



쌍축선의 정적 횡경사각에 따른 조종성능 변화에 관한 실험적 연구

권창섭[†]·윤근항·여동진
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

An Experimental Study on the Change in Manoeuvring Performance According to the Static Heel Angle of a Twin-Screw Ship

Chang Seop Kwon[†]·Kunhang Yun·Dong Jin Yeo
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.

The manoeuvrability of a ship with an unwanted heel angle due to a maritime accident is changed from the original characteristics. The purpose of this study is to quantitatively investigate the change in the manoeuvring performance of a twin-screw ship under various heel angles and speed conditions. A series of free running model test campaigns were performed in the Ocean Engineering Basin of Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO) for a twin-screw car ferry vessel. Turning circle test and zig-zag 10/10 and 20/20 tests were carried out on the heel angles of 0, -10, and -19.5 degrees. In addition, two-speed conditions were considered to understand the effect of ship speed. In order to examine the effect of the bilge keel, a heel angle of -22 degree where the bilge keel is exposed outside the water surface, was considered. Finally, the change of manoeuvring characteristics according to the heel angle for a twin-screw and a single-screw vessel is discussed.

Keywords : Heeled condition(횡경사상태), Twin-screw ship(쌍축선), Manoeuvrability(조종성능), FRMT(자유항주모형시험)

1. 서 론

침수, 충돌, 좌초 등의 해상 사고로 인해 손상된 선박은 흘수, 트림, 경사 등의 자세가 변화되면서 유체역학적 특성이 바뀌게 된다. 국제해상인명안전협약(International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS)은 해상 사고로 인해 손상된 여객선의 생존성은 물론, 항구까지 안전하게 귀항할 수 있도록 Safe Return to Port (SRtP) 개념을 2010년 7월 이후부터 의무 사항으로 도입하였다 (IMO, 2002, 2008). 손상된 선박의 최소한의 생존성을 보장하기 위해 손상 선박의 운동성능에 관한 연구는 다수 수행되어 왔다 (Chan et al., 2002; Korkut et al., 2004; Palazzo & Kat, 2004; Lee, 2006; Lee et al., 2007; Tiago et al., 2009). 나아가 손상 선박이 안전하게 항구까지 귀항하기 위해서는 손상된 상태에서의 조종성능 검토가 중요하지만, 이에 대한 연구는 많지 않은 실정이다. Qiu et al. (2011)은

손상된 선박에 대한 자유항주모형시험을 통해 손상 시, 조종성능 변화를 평가하는 방법을 제시하였다. Miyazaki et al. (2013)은 자유항주모형시험을 통해 KCS 컨테이너선에 대해 횡경사 상태에서의 선회시험과 역스파이럴 테스트를 수행한 바 있다. 이를 통해 횡경사 방향과 반대 방향으로 선회하는 경향이 나타남을 확인하였다.

선박해양플랜트연구소에서는 KCS 선형에 대하여 횡경사 조건을 고려한 자유항주모형시험을 수행하여 좌현 횡경사 조건에서의 선회 및 지그재그 특성 변화를 제시한 바 있다 (Yun & Yeo, 2019). 본 연구는 이에 대한 후속 연구로써, 대상선을 쌍축선으로 확장하고, 속도 영향을 파악하기 위해 설계속도 외, 절반 정도의 낮은 속도를 추가로 고려하였다. 대상선은 쌍축선형의 카페리선이며, 횡경사각에 따라 선회시험과 지그재그 10/10, 20/20 시험을 수행하였고, 추가적으로, 빌지킬의 영향을 알아보기 위해 빌지킬이 수면 밖으로 드러나는 횡경사 조건을 고려하였다. 최종적으로, 단축선인 KCS 선형에 대한 기존

연구결과와 비교를 통해, 단축선과 쌍축선의 횡경사 상태에서의 조종성능 변화를 비교 분석하였다.

2. 자유항주모형시험

2.1 대상선

대상선은 Fig. 1과 같이 쌍축선형의 카페리이며, 모형선 수선간 길이는 약 3.58 m이다. 프로펠러 회전 방향은 선미에서 선수를 바라보았을 때, 좌현 프로펠러는 시계방향, 우현 프로펠러는 반시계방향이다.

2.2 시험 시스템

자유항주모형시험은 선박해양플랜트연구소의 해양공학수조에서 수행하였다. 해양공학수조의 길이, 폭, 수심은 56 x 30 x 4.5 m이다. 자유항주모형시험에 사용된 주요 장비 제원은 Table 1에 정리하였다. 수조 내부에서는 GPS를 사용할 수 없기 때문에 TOPCON社の 광학기반 위치 추적 장비인 Total Station을 이용하여 모형선의 위치와 방위각을 계측하였다 (Park et al., 2018). Fig. 1과 같이 모형선 상부에는 Total Station 레이저 반사용 프리즘 2개를 설치하였고, 수조 밖에는 2대의 Total Station을 설치하여 프리즘 위치를 각각 추적하도록 하였다. 모형선 내부에는 선수각 계측을 위한 3축 광자이로(Fiber Optic Gyro, FOG)와 횡경사각 계측을 위한 경사계를 설치하였다. 그리고 추진기 회전수와 타각을 제어하기 위한 컨트롤러와 전원공급을 위한 배터리, 제어와 데이터 계측을 위한 컴퓨터와 무선통신 장비를 설치하였다.

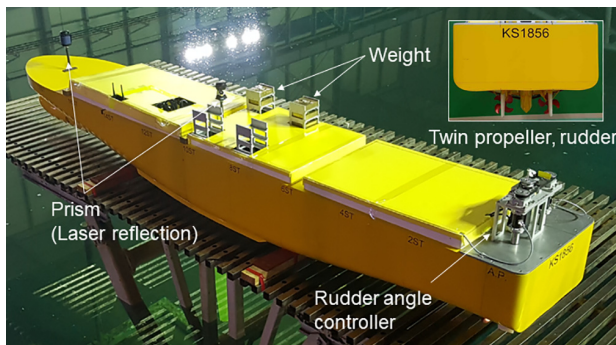


Fig. 1 Twin-screw model ship

Table 1 Equipments for free running model test

Item	System	Specification
Position tracking	TOPCON, Total Station PS-101AS	5 mm for auto-tracking
Fiber optic gyro	KVH DSP1760 FOG (3-axes)	Bias 0.05 deg./h
Inclinometer	POSITAL ACS-040	Less than 0.1 deg.
Modem	Acksys, WLg-Link	up to 108 Mbps

2.3 시험 조건

선박의 조종운동을 기술하기 위한 좌표계는 Fig. 2와 같다. 횡경사각의 영향을 파악하기 위해, 횡경사각 0도, -10도, -19.5도 조건을 고려하였다. 음의 횡경사각은 Fig. 3과 같이 선체가 좌현으로 기울어짐을 의미한다. 전체 시험 조건은 Table 2와 같이 타각 35도 선회 시험과 지그재그 10/10, 20/20 시험으로 구성된다. 선속은 설계 속도 근처인 1.12 m/s와 그 절반 수준인 0.56 m/s 조건을 고려하였다. 1.12 m/s 조건에서는 빌지킬의 영향을 살펴보기 위해 빌지킬이 수면 밖으로 드러나는 횡경사각인 -22도 조건을 추가로 고려하였다. 횡경사각 0도에서 속도 시험을 통해 설계 속도의 2% 오차 범위 이내의 진입 속도를 얻는 프로펠러 회전수를 구했고, 실험 종료 시 까지 일정하게 유지되었다 (ITTC, 2021). 횡경사 상태에서도 프로펠러 회전수는 동일하다고 가정하였다.

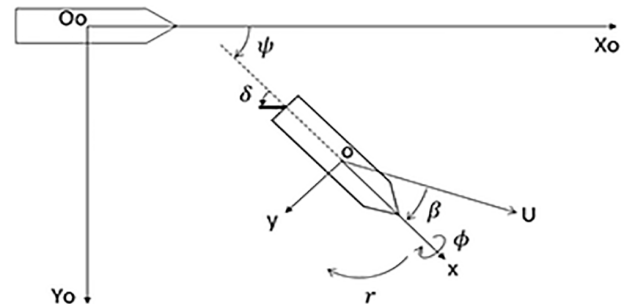


Fig. 2 Coordinate system



Fig. 3 Free running model ship with heel to port

Table 2 Free running model test conditions

Item	Speed (m/s)	Heel angle (deg.)
Turning ±35 deg.	1.12	0, -10, -19.5, -22
	0.56 (half)	0, -10, -19.5
Zigzag ±10/10 Zigzag ±20/20	1.12	0, -10, -19.5, -22
	0.56 (half)	0, -10, -19.5

3. 모형 시험 결과 및 고찰

횡경사각 및 선속에 따른 선회 시험과 지그재그 10/10, 20/20 시험 결과를 Fig. 4와 5, Figs. 6-9에 나타내었다. 선회 궤적은 Lpp로 무차원화하였고, 회두각속도, 선속과 횡동요각 정보는 모형선 기준으로 표시하였다.

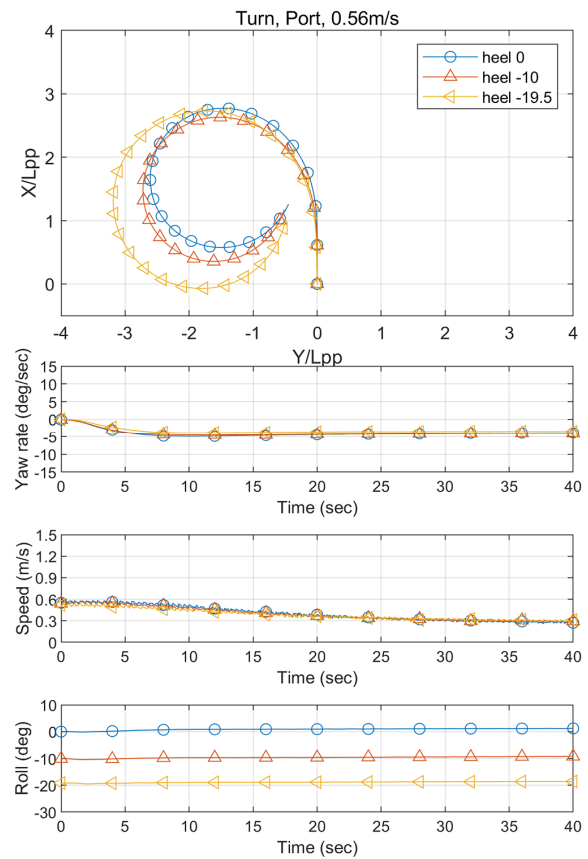
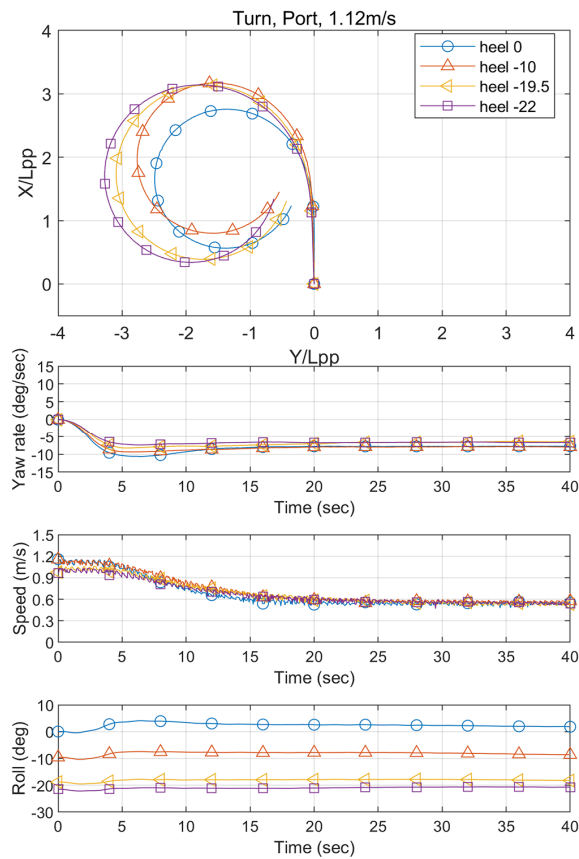


Fig. 4 Turning port (left: 1.12 m/s, right: 0.56 m/s)

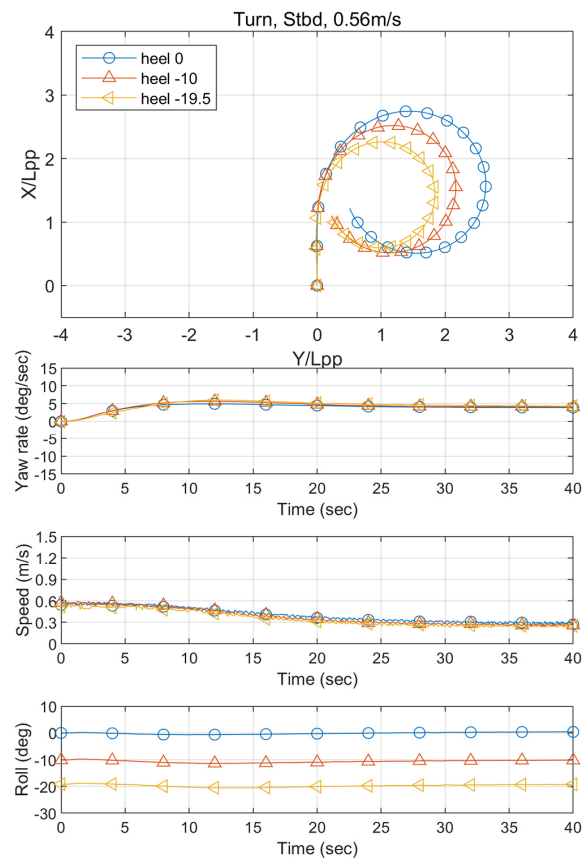
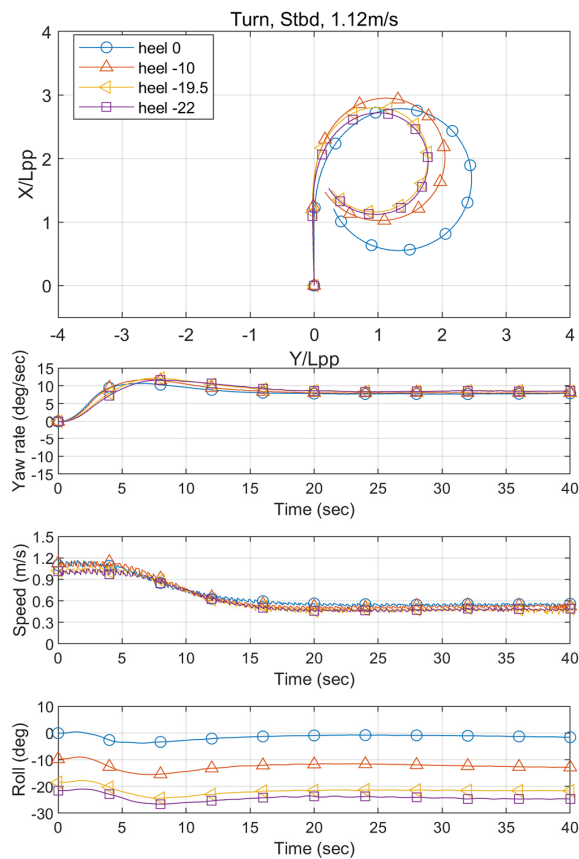


Fig. 5 Turning stbd (left: 1.12 m/s, right: 0.56 m/s)

3.1 선회 시험 결과 분석

Fig. 10은 횡경사각에 따른 선회직경의 변화를 나타낸다. 횡경사각 0도 조건을 기준으로 선회직경을 비율로 나타냈다. 좌현 선회 시, 좌현 횡경사 10도 조건에서는 선회 직경이 6~11 % 증가하였고, 19.5도에서는 26~27 %, 22도에서는 35 % 증가하는 것으로 나타났다. 우현 선회 조건에서는 좌현 횡경사 10도 일 때, 선회 직경이 18~20 % 감소하였고, 19.5도와 22도에서는 약 30 % 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 좌현 횡경사각 증가에 따라 선회이 우현으로 선회하려는 경향이 강해짐을 알 수 있다. 선속 1.12 m/s와 0.56 m/s 조건에서의 횡경사각에 따른 선회직경의 변화율은 거의 동일하게 나타나, 절반 정도의 속도 범위까지는 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

KCS 단축선 결과와 비교하면, 우현 선회 조건에서는 좌현 횡경사각 증가에 따른 선회직경 감소율이 쌍축선과 단축선에서 매우 유사한 수준으로 나타났다. 좌현 선회 조건에서도 -20도 결과를 제외하면 선회직경 증가율은 쌍축선과 단축선에서 유사한 수준으로 나타났다.

Fig. 11은 횡경사각에 따른 전진거리 변화를 나타낸다. 선회 직경과 마찬가지로 횡경사각 0도 조건을 기준으로 전진거리를 비율로 나타냈다. 전반적으로 선회직경보다는 변화량이 작아, 횡경사 영향이 상대적으로 작게 나타남을 알 수 있다. 우선, 단축선의 전진거리 변화를 살펴보면, 좌현 선회 시, 약 1~7 %

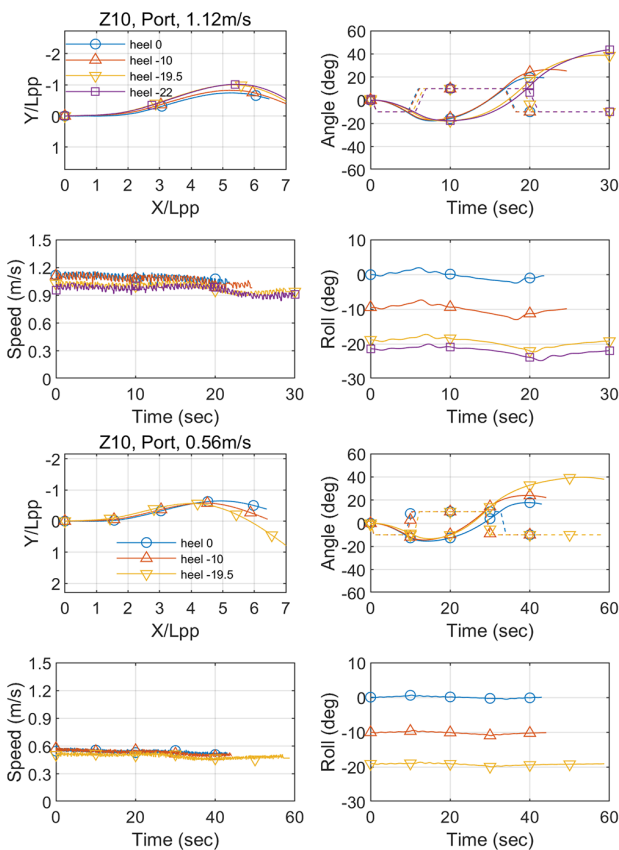


Fig. 6 Zigzag10/10, port (upper: 1.12 m/s, lower: 0.56 m/s)

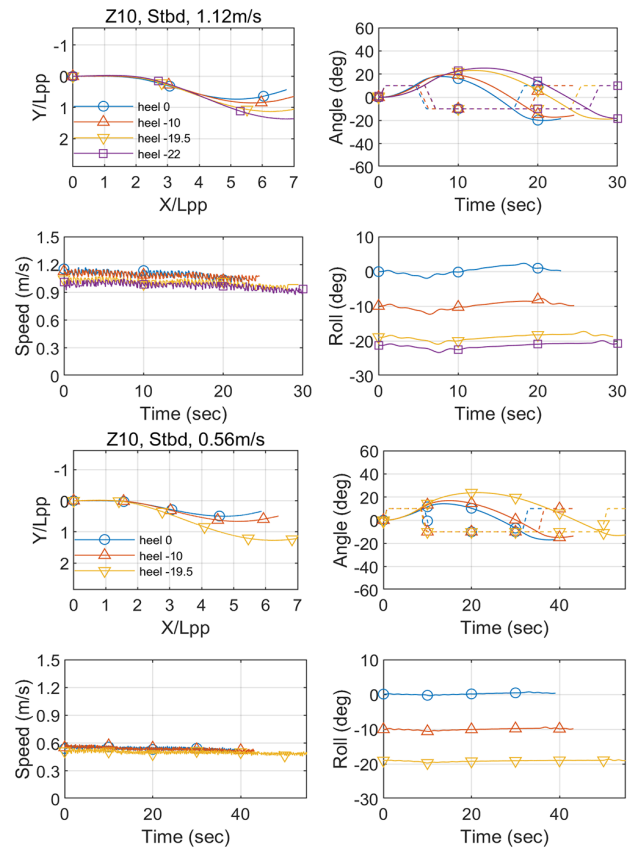


Fig. 7 Zigzag10/10, stbd (upper: 1.12m/s, lower: 0.56m/s)

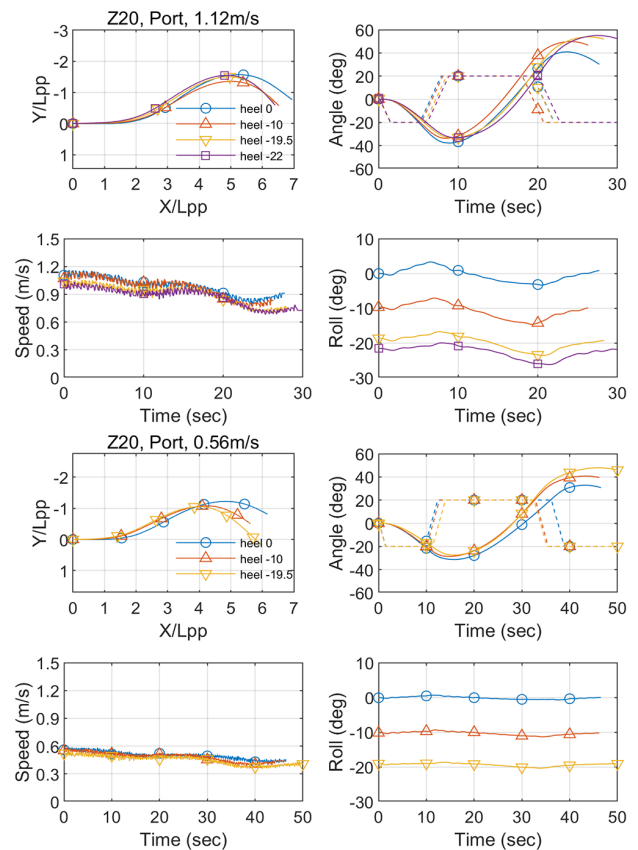


Fig. 8 Zigzag20/20, port (upper: 1.12 m/s, lower: 0.56 m/s)

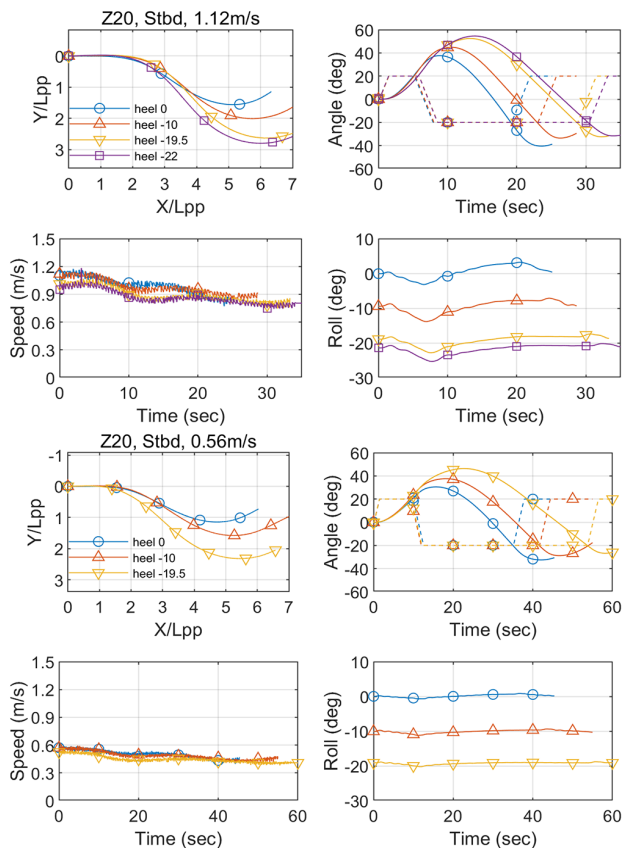


Fig. 9 Zigzag20/20, stbd (upper: 1.12 m/s, lower: 0.56 m/s)

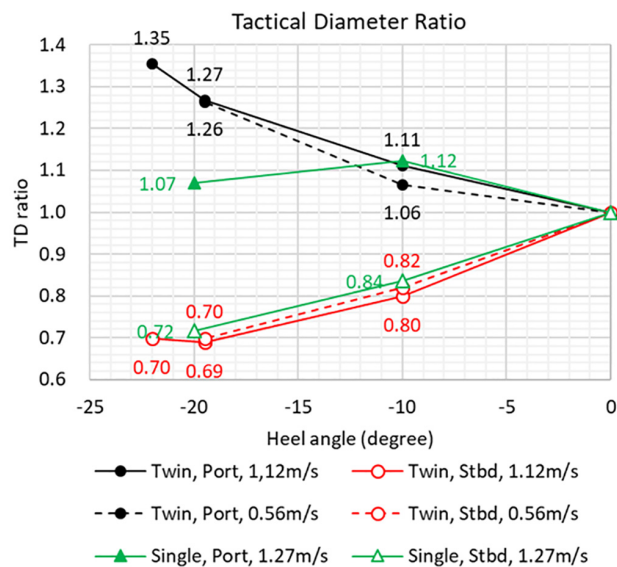


Fig. 10 Ratio of tactical diameter

범위 내에서 증가하고, 우현 선회 시, 약 7~12 % 범위 내에서 감소하였다. 쌍축선의 경우, 속도 1.12 m/s 조건에서 좌현 선회 시, 전진거리가 14~16 % 증가하고, 우현 선회 시, 4 % 이내 범위에서 다소 감소하는 추세를 보였다. 결과적으로, 단축선 보다는 쌍축선의 전진거리가 전반적으로 약간씩 증가하였다. 그 원인으로는 쌍축선의 경우, Figs. 12~13과 같이 횡경사 반대 위치의 프로펠러가 수면에 점점 더 가까워지면서 공기 유입

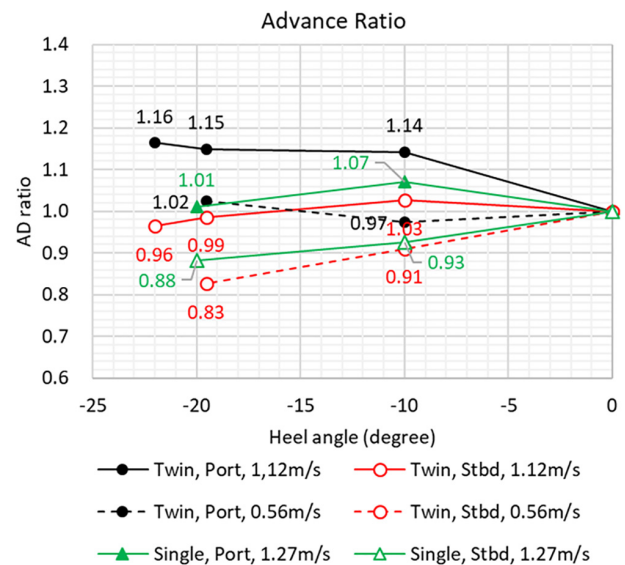


Fig. 11 Ratio of advance

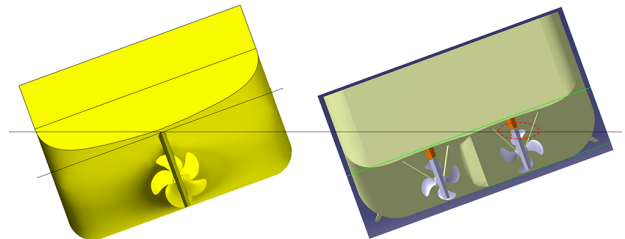


Fig. 12 Comparison of propeller immersion for single-screw & twin-screw in -20 deg. heeled condition



Fig. 13 Picture of bilge keel in -22 degrees heel angle

(Ventilation)의 영향 등으로 추력이 감소하고 (Ha et al., 2021, Park, 2021), 이에 따라 타력 또한 감소하는 추가적인 현상이 발생하였기 때문이라고 판단된다. Fig. 14는 구축모형시험에서 계측한 쌍축선의 횡경사에 따른 타 직압력 변화를 나타낸다. 좌현과 우현 각각, 최대 타 직압력을 기준으로 비율로 나타냈다. 횡경사 시, 물에 더 깊이 잠기는 좌현 타 직압력은 횡경사각도와 상관없이 유사하게 나타났으나, 우현 타 직압력은 횡경사각증가에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

속도 0.56 m/s 조건에서는 1.12 m/s 조건보다 전진거리가 전반적으로 감소하였다. Fig. 15는 구축모형시험에서 타각 20도 일 때, 횡경사 0도에서의 타 직압력을 기준으로 횡경사 -20도에서의 타 직압력을 비율로 나타낸 것이다. 1.12 m/s 조건에서는 타력이 55 % 수준으로 감소되었으나, 0.56 m/s 조건에서는

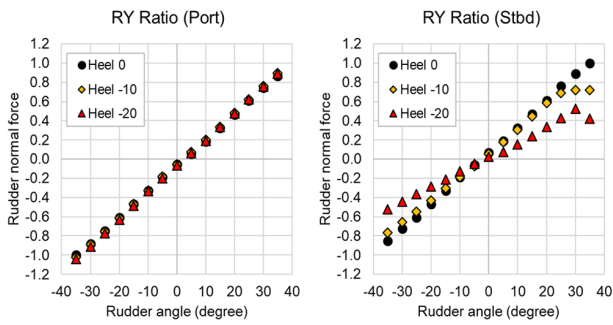


Fig. 14 Rudder normal force ratio for twin-screw case

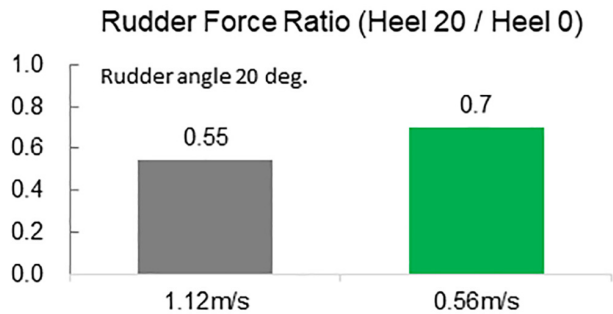


Fig. 15 Rudder normal force ratio for twin-screw case

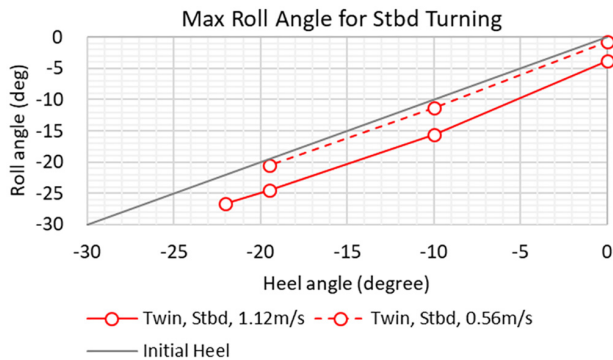


Fig. 16 Max heel angle for stbd turning

70 % 수준으로 감소되어, 감소량이 줄어들었다. 다시 말하면, 고속보다 저속 조건에서 상대적으로 타력 감소가 줄어들면서 전진거리가 감소되는 것으로 판단된다.

Fig. 16은 좌현 횡경사 조건에서 우현 선회 시 발생하는 최대 횡동요각을 나타낸다. 횡동요각은 횡복원력 특성에 따라 달라질 수 있으나, 대상 선박의 경우에는 속도 1.12 m/s, 초기 횡경사각 -22도 조건에서 최대 -26.6도까지 횡동요가 증가되어, 초기값보다 4~6도 정도 증가되었다. 한편, 0.56 m/s 속도에서는 최대 횡동요각이 초기값보다 약 1~2도 정도로 미미하게 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 지그재그 시험 결과 분석

Fig. 17과 18은 지그재그 10/10 시험의 1차, 2차 과도선수각을 나타낸다. 1차 과도선수각은 좌현 기동 시에 좌현 횡경사각에 큰 영향을 받지 않고 유사한 수준으로 나타났다. 0.56 m/s의

낮은 속도에서는 1차 과도선수각이 2도 범위에서 약간 감소하는 경향을 보였다. 반면, 우현 기동 시에는 좌현 횡경사각 증가에 따라 1차 과도선수각이 증가하였다. 그리고 좌현 횡경사각이 10도를 초과하면, IMO 기준값을 초과하는 것으로 나타났다. 2차 과도선수각은 좌현과 우현 기동 결과가 1차 과도선수각과 반대 경향을 보였다. 횡경사각이 약 16도 이상이 되면 2차 과도선수각에 대한 IMO 기준값을 초과하는 것으로 나타났다.

Fig. 19는 지그재그 20/20 시험의 1차 과도선수각을 나타낸다. 전체적인 경향은 지그재그 10/10 시험의 1차 과도선수각과 유사하게 나타났다. 단축선의 경우에도 쌍축선과 거의 동일한 경향을 보여주고 있어, 비교에 사용된 KCS 단축선과 카페리 쌍축선의 경우에는 횡경사에 따른 지그재그 과도선수각의 변화 특성이 거의 유사하다고 볼 수 있다. 한편, 속도 0.56 m/s 조건에서는 1.12 m/s 조건보다 1차 과도선수각이 전체적으로 5~7도 감소한 것을 제외하고는, 횡경사에 따른 과도선수각의 변화율은 거의 유사하게 나타났다. 따라서, 횡경사에 따른 과도선수각의 변화에 속도의 영향은 크지 않다고 보여진다.

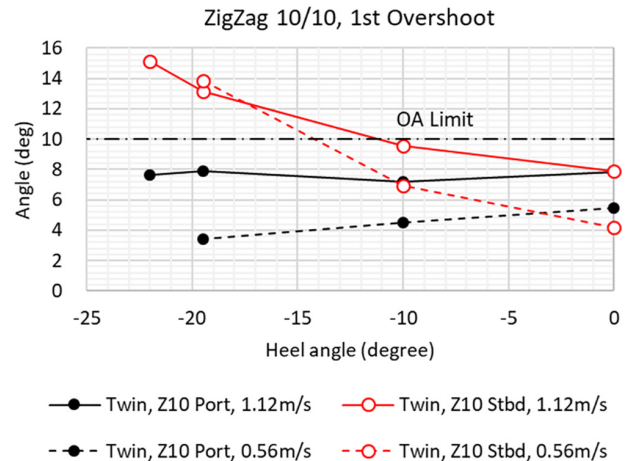


Fig. 17 Zigzag 10/10 1st overshoot angle

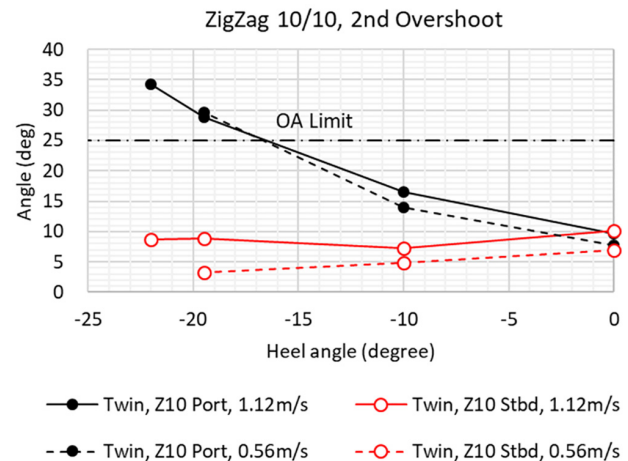
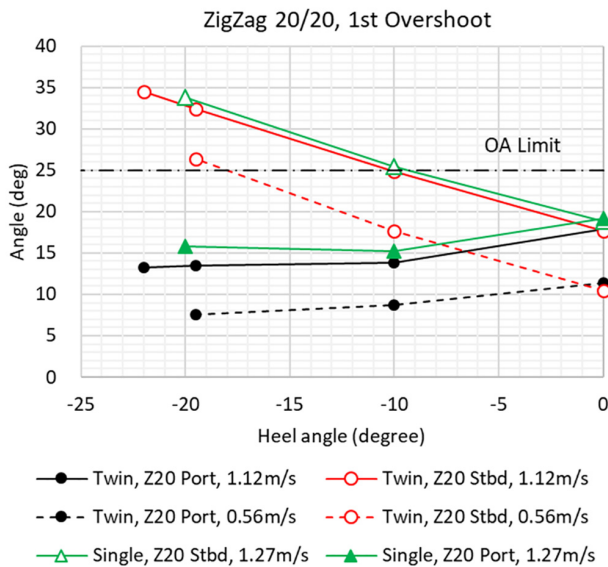


Fig. 18 Zigzag 10/10 2nd overshoot angle

Fig. 19 Zigzag 20/20 1st overshoot angle

3.3 발지킬 영향

발지킬이 수면 밖으로 드러날 정도로 횡경사가 증가되면, 수면 하부 좌우 형상 차이가 더욱 커져 조종성능의 좌우현 비대칭성이 더욱 증가될 가능성이 있다. 발지킬이 조종성능의 좌우현 비대칭성에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 13과 같이 발지킬이 수면 밖으로 드러나는 횡경사 22도 조건이 고려되었다. Figs. 10-11의 선회직경, 전진거리 변화와 Figs. 17-19의 지그재그 과도선수각 변화 중, 횡경사 -19.5도와 -22도 결과를 살펴보면, 선회직경의 경우에 -22도에서 약간의 특성 변화가 나타나는 것으로 보여지고, 나머지 지표에서는 특별한 변화가 관찰되지 않았다. 따라서, 한 쪽 발지킬이 수면 밖으로 드러나는 횡경사각 조건에서는 선회직경의 좌우 비대칭성만 약간 영향을 받는 것으로 보여진다. 발지킬의 영향에 대해서는 향후 CFD를 이용하여 발지킬에 작용하는 유체력 분석 등이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 쌍축선형을 갖는 카페리선에 대해 정적 횡경사에 따른 조종성능 변화를 자유항주모형시험을 통해 분석하였다. 본 연구를 통해서 단축선 뿐만 아니라 쌍축선에 대해서도 횡경사각에 따른 조종성능 변화에 관한 벤치마크 실험 데이터를 확보하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 연구에서 검토된 쌍축선과 단축선, 고속과 절반 속도 범위에서의 횡경사각에 따른 선회성능, 직진성능 변화 경향은 유사하게 나타남. 다만, 쌍축선의 경우에 횡경사 시, 한 쪽 프로펠러가 수면에 가까워져 추력과 타력이 감소되면서 단축선에 비해 전진거리가 약간 증가되는 경향이 나타남.
- 횡경사 상태에서 경사진 반대 방향으로 고속 선회하는 경

우에는 원심력에 의해 횡동요각이 더욱 증가하여 전복이나 침수 위험이 더욱 증가함. 절반 속도 조건에서는 횡동요각 변화가 미미함.

- 발지킬이 드러나는 횡경사 -22도 조건에서는 선회직경에 약간의 특성 변화가 관찰되지만, 나머지 지표에서는 특별한 영향이 나타나지 않음.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양사고 재현 및 분석 시뮬레이션 핵심기술 개발 - 2단계(3/3) (PES3100)”과 “첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어 원천기술 개발 (3/5) (PES3860)”에 의해 수행되었습니다.

References

- Chan, H., Atlar, M., & Incecik, A., 2002. Large-amplitude motion responses of a Ro Ro ship to regular oblique waves in intact and damaged conditions. *Journal Marine Science and Technology*, 7, pp.91-99.
- Ha, J. et al., 2021. Experimental study on ventilation and shaft excitation force of a propeller in partially submerged condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(1), pp.40-48.
- IMO, 2002. Casualty threshold, safe return to port and safe areas (SOLAS II-2, Reg.21)
- IMO, 2002. Design criteria for systems to remain operational after a fire casualty (SOLAS II-2, Reg.22)
- IMO, 2008. System capabilities after a flooding casualty on passenger ships (SOLAS II-1, Reg.8-1)
- ITTC, 2021. Recommended procedures and guidelines, Free running model tests, 7.5-02 06-01, Rev.04.
- Korkut, E., Atla, M., & Incecik, A., 2004. An experimental study of motion behaviour with an intact and damaged Ro-Ro ship model. *Ocean Engineering*, 31, pp.483-512.
- Lee, D., 2006. Knowledge-based system for safety control of damaged ship. *Knowledge-Based Systems*, 19, pp.187-191.
- Lee, D., Hong, S. Y., & Lee, G.-J., 2007. Theoretical and experimental study on dynamic behaviour of a damaged ship in waves. *Ocean Engineering*, 34, pp.21-31.
- Miyazaki H., Sawada H., Tukada Y., & Kuroda T., 2013. Experimental and numerical study about the static heel effect on the turning ability. *ISOPE 2013*, Anchorage, Alaska, USA.
- Palazzo, L., & Kat, J., 2004. Model experiments and simulations of a damaged ship with air-flow taken into account. *Marine technology*, 41(1), pp.38-44.

- Park, G., 2021. *A study of partially submerged propeller's shaft load characteristics in various inflow angle conditions*. MS. Seoul National University.
- Park, J. et al., 2018. A study on the manoeuvrability of KMLCC2 by indoor free running model test in calm water. *Proceedings of the International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation*, Halifax, Canada, 12–16 August 2018.
- Qiu, Y., Liu, Z., Chen, X., & Zhan, C. (2011). Comprehensive evaluation of damaged ship maneuverability based on weighted grey relational theory. *3rd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, pp.1–4.
- Tiago A., Santos, C., & Soares, G., 2009. Numerical assessment of factors affecting the survivability of damaged ro-ro ships in waves. *Ocean Engineering*, 36, pp.797–809.

- Yun, K. & Yeo, D.J., 2019. An experimental study on the manoeuvrability of a ship in heeled condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.273–280.



권 창 섭



윤 근 향



여 동 진