

자유항주모형시험을 이용한 KVLCC2 선형의 천수영역에서의 조종성능에 관한 연구

윤근항[†] · 여동진 · 박병재
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

A Study on the Manoeuvrability of KVLCC2 in Shallow Water by Free Running Model Test

Kunhang Yun[†] · Dong Jin Yeo · Byoungjae Park
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

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.

It has been reported that a ship sailing in shallow water possesses better straight-line stability due to the change of fluid flow around the ship. This tendency affects manoeuvring characteristics of the ship. To investigate this phenomenon, indoor free running model test(FRMT) on KVLCC2 was carried out in three water depth conditions(H/T = 1.2, 1.5 & 2.0). Turning circle tests($\pm 35^\circ$) and zigzag tests($\pm 20^\circ/5^\circ$ and $\pm 20^\circ/10^\circ$) were conducted with newly developed indoor FRMT system, and the manoeuvring results were compared with test results from other institutes. As the water depth decreased, the yaw rate of the ship decreased, and the distances of circular trajectories at the same heading angle increased in the turning circle tests. The first overshoot angles of the zigzag tests decreased. From both tests, the time for course change increased as the water depth decreased. These manoeuvring characteristics show that KVLCC2 in shallow water becomes more stable in terms of straight-line stability.

Keywords : Shallow water(천수), KVLCC2(KVLCC2), FRMT(자유항주모형시험), Manoeuvrability(조종성능)

1. 서론

선박의 대형화 추세에 따라 동일한 항로, 항만을 운항하더라도 상대적으로 얇은 수심에서 운항하게 되는 선박의 수가 증가하고 있다. 천수영역에서 운항되는 선박의 경우 얇은 수심으로 인하여 그 운항 특성이 달라지는데, 주로 저항의 증가, 선박의 자세변화 등이 나타난다(Béguin, et al., 2013). 이에 따라 항만, 수로 등 제한수역에서 운항되는 선박의 운항 특성을 이해하고 이를 예측하기 위한 연구가 실선을 대상으로 활발히 진행되고 있다(Beaulieu, et al., 2009). 한편 천수영역에서 운항 중인 선박의 조종성능은 그 직선 안정성의 변화로 인하여 일반적으로 선회직경이 커지거나, 지그재그 시 오버슈트각이 작아지는 것으로 알려져 있다(SNAME, 1989). 특히 심수영역에서의 조종성능과 비교 시 선회직경이 1.5배 이상 커지는 경우도 시뮬레이션 결과로 보고되고 있다(Kim, et al., 2008).

본 연구에서는 자유항주모형시험을 통하여 KVLCC2(KRISO Very Large Crude oil Carrier) 선형의 천수영역에서의 조종성능

변화를 실험적으로 규명하였다. 선박해양플랜트연구소가 기보유한 천수영역 구조물을 이용하여 세 가지 수심 조건을 구성하고, 실제 용도로 개발된 자유항주모형시험 장비를 이용하여 선회시험 및 지그재그시험의 시험시나리오를 설정하고 그 시험을 수행하였다. 천수영역 구조물의 크기 제한으로 인하여 선회시험 기록은 선수동요각 40° 내의 데이터를 분석에 활용하였고, 20°/5°, 20°/10° 지그재그시험 기록은 1차 오버슈트각 획득이 가능한 범위 내의 데이터를 분석에 활용하였다. 각각의 시험 결과를 수심 조건에 따라 분석하여 수심 변화가 선박의 조종성능 변화에 미치는 영향을 확인하였다. 마지막으로 다른 기관에서 수행한 천수영역 자유항주모형시험 결과와 비교하여 본 시험 결과의 유효성을 확인하였다.

2. 모형시험 준비

2.1 천수영역 및 시험 장비

선박해양플랜트연구소의 메인수조에 설치된 천수영역을 위한

구조물(false-bottom)의 주요 제원과 모습은 각각 Table 1, Fig. 1과 같다. 모형선이 시험 속도에 도달하기까지 필요한 가속구간과 시험 종료를 위한 감속구간을 천수영역 안에 포함하였으므로, 실제 조종시험이 수행된 시험구역은 천수 구조물에 의해 만들어진 천수영역보다 작다. 표에서와 같이 모형선의 선화시험 및 지그재그시험의 시험구역 크기는 길이 방향으로 약 37 m, 폭 방향으로 약 6 m이고, 이는 일반적으로 수행되는 자유항주모형시험의 시나리오를 수행하기에는 부족한 크기이다. 따라서 본 연구에서는 크기가 제한된 구역 내에서 시험을 수행하기 위하여 시험시나리오를 일부 수정하여 사용하였다.

Table 1 Principal dimensions of false-bottom

| Towing tank | | | |
|--------------|-----------|----------|---------|
| Item | Length | Width | Depth |
| Value (m) | 200 | 16 | 7 |
| False-bottom | | | |
| Item | Length | Width | Depth |
| Value (m) | 54 | 10 | 0-7 |
| Test area | | | |
| Item | Length | Width | Depth |
| Value (m) | 37 (9.7L) | 6 (1.6L) | 0.3-0.5 |



Fig. 1 KVLCC2 model ship on the false-bottom

실내 자유항주모형시험 수행을 위하여 위치계측을 위한 장비와 시험시나리오 수행을 위한 운용 프로그램을 개발하였다. Fig. 2의 위쪽 그림은 카메라를 이용하여 위치를 계측하는 “다중영상기반 선박위치 측정시스템”의 작동모습이며, 아래쪽 그림은 모형선을 시험시나리오에 따라 움직이게 하는 “자유항주모형시험 운용 프로그램”의 작동모습을 나타낸 그림이다. 계측된 모형선의 위치는 “자유항주모형시험 운용 프로그램”에 실시간으로 전달되고, 사용자는 모형선의 위치를 프로그램상의 그래프에서 확인할 수 있다. 또한 광섬유 자이로와 경사계 등에서 측정되는 모형선의 선수동요각, 선수동요각속도, 횡경사, 종경사 정보는 “자유항주모형시험 운용 프로그램”에 숫자로 표시되고, 위치와 함께 기록된다 (Yun, et al., 2015). 무선랜 기반의 통신 환경을 사용하

여 계측된 데이터를 원격송수신하였으며, 관련 프로그램의 운용 및 분석 작업에도 이를 활용하였다.

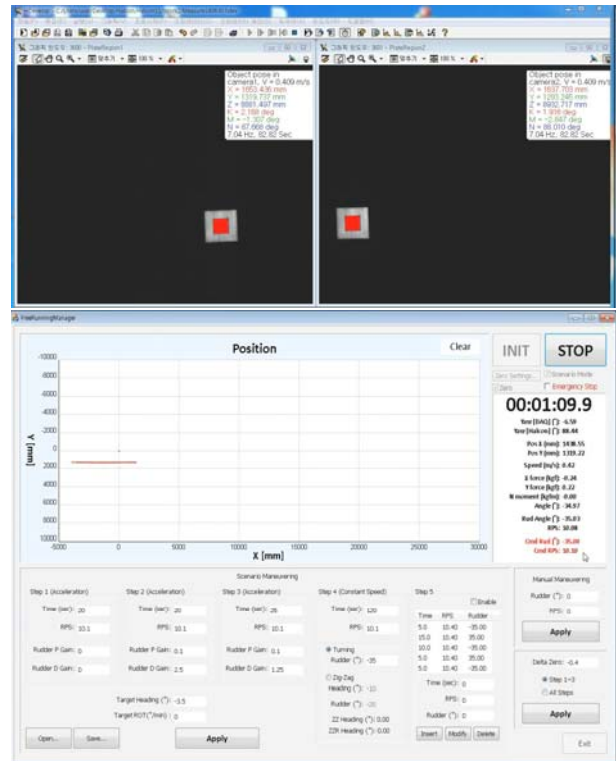


Fig. 2 KVLCC2 FRMT software

2.2 모형선 및 시험조건

자유항주모형시험에 사용된 모형선은 KVLCC2 선형으로, 시험구역의 크기와 모형선 내에 설치될 장비 크기를 고려하여 길이가 약 3.8 m인 모형을 제작하여 사용하였다. 모형선의 모습과 제원은 각각 Fig. 3, Table 2와 같다.

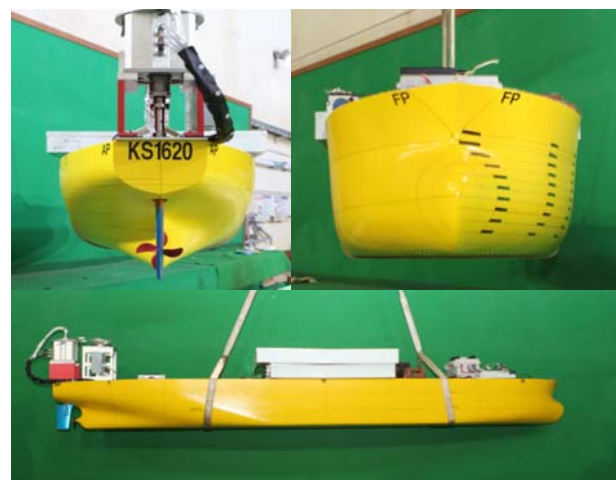


Fig. 3 KVLCC2 model ship with FRMT system

모형선 내부에는 각종 센서, 데이터 계측 PC, 방향타 및 프로

펠러 제어기, 배터리, 무게추 등이 설치되어 있고, 상부에는 실내 위치계측을 위한 특수판이 설치되어 있다.

Table 2 Principal dimensions of KVLCC2 model ship

| Item | Value |
|-------------------|--------|
| Scale ratio | 1/83.7 |
| LPP (m) | 3.82 |
| Breadth (m) | 0.69 |
| Draft (m) | 0.25 |
| Displacement (m3) | 0.533 |

모형선에 설치된 모든 장비는 Table 3과 같이 모형선의 적재 조건을 최대한 고려하여 그 위치가 결정되었다.

Table 3 Loading condition of KVLCC2 model ship

| Item | Target value | Measured value |
|---------|--------------|----------------|
| GM (m) | 0.0681 | 0.0659 (-3.3%) |
| lzz (L) | 0.25 | 0.265 (+6.4%) |
| lxx (B) | 0.4 | 0.376 (-6.1%) |

자유항주모형시험을 위한 시험조건은 Table 4와 같이 세 가지 수심 조건에서의 선회시험, 두 가지 수심 조건에서의 지그재그시험으로 구성되었다. 수심 조건은 식 (1)과 같이 수심과 모형선의 흘수비로 정의되며, 본 시험에서는 수심 조건 H/T를 Fig. 4와 같이 1.2, 1.5, 2.0의 세 가지로 구성하였다.

Table 4 Test conditions

| Test type | H/T | Item | speed | rps |
|---------------------|-----|-----------|-----------|-----------|
| Turning circle test | 1.2 | ± 35° | 0.393 m/s | 10.4(1.2) |
| | 1.5 | | | |
| | 2.0 | | | |
| Zigzag test | 1.2 | ± 20°/5° | 0.393 m/s | 10.1(2.0) |
| | 1.5 | ± 20°/10° | | |

$$H/T = \frac{Depth}{Draft} \quad (1)$$

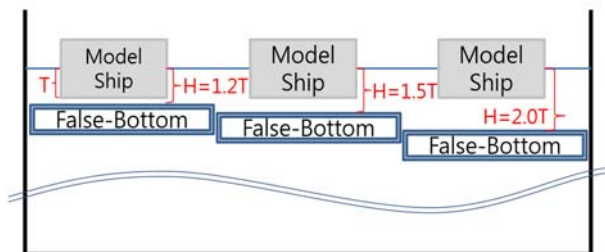


Fig. 4 Water depth conditions

KVLCC2 모형선의 시험 속도는 실선 기준 7.0노트의 속도인 0.393 m/s이고(Fn 0.064), 프로펠러 회전속도는 각 수심 조건별로 모형선의 속도시험에 의해 각각 결정되었다.

3. 모형시험 결과

선회시험, 지그재그시험 시나리오에 대한 자유항주모형시험 결과를 실선크기로 상사 변환한 후 분석하여 궤적과 거리, 시간 등의 주요수치를 도출하였다. H/T 조건 변화에 따른 그 값의 변화를 확인하여 수심 변화가 KVLCC2 모형선의 조종성능에 미치는 영향을 확인하였다.

3.1 선회시험

Fig. 5는 KVLCC2 모형선의 좌우현 35° 선회시험 결과 중 궤적을 H/T 조건 1.2, 1.5, 2.0 순서에 따라 나타낸 그림이다.

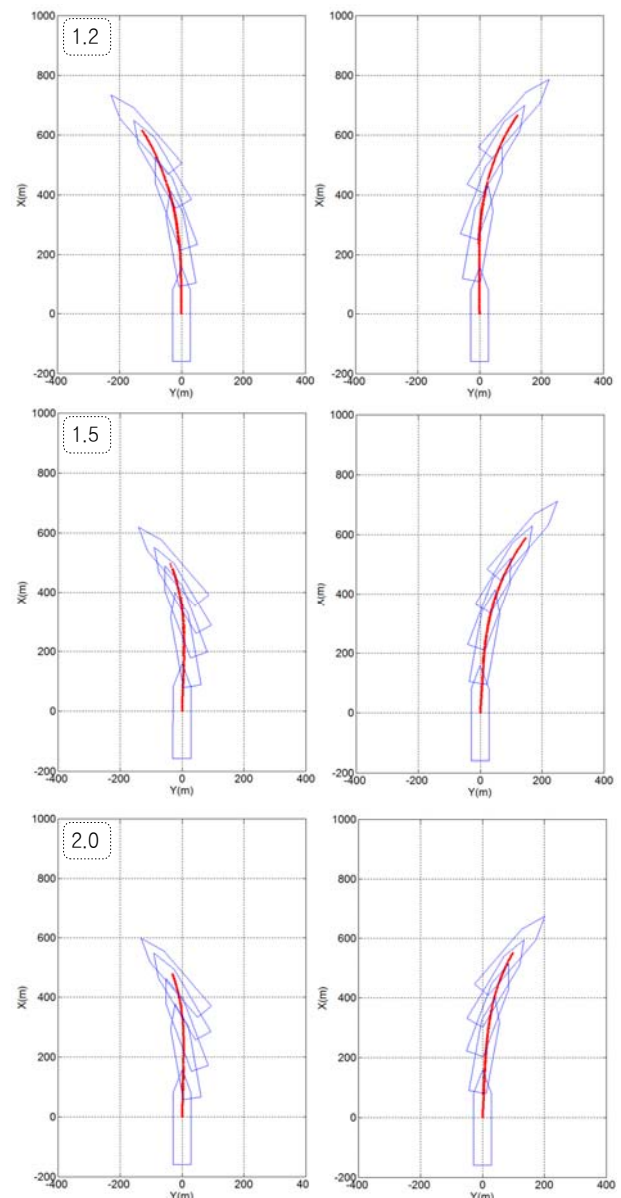


Fig. 5 Trajectory of turning circle tests (full-scale, H/T = 1.2, 1.5 and 2.0]

선박의 외곽선은 선수동요각이 10° 변화할 때 마다 그려졌으며, 앞서 언급한 것과 같이 시험구역의 제약으로 인하여 선수동요각이 40°에 도달할 때까지의 선회시험 기록만 분석에 활용하였다. Fig. 5의 결과에 대하여 좌우현 평균을 취하고, 선수동요각 10° 변화 간격에 대한 X방향 이동거리, Y방향 이동거리, 시간을 수심 조건에 따라 각각 표현하면 Fig. 6과 같다. 그래프에서 보듯이 이동거리 및 도달 시간은 H/T 조건이 작아짐에 따라 커지는 것을 확인할 수 있다. 즉 천수영역으로 갈수록 선박의 직선 안정성이 증가되어 선회궤적이 커지는 경향을 볼 수 있다.

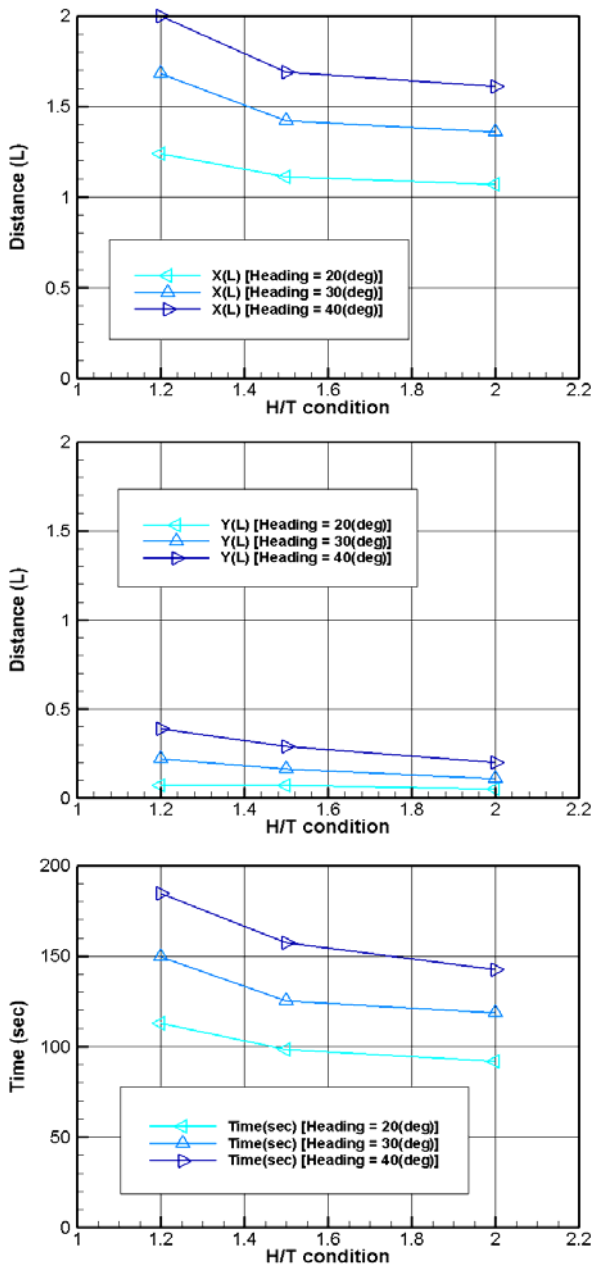


Fig. 6 Running distance and time of turning circle tests (full-scale, H/T = 1.2, 1.5 and 2.0)

특히 우현 35° 선회시험 결과에 대하여 H/T 조건에 따른 선수동요각속도를 보면 Fig. 7과 같다. 천수영역으로 갈수록 선박의

선회 시 선수동요각속도는 작아지는 것을 알 수 있고, 그 결과로 선수동요각의 변화에 시간이 더 오래 걸리는 것을 볼 수 있다. 또한 H/T 조건 1.2에서는 선수동요각속도가 오버슈트 없이 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

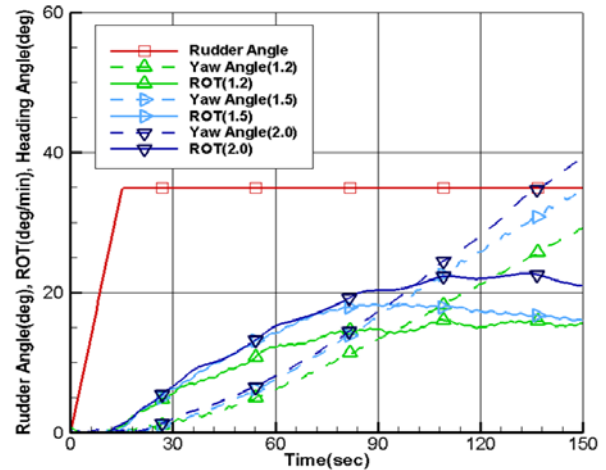


Fig. 7 Yaw rate and angle of turning circle tests (full-scale, H/T = 1.2, 1.5 and 2.0)

선회시험의 마지막 구간인 선수동요각 40° 지점에서의 H/T 조건에 따른 각각의 선회성능 결과는 Table 5와 같다. 표에서와 같이 H/T 조건이 작을수록 최대 선수동요각속도가 작은 것을 볼 수 있고, 그에 따라 선수동요각이 40°에 도달할 때까지의 시간과 이동거리가 커지는 것을 재확인할 수 있다.

Table 5 Turning circle test results ($\psi = 40^\circ$)

| Item | 1.2 | 1.5 | 2.0 |
|--|------|------|------|
| Mean X (L) | 2.00 | 1.69 | 1.61 |
| Mean Y (L) | 0.39 | 0.29 | 0.20 |
| Mean time (sec) | 184 | 157 | 142 |
| Maximum yaw rate ($^\circ/\text{min}$) | 16.1 | 18.4 | 22.8 |

천수영역에서의 선회시험 결과를 타기관의 시험 결과와 비교하기 위하여 Fig. 8과 같이 선박의 궤적을 나타내었다. 왼쪽 그림은 FHR(Flanders Hydraulics Research)과 MARIN(Maritime Research Institute Netherlands)에서 수행한 H/T 조건 1.2에서의 선회궤적 결과이며 (Tonelli, 2014), 오른쪽 그림은 선박해양플랜트연구소에서 수행한 H/T 조건 1.2, 1.5, 2.0에서의 선회궤적을 중첩한 결과이다. X방향 600 m 근처에서의 Y방향 이동거리를 비교해 볼 때, 본 연구 결과는 FHR의 결과와 좀 더 유사한 경향을 얻은 것으로 판단된다. 단, 두 기관의 반복시험 궤적 결과를 보면 FHR의 선회시험 결과에서 추정되는 선회직경이 MARIN의 결과에서 추정된 선회직경보다 조금 더 클 것임을 예상할 수 있는데, 동일한 시험에 대하여 그 결과가 다르게 나타난 것에 대해서는 적재조건, 사용된 센서 및 제어 장비, 시험 수행 조건 등 시험절차에 대한 보다 상세한 비교가 필요하다.

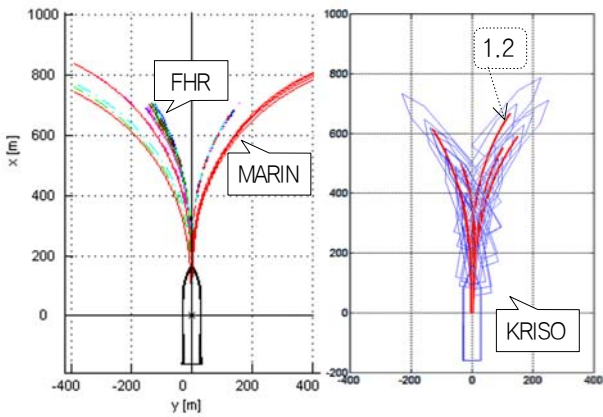


Fig. 8 Trajectory comparison with other results (full-scale, H/T = 1.2)

Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 조건에서 선박의 우선회 선수동요각 속도를 서로 비교한 그림으로, FHR의 결과와 좀 더 흡사한 경향을 보이는 것을 재확인할 수 있다.

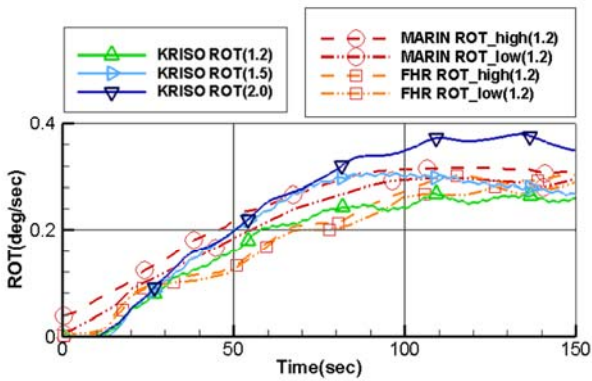


Fig. 9 Yaw rate comparison with other results (full-scale, H/T = 1.2)

3.2 지그재그시험

Fig. 10과 Fig. 11은 KVLCC2 모형선의 좌우현 20°/5°, 20°/10° 지그재그시험 결과를 H/T 조건 1.2, 1.5 순서에 따라 각각 나타낸 그림이다. Table 6과 7에서 보듯이 H/T 조건 변화에 따른 선박의 직선 안정성 변화로 인하여 두 경우 모두 작은 H/T 조건에서 오버슈트각이 작고, 오버슈트각에 도달할 때까지의 시간이 짧은 것을 확인할 수 있다. 초기에 선수동요각이 5° 혹은 10°에 도달할 때까지 걸린 시간은 선회시험 결과와 동일하게 H/T 조건 1.2에서 조금 더 긴 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 12에서와 같이 선수동요각이 특정각도에 도달하여 방향타를 처음과 반대방향으로 사용한 시각과 그 이후 선수동요각이 최대값에 도달한 오버슈트각에서의 시각을 H/T 조건에 따라 서로 비교했을 때, 후자가 상대적으로 더 큰 차이가 나는 것을 20°/5°, 20°/10° 시험 모두에서 확인할 수 있다. 이는 불안정해진 선박에 대하여 반대방향으로의 침로각 변화 시 더 많은 시간이 소요되어, 결과적으로 침로변화가 더 어렵다는 것을 의미한다.

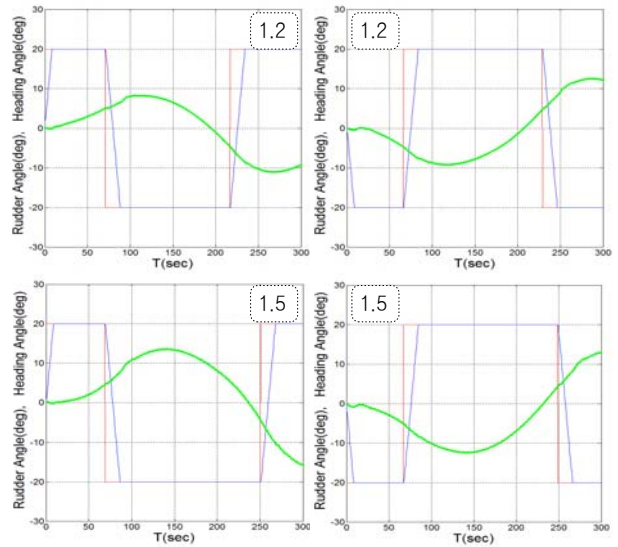


Fig. 10 Rudder angle and yaw angle of ± 20°/5° zigzag tests (full-scale, H/T = 1.2 and 1.5)

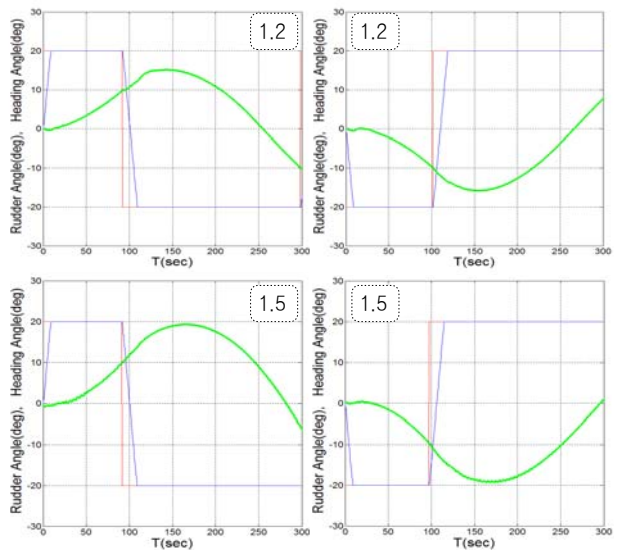


Fig. 11 Rudder angle and yaw angle of ± 20°/10° zigzag tests (full-scale, H/T = 1.2 and 1.5)

Table 6 Zigzag test results (20°/5°)

| Item | 1.2 | 1.5 |
|-------------------------------|---------|---------|
| Mean 1st overshoot angle (OA) | 3.8° | 8.0° |
| Mean time to 1st OA | 110.7 s | 140.7 s |
| Mean time to 5° of yaw angle | 68.6 s | 68.1 s |

Table 7 Zigzag test results (20°/10°)

| Item | 1.2 | 1.5 |
|-------------------------------|---------|---------|
| Mean 1st OA | 5.5° | 9.3° |
| Mean time to 1st OA | 148.4 s | 174.4 s |
| Mean time to 10° of yaw angle | 98.8 s | 95.6 s |

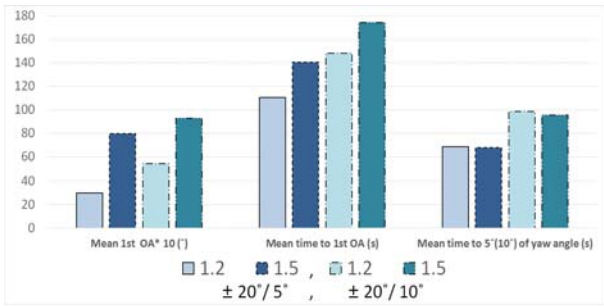


Fig. 12 Zigzag test results

Fig. 13은 지그재그시험 결과 중 궤적정보를 H/T 조건 1.2, 1.5 순서에 따라 각각 나타낸 것이다. H/T 조건 1.2에서의 궤적이 좀 더 Y축의 중심선상에 위치하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 확인한 지그재그시험 결과의 특성을 잘 보여주는 것임을 알 수 있다.

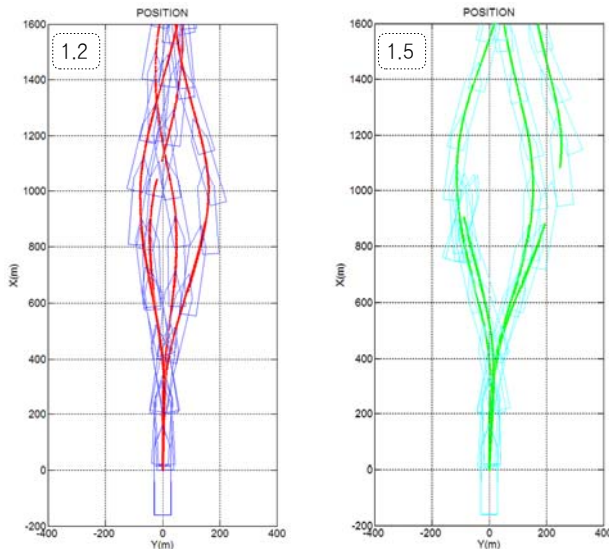


Fig. 13 Trajectory of zigzag tests (full-scale, H/T = 1.2 and 1.5)

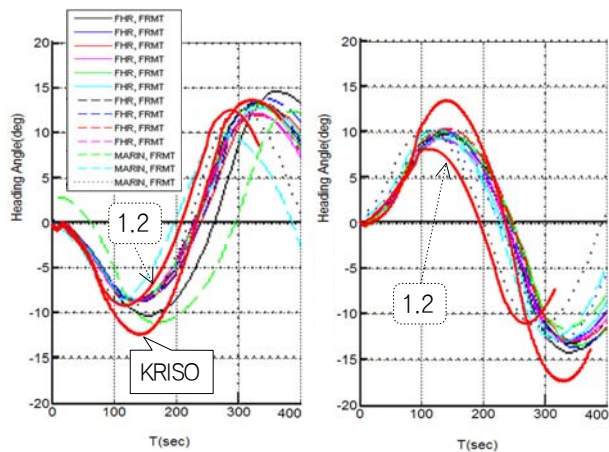


Fig. 14 Yaw angle comparison with other results (full-scale, H/T = 1.2)

좌우현 20°/5° 지그재그시험에 대하여 타기관의 시험 결과와 비교하기 위해 Fig. 14와 같이 시간에 따른 선수동요각의 변화를 그래프로 다시 중첩하여 나타내었다. 앞서 선회시험의 결과와 같이 FHR과 MARIN에서 반복 수행한 H/T 조건 1.2에서의 지그재그시험 결과를 비교에 활용하였다. 그래프에서 보듯이 동일한 H/T 조건 1.2에 대하여 시간에 따른 선박의 선수동요각 변화는 선박해양플랜트연구소의 시험 결과에서 조금 더 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있고, 타기관의 시험 결과는 선박해양플랜트연구소의 H/T 조건 1.2와 1.5 결과 사이에 위치하고 있음을 볼 수 있다. 이는 선회시험에서의 결과 비교와 동일하게 추가적인 상세 시험절차 비교가 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 KLCC2 모형선의 천수영역에서의 조종성능 변화를 확인하기 위하여 세 가지 수심 조건(H/T = 1.2, 1.5, 2.0)에서 자유항주모형시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

그 결과, 선박이 천수영역에서 운항될 경우 직선 안정성이 증가되어 선회직경이 커지고, 침로변경 시 오버슈트각이 작아지는 현상을 실험적으로 확인하였다. 선회시험 결과로부터 천수영역으로 갈수록 모형선의 최대 선수동요각속도 감소, 10° 간격의 선수동요각 도달에 필요한 시간 증가와 그에 따른 이동거리 증가를 확인하였다. 지그재그시험 결과로부터 천수영역으로 갈수록 모형선의 반대방향 침로각 변화에 필요한 시간 감소 및 오버슈트각 감소를 확인하였다.

특히 KLCC2 선형에 대하여 자유항주모형시험을 통하여 정량적인 조종특성 수치를 획득하였다. 본 연구 결과는 향후 구속 모형시험을 통한 시뮬레이션 결과 검증, 전산유체역학 해석 결과 검증에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구사항으로, 동일한 시나리오, 동일한 모형선에 대하여 깊은 수심에서의 자유항주모형시험을 수행하여 깊은 수심과 얇은 수심에 의한 조종성능의 차이를 비교할 예정이다. 또한 시험 결과에 영향을 미치는 인자를 찾기 위하여 모형선의 무게중심 변화, 관성모멘트변화, 시험수행 조건 비교 등 시험 조건과 절차의 차이에 따른 다양한 시험 결과를 획득하고 이를 비교 분석할 예정이며, 향후 수행될 시뮬레이션 결과와도 상호 비교하여 검증할 예정이다.

마지막으로 제한된 시나리오가 아닌 일반적인 조종시험을 모두 수행할 수 있는 전용시설 설치와 더불어 그에 준하는 시험이 수행될 수 있기를 기대한다.

후기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요연구사업 “제한수역에서의 선박운항 시뮬레이션 기술 고도화(3/3)[PES171E]” 와 “해양사고 분석 및 재현 시뮬레이션 핵심 기술 개발[PES1860]” 의 연구 결과 중 일부를 밝힌다.

References

Beaulieu, C. Gharbi, S. Ouarda, T.B.M.J. & Seidou, O., 2009. Statistical Approach to Model the Deep Draft Ships' Squat in the St.Lawrence Waterway. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 135(3), pp.80–90.

Béguin, L. Guillermin, P.E. Rousset, J.M. Weber, M. Lambert, S. Toularastel, J.L. & Davoust, L., 2013. An experimental investigation of behavior and hydrodynamic forces acting on a ship in shallow water. *Proceedings of the 3rd International Conference on Ship Manoeuvring (MASHCON) in Shallow and Confined Water*, Ghent, Belgium, 3–5 June 2013, pp.199–207.

Kim, S.W. Yeo, D.J. Rhee, K.P. & Kim, D.J., 2008. Prediction of Manoeuvrability of a Ship with Low Forward Speed in Shallow Water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.280–287.

Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1989. *Principles of naval architecture(III)*. 2nd Ed. New Jersey: SNAME.

Tonelli, R., 2014. Experimental fluid dynamics – free running model tests. *Paper presented at the Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods (SIMMAN) 2014*, Copenhagen, Denmark, 8–10 December 2014.

Yun, K. Yeo, D.J. Ryu, G. & Lee, Y.J., 2015. Experimental study on manoeuvrability of KVLCC2 in shallow water by free running model test. *Proceedings of the International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation (MARSIM) 2015*, Newcastle, UK, 8–11 September 2015.

