

선수 스러스터를 이용한 실선스케일 조종시험에 관한 연구

박종용¹·이준호^{2,†}
부경대학교 조선해양시스템공학과¹
부경대학교 실습선 나라호²

A Study on Full-scale Maneuvering Trials using Bow Thruster

Jong-Yong Park¹·Jun-Ho Lee^{2,†}
Department of Naval Architecture and Marine System Engineering, Pukyong National University¹
Training Ship NARA, Pukyong National University²

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.

This study aims to investigate the bow thruster performance of the research vessel "NARA" by full-scale maneuvering trials. The thruster test method refers to ITTC's recommended procedures and guidelines. Turning tests with the bow thruster are performed at speed conditions of 0, 2, and 4 knots. The test results indicate that the Rate of Turn (ROT) increased when the ship is in a higher speed condition. Due to the position of the propeller and the housing of the bow thruster, there is difference in the efficiency of the bow thruster according to the turning direction. Zigzag tests with the bow thruster were conducted at speed conditions of 2 and 4 knots. At speeds above 4 knots, it seems difficult to change the course only with the bow thruster.

Keywords : Full scale manoeuvring trials(실선 스케일 조종시험), Research vessel NARA(해양탐사선 나라호), Bow thruster(선수 스러스터), Turning test(선회시험), Zigzag test(지그재그시험)

1. 서 론

항만 외에서 선박은 설계속도로 침로 변경, 선회 등의 표준 조종운동을 하는데 반하여, 항만 내에서는 이/접안, 출발, 정지, 제자리 선회 등의 다양한 조종운동을 하게 된다. 항만 내에서는 수많은 선박이 밀집해 있으므로 선박은 저속으로 운항한다(Yoon & Kim, 2005). 저속에서는 타효가 떨어져 일반적으로 조종성능이 좋지 않으므로 이를 개선하기 위해 선수 혹은 선미에 스러스터(thruster)를 장착하는 선박이 증가하는 추세이다. 한편, 자율운항선박과 관련하여 자동 이/접안, 저속에서의 충돌 회피와 같은 기술이 최근 주목받고 있다. 이러한 기술은 스러스터에 의한 선박의 동역학을 기반으로 개발되므로 스러스터 관련 연구는 지속적으로 필요할 것이다.

스러스터 관련 기존의 연구로는 전진속도 별 선수 스러스터의 효율을 전산유체역학으로 계산한 연구(Schaap, 2015; Mohan, 2017), 크래빙(crabbing) 모형시험을 수행한 연구(Yasukawa &

Miyazawa, 2011; Shin & Lee, 2004; Yeo, 2012), 스러스터를 이용한 실선스케일 조종시험을 수행한 연구 등이 있다. Yang et al.(2006)은 제주대학교 어업실습선 "아라호"의 선수 스러스터 작동 유무에 따른 선회성능을 확인하였다. Ahn et al.(2006)은 선수 스러스터 추력에 따른 아라호의 선회율(Rate of turn, ROT) 변화를 분석하였다. Uchida et al.(2014)는 나가사키대학교 실습선 "Nagasaki Maru"로 선수 및 선미 스러스터를 이용한 제자리 선회시험을 수행하고 이동거리, 이동방향, 선회율 등을 분석하였다. 최근에는 이안(unberthing) 중인 선박의 선수 스러스터로 인하여 안벽에 아끼되는 압력장을 실선스케일로 계측하는 시험도 수행된 바 있다(Abramowicz-Gerigk et al., 2018).

본 연구는 부경대학교 해양탐사선 "나라호"로 선수 스러스터를 이용한 실선스케일 조종시험을 수행하고, 관련 연구에 참고가 될 수 있는 결과를 제시하는데 그 목적을 두고 있다. 스러스터 시험(thruster test) 방법은 실선스케일 조종시험에 대한 ITTC Recommended Procedures and Guidelines를 참고하였다. 선수 스러스터를 이용하여 0, 2, 4knots의 세 가지 전진속도에 대한

선회시험과 2, 4knots의 두 가지 전진속도에 대한 지그재그시험을 수행하였다. 결과를 분석하여 각 시험별로 도출해야 하는 주요 조종 지수(index)를 정량적으로 제시하였다.

2. 실선시험 준비

2.1 부경대학교 해양탐사선 나라호

나라호는 해양관련학과 학생들의 승선실습과 각종 해양탐사 작업을 수행할 수 있도록 설계되었다. 나라호는 같은 크기의 전통적인 선박에 비해 상대적으로 폭이 넓고, 방형계수가 작고, 메타센터(metacenter) 높이가 작은 것이 특징이다(Kim et al., 2017). 나라호의 주요제원과 모습은 각각 Table 1, Fig. 1과 같다.

나라호에는 2기의 전방위 추진기(Azimuth propeller)와 1기의 선수 스러스터가 장착되었고, 콩스버그(Kongsberg)사의 동적 위치제어시스템(Dynamic Positioning System, DP System)이 적용되어 효율적이고 정밀한 해양조사작업이 가능하다. Fig. 2, Fig. 3는 각각 전방위 추진기와 선수 스러스터의 모습을 보여준다. 선수 스러스터의 프로펠러 직경은 1,250mm이고 최대 7ton의 횡방향 추력을 낼 수 있다. 스러스터의 제원은 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Principal dimensions of NARA

Item	Value
LOA [m]	70.7
LBP [m]	59.7
Breadth [m]	13.5
Draft [m]	4.7
Displacement [tons]	1,494
GM [m]	0.6



Fig. 1 Research vessel NARA



Fig. 2 Azimuth propeller of NARA

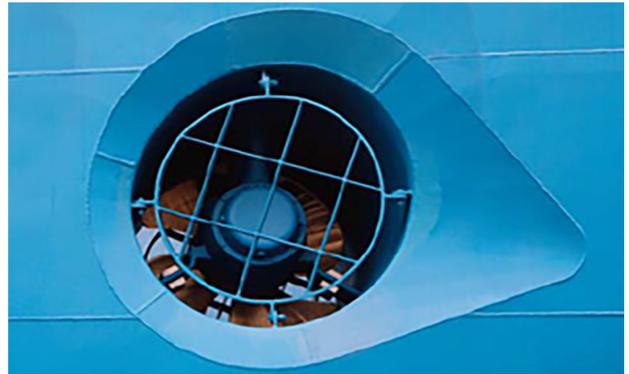


Fig. 3 Port side view of the bow thruster

Table 2 Principal dimensions of bow thruster

Item	Specification
No. of set	1 set
Model	KAMOME PROPELLER TCB-70DSMA
Type	Electric motor driven, controllable Pitch propeller complete with hydraulic power Unit
Propeller diameter	1,250mm
No. of propeller blades	4blades
Propeller speed	490rpm
Reduction ratio	3.15 : 1
Driven motor	452kW electronic motor gravity tank 50liters
Truster power	7tons

2.2 시험방법

선박의 조종성능을 확인하기 위한 총 19개의 시험이 IMO, ITTC, SNAME, ISO 등 다양한 기관에서 제시되었다 (ITTC, 2017). 본 연구에서는 스러스터의 성능을 확인할 수 있는 조종 시험인 스러스터 시험이 수행되었다. 스러스터 시험은 선회시험 및 지그재그시험으로 구성된다. 각 시험항목에 대한 ITTC 실선 시운전 방법은 다음과 같다.

• 선회시험

스러스터를 이용한 선회시험은 맞바람(head wind) 상황에서 0~6knots 사이의 전진속도로 수행한다. 방향타(rudder)는 중립인 상태에서 스러스터를 최대출력으로 가동하여 선회를 시작한다. 선수각(heading angle)의 변화가 90° 이상이 될 때까지 시험을 수행한다. 본 시험을 통하여 선회율의 시간 이력(time history), 정상상태에서의 선회율, 선수각 변화시간(0~90°, 15° 간격)이 제공되어야 한다.

• 지그재그시험

스러스터를 이용한 지그재그시험은 3~6knots 사이의 전진속

도로 수행한다. 선박의 변침을 위해 방향타 대신 스러스터를 사용하는 것 이외에는 통상적인 지그재그시험과 절차가 같다. 변침을 시작하는 기준 선수각은 $\pm 10^\circ$ 이고, 이때 스러스터는 변침 방향으로 최대추력을 내도록 가동한다.

2.3 시험조건

본 시험은 총 2주에 걸쳐 수행되었다. 1주차 시험은 2019년 3월 20일 거제시 외도 도장포(위도: 34.791°, 경도: 128.703° 부근)에서 진행하였다. 2, 4knots의 전진속도로 우현선회, 좌현선회, 지그재그시험을 각각 한차례 실시한 후 4knots 지그재그 시험을 추가로 수행하였다. 2주차 시험은 2019년 3월 26일 부산 신항 입구 다대포에서 진행하였다. 위도 34.923°, 경도 128.874° 부근에서 제자리 선회시험을 시행한 후 위도 34.992°, 경도 128.887° 부근으로 이동하여 1주차 시험의 반복성을 확인하기 위한 추가시험을 수행하였다. 2주차 시험 중 2knots의 전진속도로 수행한 두 번째 우현선회 데이터는 손실된 관계로 본 시험결과에서 제외하였다. 풍속과 풍향은 첫 시험 계측 값을 표기했다. 풍향은 북풍을 0°, 동풍을 90°, 남풍을 180°로 정의하였다. 시험조건을 정리하면 Table 3 ~ Table 4와 같다.

3. 실선시험 결과

시험결과를 도시한 그림의 좌측은 선박의 궤적, 우측은 상단부터 선박의 속도/선수각/선회율을 보여준다. 시험데이터의 계측주기는 1Hz이고, 선박의 위치는 경위도 좌표로 계측되나 본 논문에서는 UTM(Universal Transverse Mercator) 좌표로 변환하여 표기하였다. 속도는 대지속도(ground speed)를 의미한다.

3.1 선회시험

Table 3에 정리된 바와 같이, 전진속도 0knots의 선회시험은 우현선회 및 좌현선회 각각 2회 수행되었다. Fig. 4는 전진속도 0knots의 선회시험 결과를 보여준다. 본 시험을 수행한 해역에서의 풍력으로 인해 초기속도가 1knots 부근으로 형성되어 있다. 선수 스러스터의 추력방향과 풍향이 일치하는 경우(1차 우현선회, 2차 좌현선회)는 선박이 환경외란의 방향으로 표류하며 선회가 이루어지고 속도도 점차 증가한다. 선수 스러스터의 추력방향과 풍향이 상반되는 경우(2차 우현선회, 1차 좌현선회)는 선속이 감소하며 거의 제자리에서 선회하는 모습을 보인다.

전진속도 2, 4knots의 선회시험은 맞바람에서 수행되도록 초

Table 3 Turning test conditions

Ship Speed [knots]	Turning Direction	Trial	Date	Time	Initial Heading, ψ_0 [deg.]	WInd Direction [deg.]	Relative WInd Direction [deg.]	WInd Speed [m/s]
0	Starboard	1st	2019.03.26	12:25	260	184	84	4.8
0	Starboard	2nd	2019.03.26	12:45	92	184	276	4.8
0	Port	1st	2019.03.26	12:35	260	184	84	4.8
0	Port	2nd	2019.03.26	12:55	121	184	305	4.8
2	Starboard	1st	2019.03.20	17:10	200	162	2	5
2	Starboard	3rd	2019.03.26	18:57	30	206	236	6.4
2	Port	1st	2019.03.20	17:25	200	162	2	6.4
2	Port	2nd	2019.03.26	17:10	208	206	54	5
2	Port	3rd	2019.03.26	19:08	31	206	237	6.4
4	Starboard	1st	2019.03.20	17:48	200	162	2	6.4
4	Starboard	2nd	2019.03.26	17:34	210	206	56	5
4	Starboard	3rd	2019.03.26	18:29	31	206	237	6.4
4	Port	1st	2019.03.20	17:58	200	162	2	6.4
4	Port	2nd	2019.03.26	17:46	210	206	56	5
4	Port	3rd	2019.03.26	18:40	30	206	236	6.4

Table 4 Zig-zag test conditions

Ship Speed [knots]	Trial	Date	Time	Initial Heading, ψ_0 [deg.]	WInd Direction [deg.]	Relative WInd Direction [deg.]	WInd Speed [m/s]
2	1st	2019.03.20	17:35	200	162	2	5
2	2nd	2019.03.26	17:21	209	206	55	6.4
2	3rd	2019.03.26	18:48	31	206	237	6.4
4	1st	2019.03.20	18:07	200	162	2	5
4	2nd	2019.03.20	18:28	150	162	312	5
4	3rd	2019.03.26	19:18	30	206	236	6.4

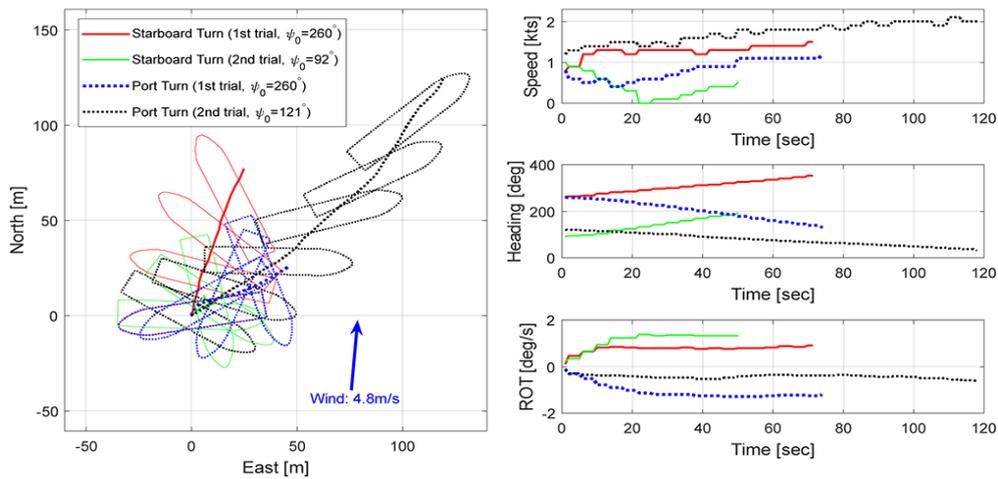


Fig. 4 Turning test results at 0knots

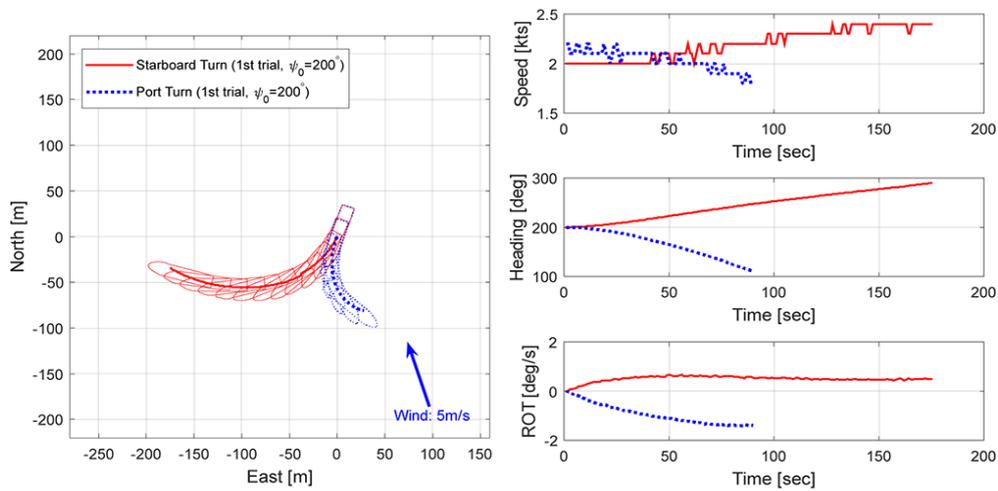


Fig. 5 Turning test results at 2knots forward speed (1st trial)

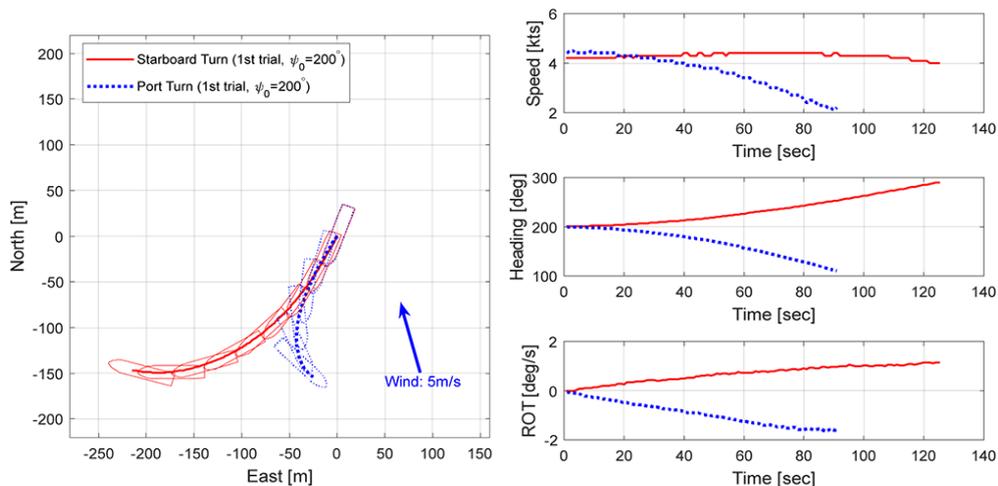


Fig. 6 Turning test results at 4knots forward speed (1st trial)

기 선수각을 결정하였고, 반복시험은 뒷바람(Tail wind)에서 진행하였다. Fig. 5, Fig. 6은 각각 1주차 시험에서 수행된 전진속도 2, 4knots의 선회시험 결과를 나타낸 그림이다. 2주차 시험에서 수행된 전진속도 2, 4knots의 선회시험 결과는 각각 Fig. 7,

Fig. 8에 나타내었다. Fig. 5 ~ Fig. 8을 보면 선속이 빠를수록 선회종가(advance) 및 선회횡가(transfer)가 더 큰 것을 확인할 수 있고, 대체로 우현선회가 좌현선회보다 더 큰 궤적을 그리며 운동하는 모습을 보인다. 선회가 전진 중에 선회를 하면

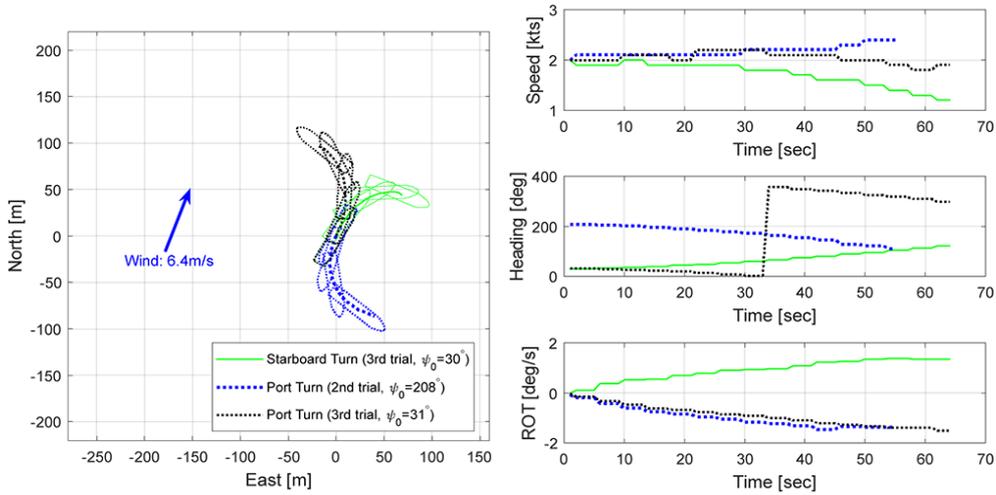


Fig. 7 Turning test results at 2knots forward speed (2nd trial, 3rd trial)

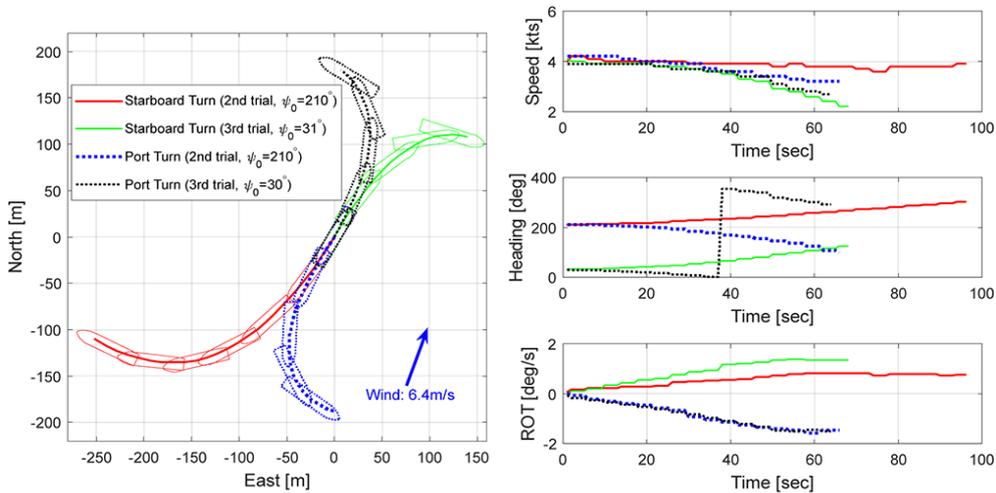


Fig. 8 Turning test results at 4knots forward speed (2nd trial, 3rd trial)

편류각(drift angle)에 의한 저항의 증가로 일반적으로 선속이 떨어지는데, 전진속도 2knots의 우현선회는 선속이 오히려 증가하는 모습을 보인다. 이러한 현상은 선박이 우현으로 선회하면 선수각이 점차 풍향과 일치하여 풍력이 선속을 증가시키는 방향으로 작용하고, 선속이 느리기 때문에 선회로 인한 선체력(hull force) 보다 환경외란의 영향이 지배적이기 때문이라 판단된다.

선회시험 결과로부터 정상상태에서의 선회율, 선수각 변화 시간을 도출하여 각각 Table 5에 정리하였다. 선회율과 선수각이 90° 변화될 때까지 걸린 시간을 그래프로 표현하면 Fig. 9, Fig. 10과 같다. Fig. 9와 같이, 선속이 빠를수록 대체로 선회율이 증가하고 좌현선회가 우현선회보다 선회율이 대체로 큰 경향을 보인다.

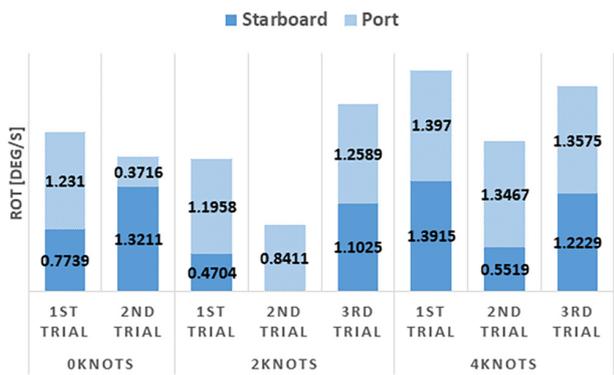


Fig. 9 Rate of turning in steady state

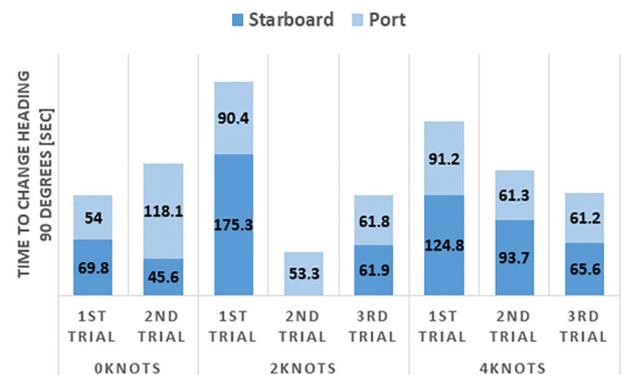


Fig. 10 Time to change heading 90 deg.

이로 인해 좌현선회보다 우현선회가 선수각이 변화하는 데 소요되는 시간이 대체로 큰 것을 Fig. 10에서 확인할 수 있다. Fig. 3을 보면 선수 스러스터 터널 중앙에 하우징(housing)이 위치해 있고 프로펠러는 우현 측에 장착되어 있다. 중앙에 위치한 하우징은 프로펠러 유동에 영향을 미치므로, 선수 스러스터의 추력방향에 따른 효율차이가 발생한 것으로 추정된다.

3.2 지그재그시험

지그재그시험 결과로부터 오버슈트각(Overshoot Angle, OA)과 그 도달시각(time to reach OA)을 도출하여 Table 6에 정리하였다. Fig. 11과 Fig. 12은 1, 2주차에 수행된 전진속도

2knots의 지그재그시험 결과를 각각 나타낸 그림이고, Fig. 13은 1주차에 수행된 전진속도 4knots의 지그재그시험 결과를 보여준다. Fig. 14는 전진속도 2knots의 지그재그시험의 오버슈트각을 도시한 그래프이다. 전진속도 2knots의 지그재그시험은 선속의 증감이 거의 없이 수행됨을 알 수 있다. 맞바람 중에서의 지그재그 시험결과(1차, 2차)는 2차 오버슈트 각이 1차 오버슈트 각에 비해 2배 이상으로 커지는 경향을 보이는 반면, 뒷바람 중에서의 지그재그 시험결과(3차)는 1,2,3차 오버슈트 각이 비교적 일정하다. 이는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 나라호의 상부 구조(superstructure)의 형상으로 인하여 풍압 중심이 선수 쪽으로 형성되어 있기 때문으로 판단된다. 4knots의 선속에서는 2번째 시험만이 좌현방향에서 우현방향으로의 침로변경

Table 5 Turning test results

Ship Speed [knots]	Turning Direction	Trial	Time to Change Heading						ROT in Steady State [deg./s]
			15 deg. [sec]	30 deg. [sec]	45 deg. [sec]	60 deg. [sec]	75 deg. [sec]	90 deg. [sec]	
0	Starboard	1st	10	21.8	33.8	49.1	58	69.8	0.7739
0	Starboard	2nd	13.3	17.5	25.3	33	37.8	45.6	1.3211
0	Port	1st	17.3	25.3	33.4	41.3	49.1	54	-1.231
0	Port	2nd	25.2	41.2	57.8	81.7	105.2	118.1	-0.3716
2	Starboard	1st	38.2	61.5	86.2	114.5	145.2	175.3	0.4704
2	Starboard	3rd	21.3	33.1	41.3	49.3	57	61.9	1.1025
2	Port	1st	30.6	45.1	58.1	69.6	79.6	90.4	-1.1958
2	Port	2nd	17.6	29	34	41.9	45.8	53.3	-0.8411
2	Port	3rd	21.5	-	41.5	49.4	57.2	61.8	-1.2589
4	Starboard	1st	43.7	64.2	82.1	97.6	111.2	124.8	1.3915
4	Starboard	2nd	29.1	45.5	57.7	69.6	81.5	93.7	0.5519
4	Starboard	3rd	25.4	37.3	45.3	53	57.9	65.6	1.2229
4	Port	1st	33.3	49.9	61.5	72.1	81.8	91.2	-1.397
4	Port	2nd	25.7	33.5	41.7	49.4	57.1	61.3	-1.3467
4	Port	3rd	25.2	-	45.1	49.4	53.5	61.2	-1.3575

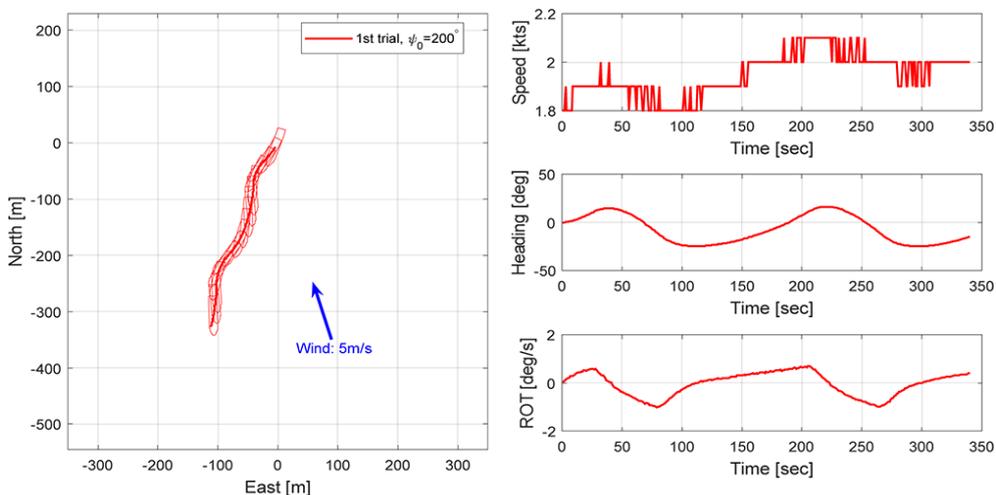


Fig. 11 Zigzag test results at 2knots forward speed (1st trial)

Table 6 Zigzag test results

Ship Speed [knots]	Trial	Overshoot Angle (OA)			Time to Reach		
		1st OA [deg.]	2nd OA [deg.]	3rd OA [deg.]	1st OA [sec]	2nd OA [sec]	3rd OA [sec]
2	1st	4.5	14.8	6.3	38	111	220
2	2nd	4.3	16	6.3	26	82	142
2	3rd	6.3	8.7	9.6	30	86	138
4	1st	13.4	-	-	67	-	-
4	2nd	19.2	65.3	-	99	385	-
4	3rd	24.0	-	-	101	-	-

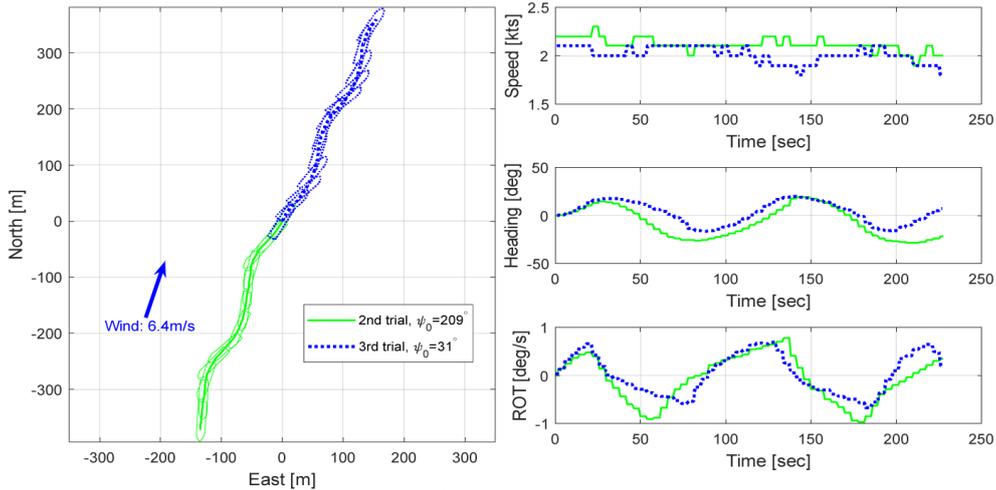


Fig. 12 Zigzag test results at 2knots forward speed (2nd trial, 3rd trial)

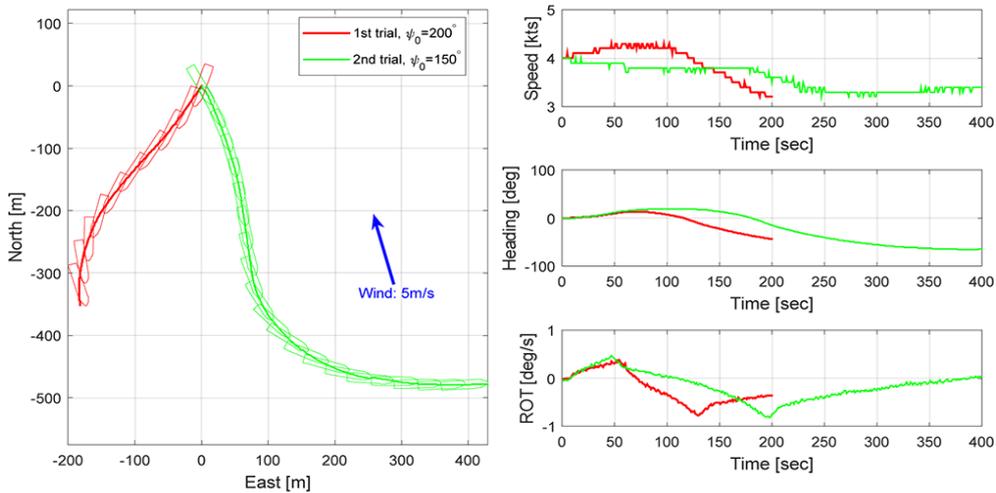


Fig. 13 Zigzag test results at 4knots forward speed (1st trial, 2nd trial)

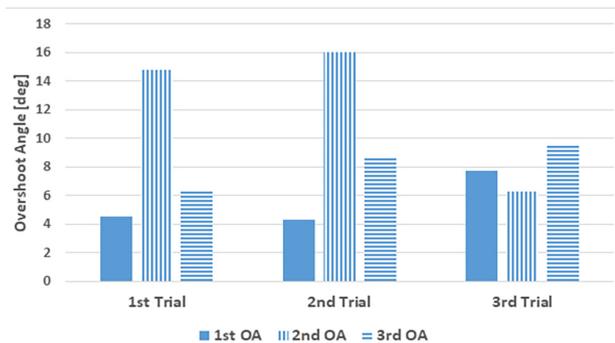


Fig. 14 Overshoot angles of 2knots zigzag test

가능하여 2차 오버슈트각을 확인할 수 있었고 나머지 시도에서는 1차 오버슈트각까지 밖에 확인할 수 없었다. 선속이 4knots인 경우 선속 2knots 대비 편류각에 의한 선체력의 변화가 선수 스러스터 추력의 변화보다 지배적이기 때문에 침로변경이 더 어려운 것으로 추정된다.

4. 결론

본 논문에서는 나라호의 선수 스러스터 성능을 확인하기 위한 실선스케일 조종시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 전

진속도 0knots ~ 4knots 범위에서 나라호는 속도가 빠를수록 선수 스러스터로 인한 선회율이 대체로 더 큰 경향을 보이며, 좌현선회의 선회율이 우현선회의 선회율보다 대체로 더 큰 것으로 확인되었다. 선수 스러스터를 이용한 지그재그시험은 전진속도 2knots에서는 세 번의 반복시험 모두 성공한 반면 전진속도 4knots에서는 세 번의 반복시험 중 한번만 가능하였다. 4knots 이상의 속도에서는 선수 스러스터 만으로는 침로변경이 어려운 것으로 보인다.

본 연구의 한계는 다음과 같다. 첫째, 선수 스러스터 출력과 전방위 추진기 출력 및 각도 등의 기관실 데이터는 획득하지 못하였다. 둘째, 환경외란 정보를 각 시험마다 예측하지 못하고 첫 시험 예측 값을 해석에 적용했기 때문에 엄밀한 해석이 어려웠다.

정확한 환경외란 정보를 가지고 있으면 시스템 식별법(system identification)으로 시험결과를 보정하여 정수(calm sea)중 조종성능 추정이 가능할 수 있다. 하지만 보정된 결과에 대한 검증의 문제 또한 존재하기 때문에, 실제 해상에서의 실선 스케일 조종시험은 최대한 잔잔한 해상에서 환경정보를 매번 기록하며 수행하는 것이 합리적이라 사료된다. 향후 위의 사항을 보완하여 나라호의 크래빙 시험을 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2018학년도 부경대학교 자율창의연구비의 지원으로 연구되었습니다.

참고문헌

- Abramowicz-Gerigk, T., Burciu, Z., Górski, W. & Reichel, M., 2018. Full scale measurements of pressure field induced on the quay wall by bow thrusters—indirect method for seabed velocities monitoring. *Ocean Engineering*, 162, pp.150–160.
- Ahn, Y.W., Yang, J.H. & Jeong, Y.J., 2006. Change of turning angular velocity according to the impellent force of a bow thruster. *Jeju National University Marine Science Research Institute*, 30(1), pp.33–46.
- ITTC, 2017. Full Scale Manoeuvring Trials, ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-04-02-01 Revision 02.
- Kim, J.C., Kang, I.K., Lee, J.H., Ham, S.J., Park, C.W. & Kim, S.H., 2017. The maneuvering characteristics of the research vessel NARA equipped with the azimuth thruster system. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 53(3), pp.276–285.
- Mohan, A., 2017. *Numerical Analysis of Bow Tunnel Thruster Performance*. Delft University of Technology, Master of Science Thesis.
- Schaap, T., 2015. *Changing the cross-sectional geometry of a bow tunnel thruster: Effects on the performance of the thruster at slow forward motion using Computational Fluid Dynamics*. Delft University of Technology, Master of Science Thesis.
- Shin, H.K. & Lee, H.L., 2004. Crabbing test of a 3m ferry model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(1), pp.40–46.
- Uchida, J., Shimizu, K., Yagi, M., Shimoda, M., Aoshima, T. & Kanehara, H., 2014. Turning performance of bow and stern thrusters equipped on the training ship Nagasaki Maru. *Nagasaki University fisheries department study report*.
- Yang, J.H., Ahn, Y.W. & Choi, C.M., 2006. A study on the influence of bow thruster for turning ability. *Journal of the Korean society of Fisheries Technology*, 42(2), pp.111–118.
- Yasukawa, H. & Miyazawa, M., 2001. Crabbing Performance of a Twin Screw Vessel with Bow Thruster. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 2001(190), pp.181–190.
- Yeo, D.J., 2012. 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.
- Yoon, H.K. & Kim, S.Y., 2005. A study on the model test scheme for establishing the mathematical model of hydrodynamic force and moment acting on a slowly moving ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.98–104.

