈트각의 변화와 그 도달시각의 변화는 Fig. 10의 모형선 궤적에 표시한 것과 같이 모형선의 초기 진행방향 기준

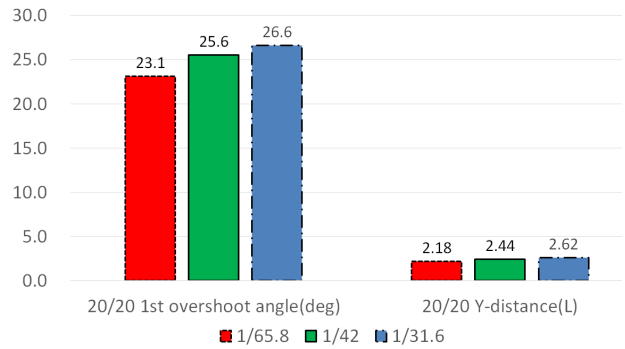


Fig. 6 ±20/20 zigzag tests overshoot angle and Y-distance

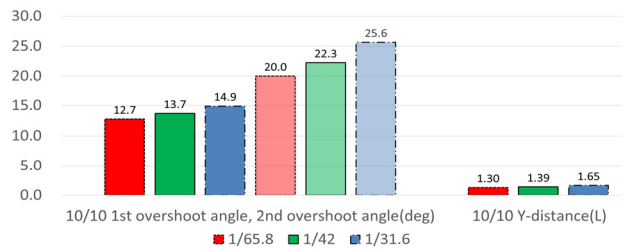


Fig. 7 ±10/10 zigzag tests overshoot angle and Y-distance

좌우방향으로의 이격거리의 변화를 가져오게 된다. 20/20, 10/10 지그재그시험에 축척비에 따른 1차 오버슈트각 변화율과 이격거리 변화율은 서로 비슷한 경향이 확인된다. 예를 들어, 1/65.8 축척비에서 1/42.0 축척비로 변경될 경우 오버슈트각은 23.1도에서 26.6도로 15% 증가하고, 그에 따른 이격거리는 2.18L에서 2.62L로 20% 증가하였다. 따라서 추정된 변침성능의 차이는 단순히 각도의 수치 차이 뿐만 아니라 변침 시 선박의 궤적에도 큰 영향을 미치므로, 모형선을 통한 변침성능의 예측은 모형선 축척비를 고려하여 좀 더 면밀히 추정될 필요가 있음을 본 시험결과로부터 알 수 있다.

3.4 전진방향 보조추력을 이용한 조종시험

구속모형시험의 경우, 전차에 의한 모형선의 예인이 가능하므로 실선의 조종성능 추정을 위해 프로펠러 회전속도를 모형선의 자항점 대비 낮추어 시험을 수행할 수 있다 (Sung et al., 2009). 그러나 자유항주모형시험의 경우, 프로펠러 추진력에 의해서만 모형선이 전진하므로 속도별 대응 프로펠러 회전속도는 조정이 불가능하다. 축척비별 모형선의 조종성능지표 차이의 주요인자가 프로펠러 회전속도 및 반류 차이에 의한 타유입류의 변화라는 가정 하에 전진방향으로만 작동하는 보조추력장치를 이용하여 모형선속도는 유지하되 프로펠러 회전속도를 낮추고, 이를 통해 타유입류의 속도를 저하시키는 자유항주모형시험을 추가로 수행하였다. 보조추력장치는 축척비에 따라 계산된 미찰저항 증가분과 보조추력장치 작동 시 계측된 힘을 바탕으로 그 추력을 시험 중 수동 고정하였으며, 결과적으로는 낮은 프로펠러 회전속도에서도 모형선의 초기 시험속도가 동일하게 유지되었다.

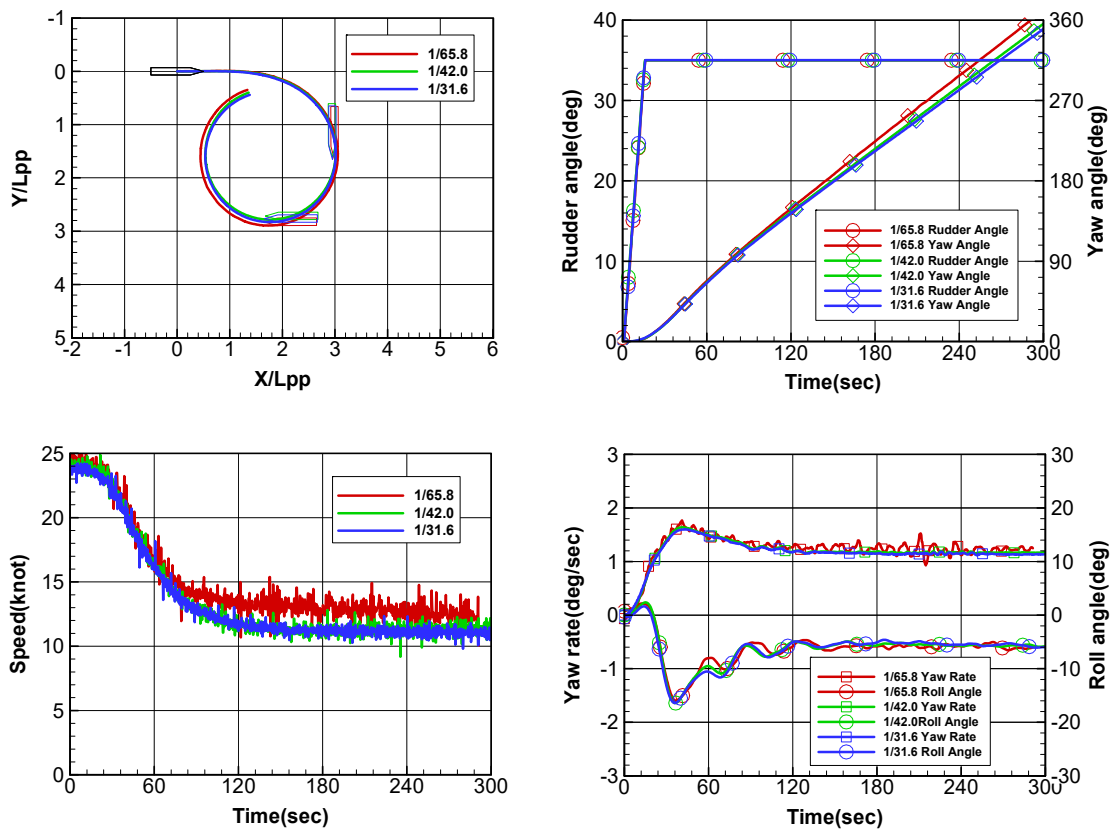


Fig. 8 +35° STBD turning tests data

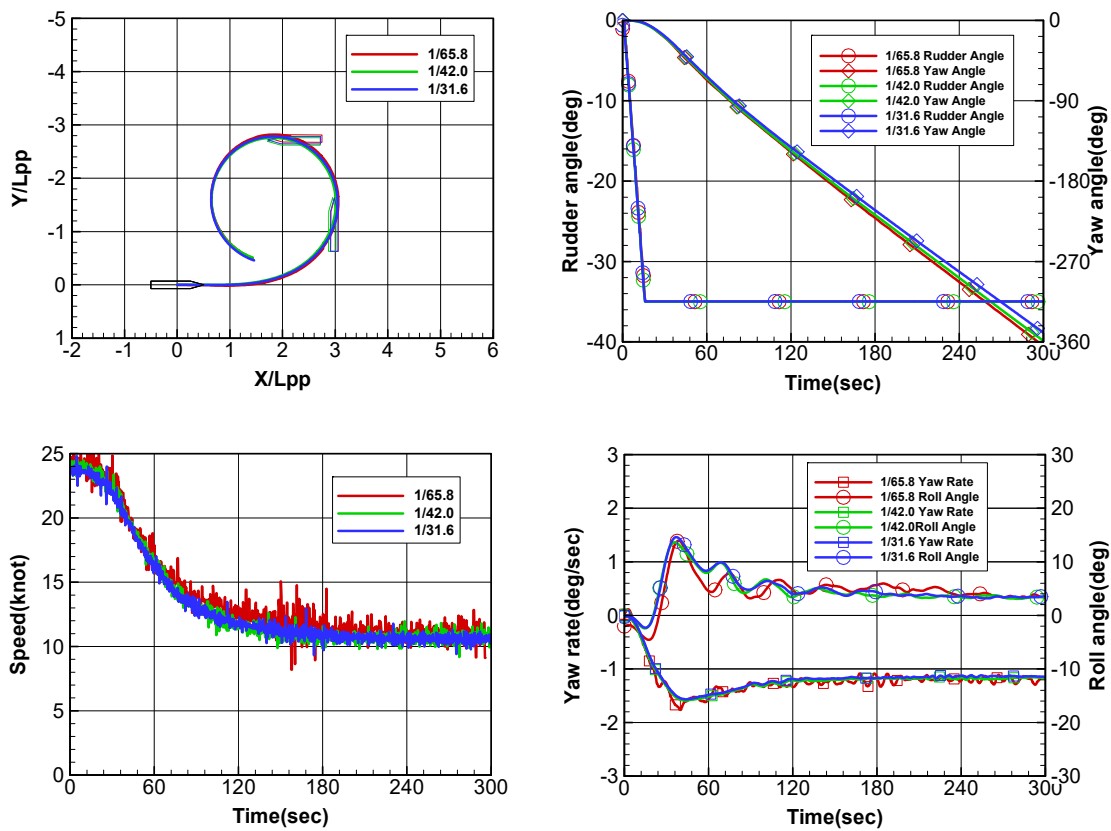


Fig. 9 -35° PORT turning tests data

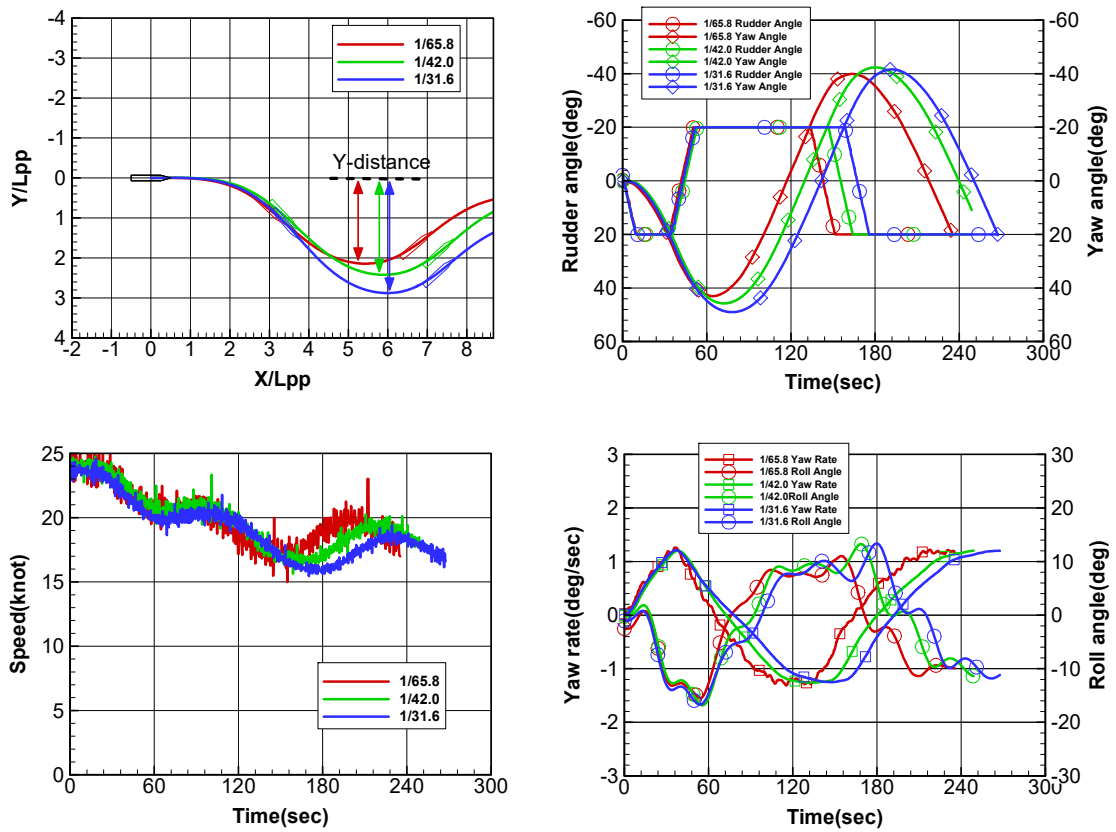


Fig. 10 +20/20 STBD zigzag tests data

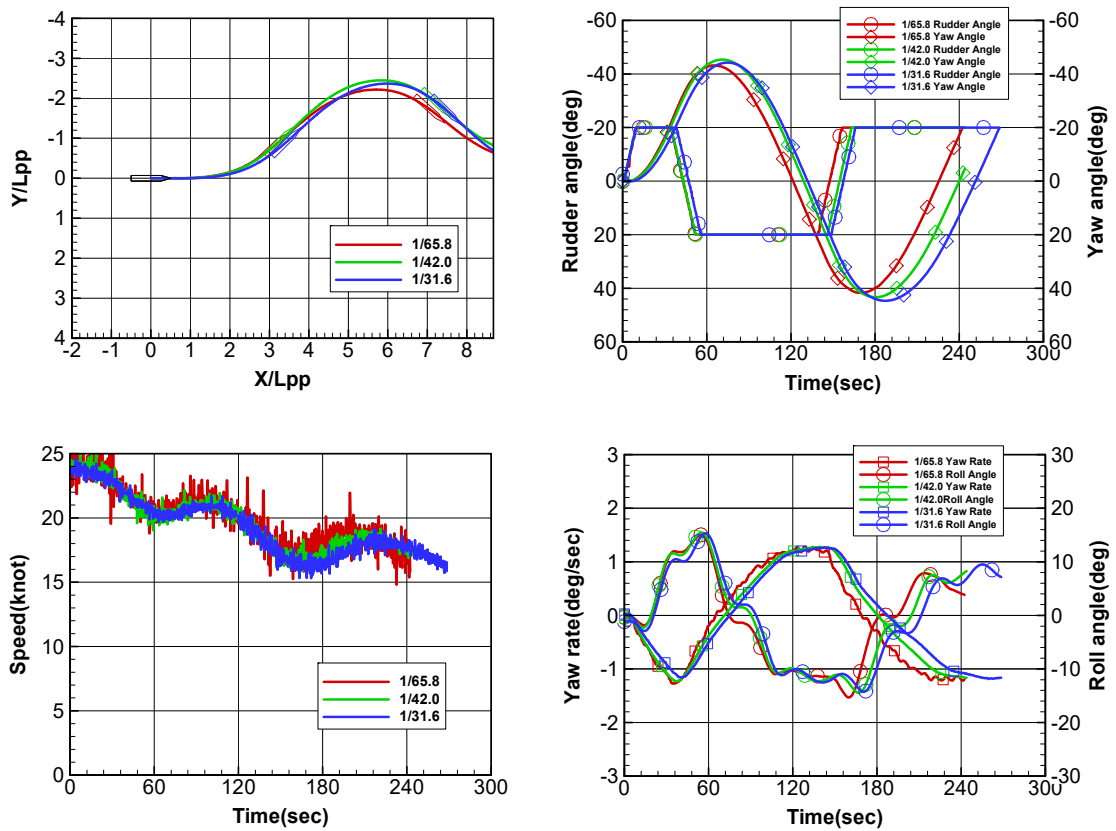


Fig. 11 -20/20 PORT zigzag tests data

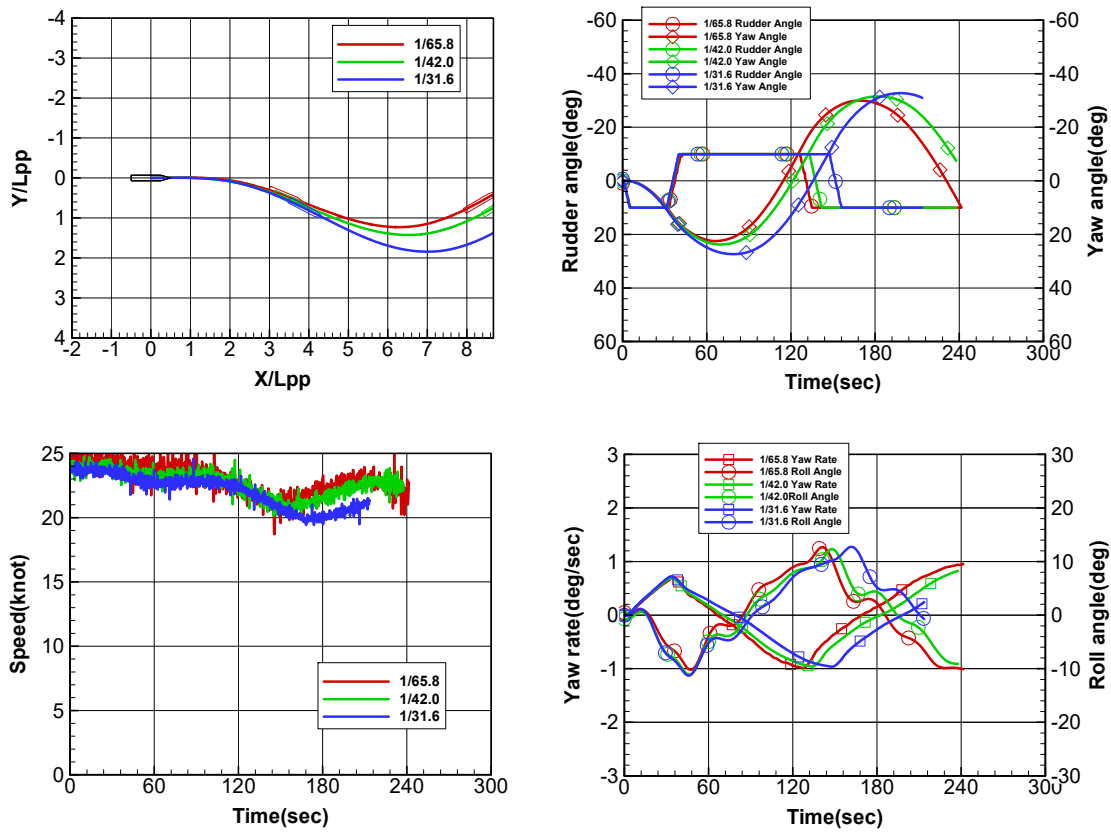


Fig. 12 +10/10 STBD zigzag tests data

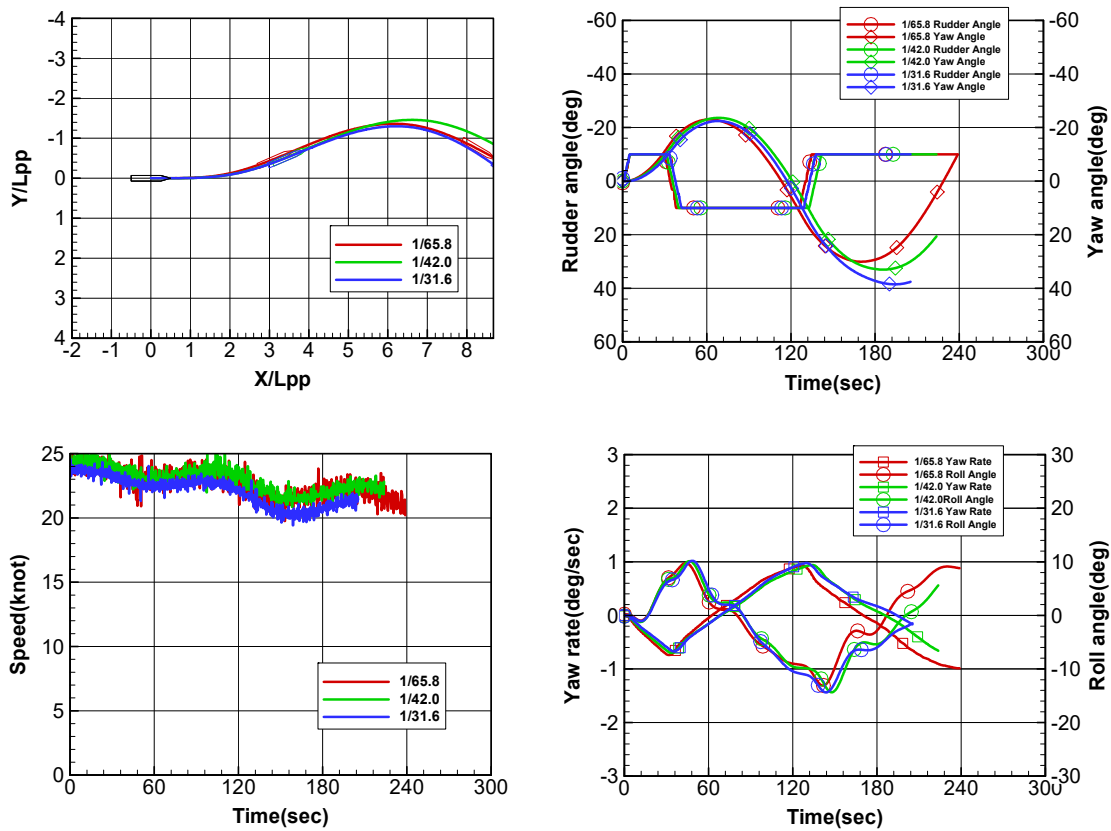


Fig. 13 -10/10 PORT zigzag tests data

경향성을 확인하기 위하여 1/42.0 축척비 모형을 사용하여 Fig. 14, Fig. 15와 같은 두 가지 프로펠러 회전속도 및 보조추력 변경 조건에 대한 24노트 우현 35도 선회시험과 우현 10/10 지그재그시험을 수행하였다.

35도 우현 선회시험 결과, Fig. 14와 같이 1/42.0 축척비 모형선의 프로펠러 회전속도가 낮아질수록 전진거리와 전술직경이 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있고, 1/31.6 축척비 모형선 시험결과와 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Table 7의 타력계수를 통해서도 확인할 수 있는데, 동일 모형시험 속도에서 프로펠러 회전수를 낮춤에 따라 그 타력계수가 낮아진 것을 정량적인 값으로 확인할 수 있다. 특히 낮아진 타력계수에 비해 35도 선회시험의 조종지표는 앞서 설명한 축척비 결과와 같이 크게 영향을 받지 않은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 동일한 조건에서의 우현 10/10 지그재그시험 결과이다. 단, 1/31.6 축척비 모형시험 결과의 경우 좌우 편차로 인하여 평균값을 비교용으로 사용하였다. 앞서 설명한 선회시험의 결과와 유사하게 프로펠러 회전속도가 낮아질수록 오버슈트각이 증가하며, 1/31.6 축척비 모형선 시험결과와 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

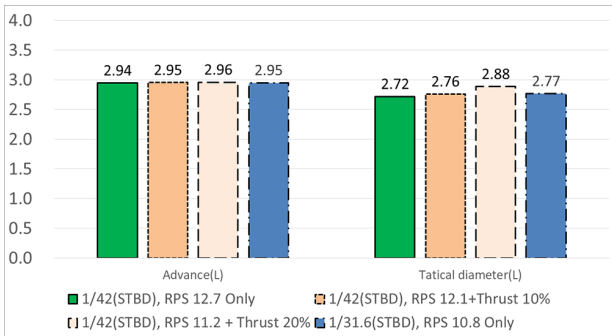


Fig. 14 +35° STBD turning tests with auxiliary thruster

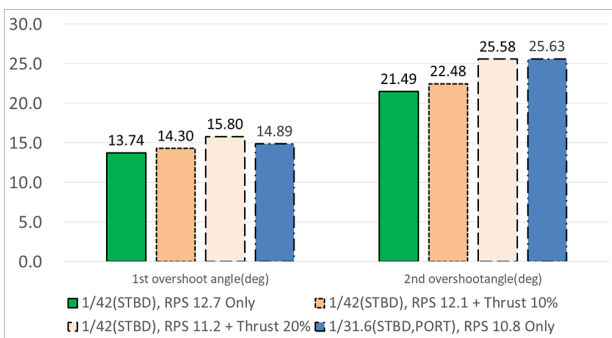


Fig. 15 +10/10 zigzag tests with auxiliary thruster

Table 7 Rudder coefficient during a steady +35° STBD turn with auxiliary thruster

Scale	1/42.0			1/31.6
RPS	RPS12.7	RPS12.1	RPS11.2	RPS10.8
Auxiliary thruster	-	10%	20%	-
CRy (+35° STBD turning tests)	1.41	1.26	1.07	1.31

선회시험과 지그재그시험 결과로부터 보조추력을 정밀하게 적용할 경우, 보다 큰 모형선에서 수행되는 시험결과와 유사한 결과를 획득할 수 있음을 확인하였다. 개선된 실선성능 추정을 위해서는 타유입류 등을 고려한 프로펠러 회전조건과 보조 추력조건에 대한 이론적인 연구와 실험을 통한 검증이 추가적으로 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 KCS 모형선에 대하여 세 가지 축척비에 대한 자유항주모형 조종시험을 수행하였다. 특히 기존의 소형선 위주의 시험결과를 벗어나 1/42.0, 1/31.6 축척비의 비교적 큰 모형선을 사용하여 자유항주모형시험을 수행하였고, 그 조종성능 결과를 수치로 제시하였다. 본 시험을 통해 획득된 KCS 선형의 축척비별 조종시험 결과는 동일한 기관에서 동일한 절차에 의해 수행된 자유항주모형시험 결과와는 점에서 큰 의미를 가진다.

세 가지 축척비에 대한 자유항주모형시험을 통하여 다음과 같은 조종성능변화를 관찰하였다. 35도 선회시험의 경우, 전진거리와 전술직경이 축척비에 따라 큰 영향을 받지 않았다. 하지만 지그재그시험의 경우, 축척비에 의한 영향을 볼 수 있었고, 10/10 지그재그시험의 2차오버슈트각이 큰 영향을 받음을 정량적으로 확인하였다. 두 가지 축척비의 자유항주모형시험 중 방향타에 걸리는 힘을 계측하여 제시하였고, 이를 통해 모형선의 축척비에 따른 타력계수의 차이를 확인하였다. 본 계측결과는 구속모형시험 및 전산유체역학에서의 시뮬레이션 비교검증에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

또한 전진방향 보조추력장치를 단계별로 이용하여, 1/42.0 축척비 모형선에서도 1/31.6 축척비 모형선의 조종시험결과와 유사한 결과를 나타내는 기초연구를 수행하였고 그 적용 가능성을 확인하였다. 프로펠러 추력 및 타력에 영향을 미치는 선미부 유체의 흐름을 이와 같은 장치를 이용하여 모사할 경우, 실선에 보다 유사한 조종성능을 유추할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 이에 대한 이론적인 접근방식에 대한 향후연구가 수행될 예정이다.

마지막으로 동일한 세 가지 모형선을 공유하여 수행한 구속 모형시험 결과에서 도출된 유체력 미계수 및 시뮬레이션을 통한 조종성능결과를 비교, 분석하여 축척비에 따른 시험수행 결과의 정밀도를 상호 비교 검증할 예정이다.

후기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어원천 기술 개발(3/5)”에 의해 수행되었습니다(PES3860).

References

ITTC, 2014, Recommended procedures and guidelines, *Free*

- running model tests*, pp.3–4.
- Kim, D.J. et al., 2019. Experimental investigation on turning characteristics of KVLCC2 tanker in regular waves. *Ocean Engineering*, 175, pp.197–206.
- Kim, D.J., Yun, K., Yeo, D.J. & Kim, Y.G., 2020. Initial and steady turning characteristics of KCS in regular waves. *Applied Ocean Research*, 105, pp.1–17.
- Kim, Y.G. et al., 2011. Prediction of maneuverability of KCS with 4 degrees of freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267–274.
- Park, J. et al., 2020. Uncertainty assessment of outdoor free-running model tests for evaluating ship maneuverability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(5), pp.262–270.
- Shin, H.K. & Choi, S.H., 2011. Prediction of maneuverability of KCS using captive model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.465–472.
- SIMMAN, 2020, *Instructions to participants, Case 3.2*, URL: <http://www.simman2020.kr> (Accessed 30 September 2021).
- Sung, Y.J., Ahn K., Lee T. & Rhee K.P., 2009. Effect of the self-propulsion point during PMM test on the prediction of ship manoeuvrability. *Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability*, Panama City, Panama, 17–20 August 2009.
- Ueno, M., Tsukada, Y., & Kitagawa, Y., 2014. Rudder effectiveness correction for scale model ship testing. *Ocean Engineering*, 92, pp.267–284.
- Yeo, D.J., 2019. On the crabbing tests of cruise vessel equipped with bow thrusters and POD System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), pp.327–332.
- Yun, K., Kim, D.J. & Yeo, D.J., 2020. An experimental study on the manoeuvrability of a ship in different GM and trim conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(4), pp.230–240.

