

동적위치제어시스템을 이용한 선박의 실선스케일 횡이동시험에 관한 연구

박종용¹·이준호^{2,†}

부경대학교 조선해양시스템공학과¹

부경대학교 실습선 나라호²

A Study on Full-Scale Crabbing Test Using Dynamic Positioning System

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 crabbing motion of the research vessel “NARA” by full-scale maneuvering trials. The crabbing test method refers to ITTC recommended procedures and guidelines. In order to minimize the fluctuation of the heading angle due to the external force acting on the hull during the pure lateral motion, the tests are conducted using the dynamic positioning system applied to the ship. The test results are analyzed by applying a low-pass filter to remove the noise included in the measurement data. Three conditions are set to define the steady state of crabbing motion. The index to be derived from the crabbing test is quantitatively presented. The ship is confirmed to be capable of the lateral motion of up to 0.844m/s in Beaufort 3.

Keywords : Crabbing test(횡이동시험), Dynamic positioning system(동적위치제어시스템), Research vessel NARA(해양탐사선 나라호), Bow thruster(선수 스러스터), Azimuth propeller(전방위 추진기)

1. 서론

선박의 횡이동(crabbing motion)은 전후동요(surge) 및 선수 동요(yaw) 없이, 순수하게 좌우방향으로만 이동하는 운동을 의미한다. 2축 2타선의 경우, 좌현과 우현의 프로펠러 추력 방향을 달리하여 전후방향 추력을 상쇄하고, 선수 스러스터(bow thruster)와 타로 인한 선수동요 모멘트가 평형을 이루도록 조작하여 횡 방향 추력을 얻는 방식인 push-pull 모드로 선박의 횡이동을 수행할 수 있다 (Park and Kim, 2013). 선수 스러스터와 선미 스러스터(stern thruster)가 적용된 선박, 혹은 선수 스러스터와 전방위 추진기(azimuth propeller)가 적용된 선박은 전후방향 추력 없이 횡 방향으로 추력을 낼 수 있기 때문에 2축 2타선에 비해 더 효율적인 횡이동이 가능하다. 선박의 횡이동은 접안의 마지막 단계, 즉 안벽 근처에서부터 안벽까지의 이동에 적용할 수 있다. 최근 자율운항선박 핵심기술의 하나인 자동 이/

접안 제어시스템 개발이 요구되고 있으므로, 제어기 설계의 기초가 되는 이/접안 중 선박 동역학에 관한 연구는 지속해서 필요할 것이다.

선박의 횡이동에 관련된 연구는 다음과 같다. Quadvlieg and Toxopeus (1998)은 push-pull 모드를 가동시키며 구속모형시험을 수행한 바 있다. 프로펠러, 선수 스러스터, 타에 의한 힘을 각각 이론적으로 산출한 후 실험값과의 차이를 간섭력으로 정의하여 도출하였다. Shin and Lee (2004)는 2기의 선수 스러스터가 장착된 3 m급 2축 2타 Ferry 모형선을 제작하고, 이/접안 시 프로펠러, 선수 스러스터, 타의 밸런싱(balancing)을 이용하여 전진속도가 없는 상황을 만들고 횡이동이 일어날 때의 횡 방향 힘과 선수동요 모멘트를 측정하였다. 시험결과를 바탕으로 횡이동이 가능한 최대풍속을 결정하는 버터플라이 다이어그램(butterfly diagram)을 작성한 바 있다. Yoo et al. (2006)은 횡이동 시 선체력을 도출하기 위해, 전진방향 속도 없이 정적 좌우동요/선수동요 시험, 동적 좌우동요/선수동요 시험을 수행하

였다. 간섭력 도출을 위하여 push-pull 모드에서 안벽과 선체간 거리를 변화시키며 구속모형시험을 수행하였다. Yeo (2012)는 3기의 선수 스러스터 및 POD 추진기가 장착된 선박의 횡이동 성능을 예측하는 모형시험을 수행하였다. 선박 횡이동 시의 선수 스러스터 및 POD 추진기로 인한 힘과 모멘트를 구속모형시험을 이용하여 계측하고, 풍동시험 결과를 바탕으로 풍력을 추정하여 버터플라이 다이어그램을 작성하였다. Lee et al. (2000)은 저속 조종운종방정식을 기반으로 2축 2타선에 대한 횡이동 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. Park and Kim (2014)은 Yoo et al. (2006)의 선박 횡이동 모형을 참고하고, 비선형 제어기법은 백스테핑(backstepping)을 이용하여 자동 이/접안 시뮬레이션을 수행한 바 있다. 이처럼, 선박의 횡이동 관련 문헌들은 모형선 기반의 구속모형시험 및 시뮬레이션이 주를 이룬다.

본 논문은 실선스케일로 선박의 횡이동시험(crabbing test)을 수행하여, 관련 연구에 참고가 될 수 있는 결과를 제시하는데 목적을 두고 있다. 실선스케일 횡이동시험은 부경대학교 해양탐사선 “나라호”로 수행되었다. 횡이동시험 방법은 실선스케일 조종시험에 대한 ITTC recommended procedures and guidelines 를 참고하였다. 선체에 작용하는 외력으로 인한 선수각의 동요를 최소화 하며 횡이동 하기 위해 나라호에 적용된 동적위치제어시스템을 이용하였다. 측정 데이터에 포함된 잡음(noise)을 제거하기 위해 저주파 통과필터(low-pass filter, LPF)를 적용하여 시험결과를 분석하였고, 횡이동시험으로부터 도출해야 하는 주요 지수(index)를 정량적으로 제시하였다.

2. 실선시험 준비

2.1 시험선 및 동적위치제어시스템

본 연구에 사용된 선박은 부경대학교 해양탐사선 나라호이다. 나라호는 해양탐사작업뿐 아니라 해양관련학과 학생들의 승선실습을 수행하기 위해 설계되었다. 나라호의 일반배치도 및 제원은 각각 Fig. 1, Table 1과 같다.

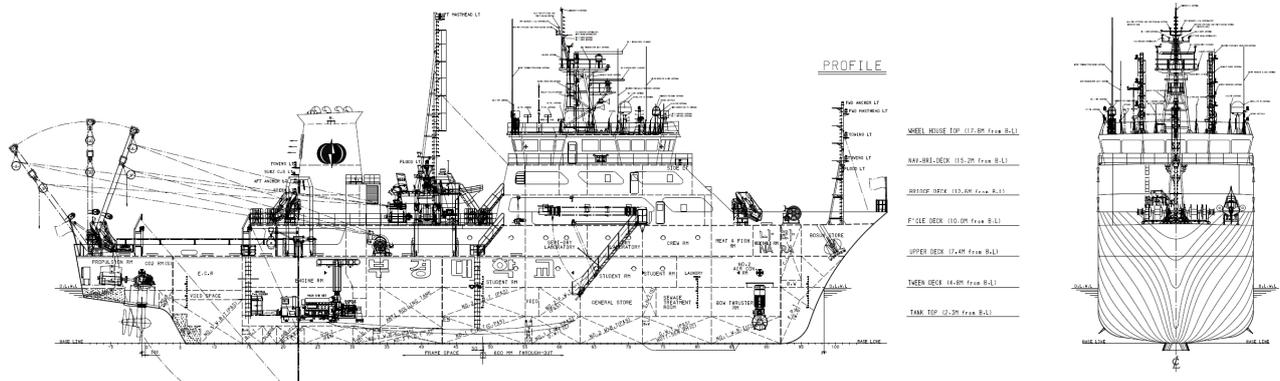


Fig. 1 General arrangement of NARA (Park et al., 2020)

Table 1 Principal dimensions of NARA (Park et al., 2020)

Item	Value
Length overall, LOA [m]	70.7
Length between perpendicular, LBP [m]	59.7
Breadth [m]	13.5
Draft [m]	4.7
Displacement [tons]	1,494
Metacentric height, GM [m]	0.6
Design speed [m/s]	7.1

나라호는 2기의 전방위 추진기(azimuth propeller)와 1기의 선수 스러스터로 추진 및 조타를 수행한다. 나라호의 전방위 추진기는 Rolls-Royce US 155로 한 쌍의 상반 회전 프로펠러 (Contra-rotating propeller, CRP)가 장착되어 있다. 나라호의 선수 스러스터의 직경은 1,250 mm이고 최대 7 tons의 횡방향 추력을 낼 수 있다. 선수 스러스터 및 전방위 추진기의 제원은 각각 Table 2, Table 3과 같다.

Table 2 Principal dimensions of bow thruster (Park and Lee, 2020)

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

Table 3 Principal dimensions of azimuth thruster (Park et al., 2020)

Item	Specification
Max. power on the input shaft	1,100 kW
Main engine nominal speed	0-1200 rpm
Reduction ratio	5.311:1
Propeller type	Contra-Rotating propellers (CRP), Monoblock, Fixed pitch
Propeller diameter	2200 mm / 1950 (front / aft propeller)
No. of propeller blades	4 / 5 (front / aft propeller)
Propeller speed	0-226 rpm
Stem length	3,620 mm
Steering speed	3 rpm

나라호는 바람, 조류, 파도와 같은 환경외란 중에서 정밀한 해양탐사를 위하여 콩스버그(Kongsberg) 사의 K-POS 동적위치제어시스템이 적용되었다. K-POS 동적위치제어시스템은 확장 칼만필터(extended Kalman filter)를 사용하여 환경외란의 영향을 추정하고, 자이로컴퍼스(gyrocompass) 및 위치참조시스템(position-reference system)을 통하여 계측된 데이터와 전방위 추진기와 선수 스러스터에 연계하여 위치/방위각 자동제어를 수행한다 (Lee et al., 2018). K-POS 동적위치제어시스템을 블록선도(block diagram)로 표현하면 Fig. 2와 같다.

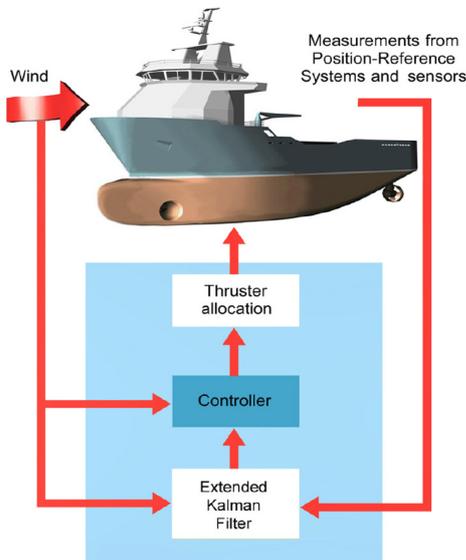


Fig. 2 K-POS dynamic positioning system block diagram (Lee et al., 2018)

2.2 좌표계

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 좌표계를 보여준다. 수평면 운동을 표현하기 위하여 지구고정좌표계 $O_0-x_0y_0$ 와 선박고정좌표계 $O-xy$ 가 사용되었다. 지구고정좌표계의 x_0 축과 선박고정좌표계 x 축이 이루는 각을 선수각 ψ 로 정의한다. 선박의 속도 V 의

방향과 지구고정좌표계의 x_0 축이 이루는 각을 β_0 , 선박의 속도 방향과 선박고정좌표계의 x 축이 이루는 각을 β 로 정의하였다. 선박고정좌표계에서 정의되는 전후방향속도, 횡방향속도, 선수각속도(rate of turn, ROT)는 각각 u, v, r 로 정의한다. 풍향 ψ_w 은 북풍을 0° , 동풍을 90° , 남풍을 180° , 서풍을 270° 로 정의하였다.

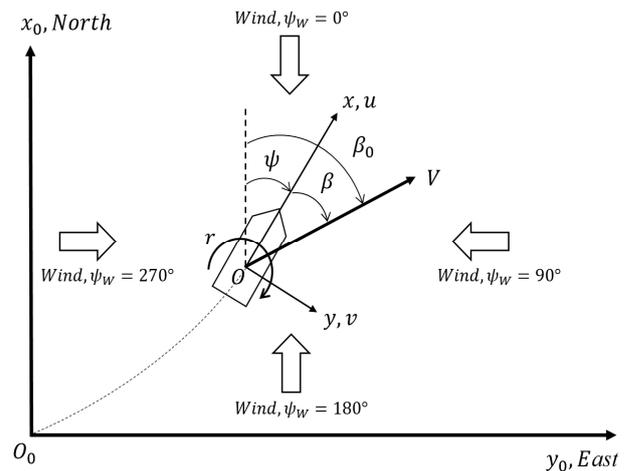


Fig. 3 Coordinate systems

2.3 시험방법 및 조건

선박의 조종성능을 확인하기 위한 총 19개의 시험이 IMO, ITTC, SNAME, ISO 등 다양한 기관에서 제시되었다 (ITTC, 2017). 이 중, 횡이동시험은 선박이 전진방향운동 및 선수동요 없이 순수 횡이동을 할 수 있는 능력을 확인하기 위하여 수행된다. 전후방향 운동 없이 순수 횡이동 하도록 가능한 프로펠러, 타, 추진기 등을 모두 사용하며 시험을 수행한다. 횡이동시험은 정상상태(steady state)에서의 횡방향 속도를 계측하는 것이 목적이며, 선수각과 전후방향속도 등과 같은 선체 운동의 시간이력(time history)이 기록되어야 한다. 횡이동시험은 가능한 바람이 없는 정수중에서 수행되어야 한다. 만약 해상상태가 Beaufort 2 이상일 경우 횡바람(beam wind)에서 수행되어야 하고 바람, 조류 등의 해상조건이 명시되어야 한다.

본 시험은 2019년 9월 6일 부산 신항 입구(위도: 35.019° , 경도: 128.910°)에서 진행되었다. 시험 수행 당시 풍속은 Beaufort 3에 해당하는 3~6 m/s 정도였으므로 ITTC recommended procedures and guidelines에 따라 횡바람에서 수행하였다. 시험 시작 기준 풍향은 75° 내외였기 때문에, 선박이 정지된 상태에서 선수각을 345° 로 정렬한 후 좌현이동 및 우현 이동하여 시험을 수행하였다. 그 후 선박의 선수각을 165° 로 정렬한 후 우현이동 및 좌현 이동하여 시험을 수행하였다. 순수 횡이동을 구현하기 위해 동적위치제어시스템을 이용하여 목표한 선수각으로의 자동제어를 수행하며 횡이동시험이 진행되었다. 시험조건을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4 Test conditions

Test case number	Moving direction	Date	Time	Initial heading, ψ_0 [deg]	Wind direction [deg]	Relative wind direction [deg]	Wind speed [m/s]
1	Port	2019.09.06	07:35	344.5	77.3	92.8	3.7
2	Starboard	2019.09.06	07:42	344.5	85.2	100.7	4.8
3	Starboard	2019.09.06	07:54	163.4	56.3	252.9	2.8
4	Port	2019.09.06	08:01	164.1	56.3	252.2	3.1

3. 실선시험 결과 및 분석

본 시험데이터의 계측 주기는 1 Hz이고, GPS로 계측되는 선박의 위치는 경위도 좌표로 획득되나, 본 논문에서는 UTM(universal transverse mercator) 좌표로 변환하여 표기하였다. GPS로 계측된 선박의 속도는 대지속도(ground speed)이며 합속도(total speed)를 의미한다. 계측된 속도에 포함된 GPS 자체의 잡음(noise) 및 환경외란으로 인한 잡음을 억제하기 위하여 식 (1)과 같은 저주파 통과필터(low-pass filter, LPF)를 적용하였다.

$$\hat{V}_k^{LPF} = \alpha_V \hat{V}_{k-1}^{LPF} + (1 - \alpha_V) \bar{V}_k \quad (1)$$

위첨자 “-”는 계측된 상태, “^”는 추정된 상태로 정의하였다. k 는 데이터의 순서를 의미하는 지수, \bar{V}_k 는 계측된 속도, \hat{V}_k^{LPF} 는 저주파 통과필터를 통하여 추정된 속도를 의미한다. 상수 α_V 는 $0 < \alpha_V < 1$ 인 저주파 통과필터의 설계 파라미터(parameter)이다. 본 연구에서는 α_V 를 0.1부터 필터 성능을 확인하며 점진적으로 증가시켰고, 최종적으로 0.8을 적용하였다. 2.2절에 기술한 바와 같이, 횡이동시험은 선박의 횡방향 속도 v 뿐 아니라 전후방향속도 u 의 시간이력도 기록되어야 한다. 계측 및 추정된 속도로부터 횡방향 속도 및 전후방향속도를 도출하기 위해서는 편류각 β 를 알아야 한다. 편류각 β 는 직접 계측되는 값이 아니므로, 본 연구에서는 계측된 다른 상태들을 바탕으로 추정하였다. 우선, 계측된 위치 데이터의 변화를 토대로 지구고정좌표계기준 선박의 속도의 방향을 의미하는 β_0 를 추정한다. 추정된 β_0 와 계측된 선수각 ψ 간의 차이로 편류각 β 를 추정하였다. β_0 를 도출한 방법을 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\hat{\beta}_{0,k} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}_{0,k} - \bar{y}_{0,k-1}}{\bar{x}_{0,k} - \bar{x}_{0,k-1}} \right) \quad (2)$$

데이터 계측 주기가 1Hz로 다소 큰 상황에서 이전과 현재 위치 계측 데이터 간 차이로 β_0 를 추정할 결과 잡음이 심하였다. 따라서 추정된 β_0 에 식 (3)과 같은 저주파 통과필터를 적용하였다.

$$\hat{\beta}_{0,k}^{LPF} = \alpha_\beta \hat{\beta}_{0,k-1}^{LPF} + (1 - \alpha_\beta) \hat{\beta}_{0,k} \quad (3)$$

상수 α_β 는 α_V 와 마찬가지로 0.8로 결정하였다. 편류각 β 는 식 (4)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\beta}_k = \hat{\beta}_{0,k}^{LPF} - \bar{\psi}_k \quad (4)$$

추정된 편류각을 이용하면 횡방향 속도 및 전후방향 속도는 각각 식 (5), 식 (6)과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{u}_k = \hat{V}_k^{LPF} \cos \hat{\beta}_k \quad (5)$$

$$\hat{v}_k = \hat{V}_k^{LPF} \sin \hat{\beta}_k \quad (6)$$

각 시험별 계측 및 추정된 위치, 속도, 선수각, 편류각, 풍향, 풍속 등을 그래프로 표현하면 Fig. 4 ~ Fig. 7과 같다. 횡이동 방향이 좌현(-)인 case 1, case 4의 경우 합속도와 비교가 쉽도록 부호를 반대로 하여 그래프에 도시하였다. 시험결과 중 궤적을 표기한 그래프를 보면, 환경외란과 선수각의 오차로 인해 순수 횡이동을 가정하였을 시 예상되는 궤적에서 약 5분 동안 최대 15 m, 즉 수선간 길이 대비 0.25LBP 정도 벗어났다. 선수각 및 선수각속도의 경우, 동적위치제어시스템으로 인하여 목표한 선수각 및 선수각속도로부터 각각 $\pm 5^\circ$, $\pm 0.5^\circ/s$ 이하의 오차 내에서 횡이동시험이 수행된 것을 알 수 있다. 식 (2)로 추정된 지구고정좌표계기준 선박의 속도 방향 β_0 와, 이에 저주파 통과필터를 적용한 결과를 비교해 보면 필터로 인하여 데이터가 확연히 개선된 것을 알 수 있다. 마찬가지로, GPS로 계측된 속도와 저주파 통과필터를 통하여 추정된 속도를 비교해 보면, 필터로 인하여 잡음이 억제된 것을 알 수 있다. 횡이동 방향과 풍향이 상반되는 경우(case 2, case 4)가 횡이동 방향과 풍향이 일치하는 경우(case 1, case 3)보다 횡방향 속도 대비 전후방향 속도의 크기가 상대적으로 크고, 변동 또한 심한 것으로 확인된다. 이는 횡이동 방향에 반대인 풍하중을 받으며 선수각을 제어함으로 인한 현상으로 판단된다.

계측 및 추정된 데이터를 바탕으로 횡이동시험으로부터 도출해야 하는 주요 지수를 도출하기 위해선 정상상태로 정의할 수 있는 구간을 설정해야 한다. 정상상태는 안정된 출력을 얻기까지의 과도구간을 지나 응답(response)이 충분히 안정된 상태를 의미한다. 본 연구에서의 정상상태란 단순히 속도가 안정된 구간이 아니라 순수 횡이동에 가까운 상태를 의미하기 때문에 아래의 조건을 만족해야 한다고 가정하였다. 첫째, 선수각 ψ 와

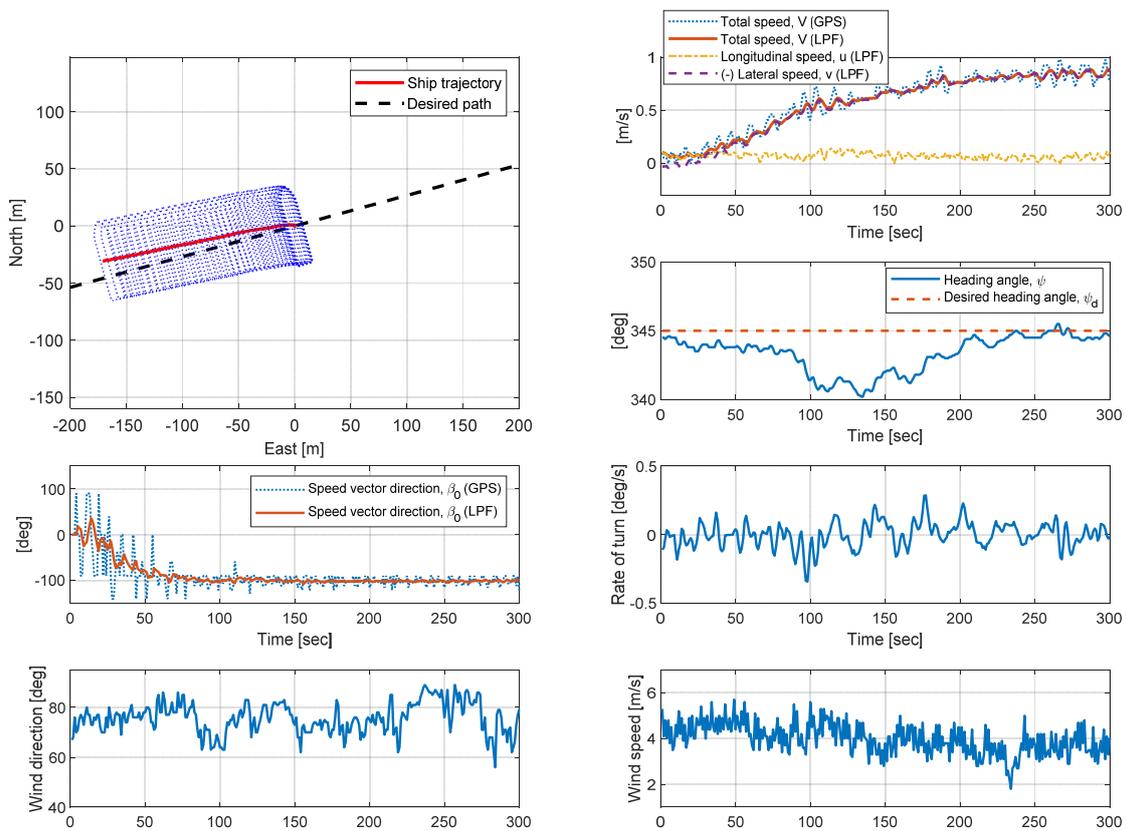


Fig. 4 Crabbing test results (case 1)

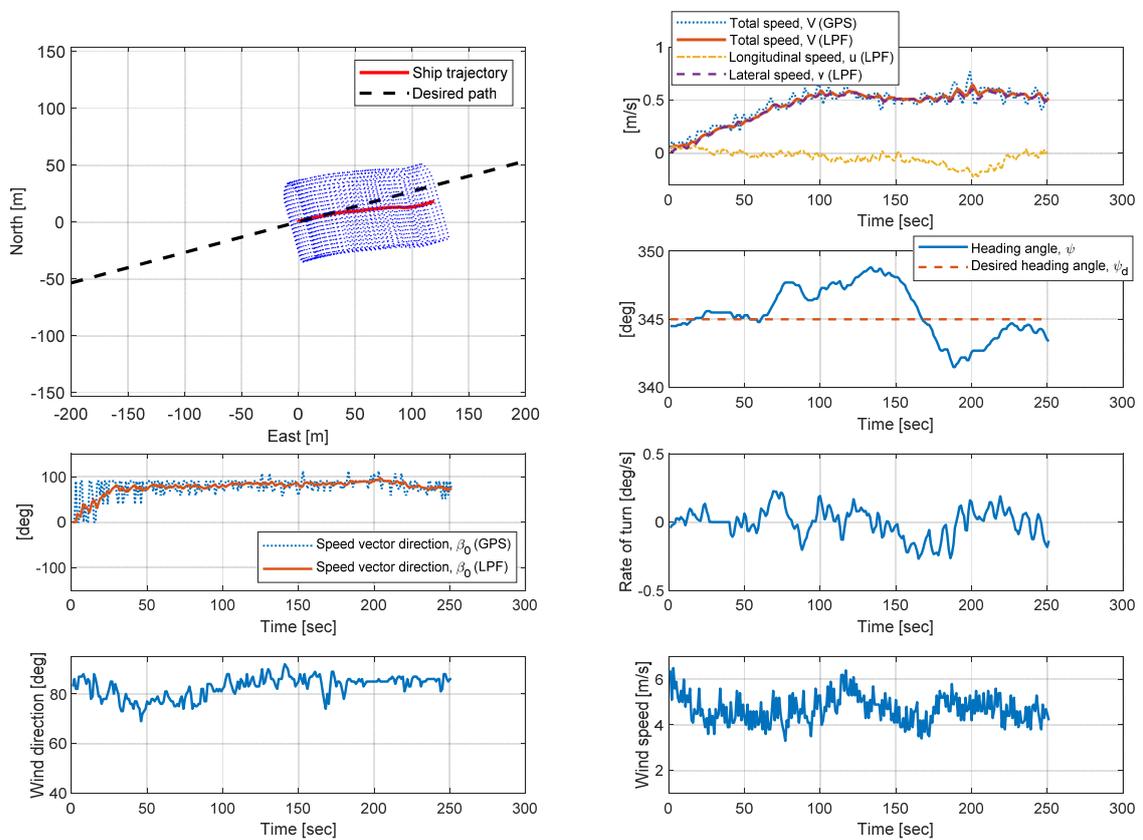


Fig. 5 Crabbing test results (case 2)

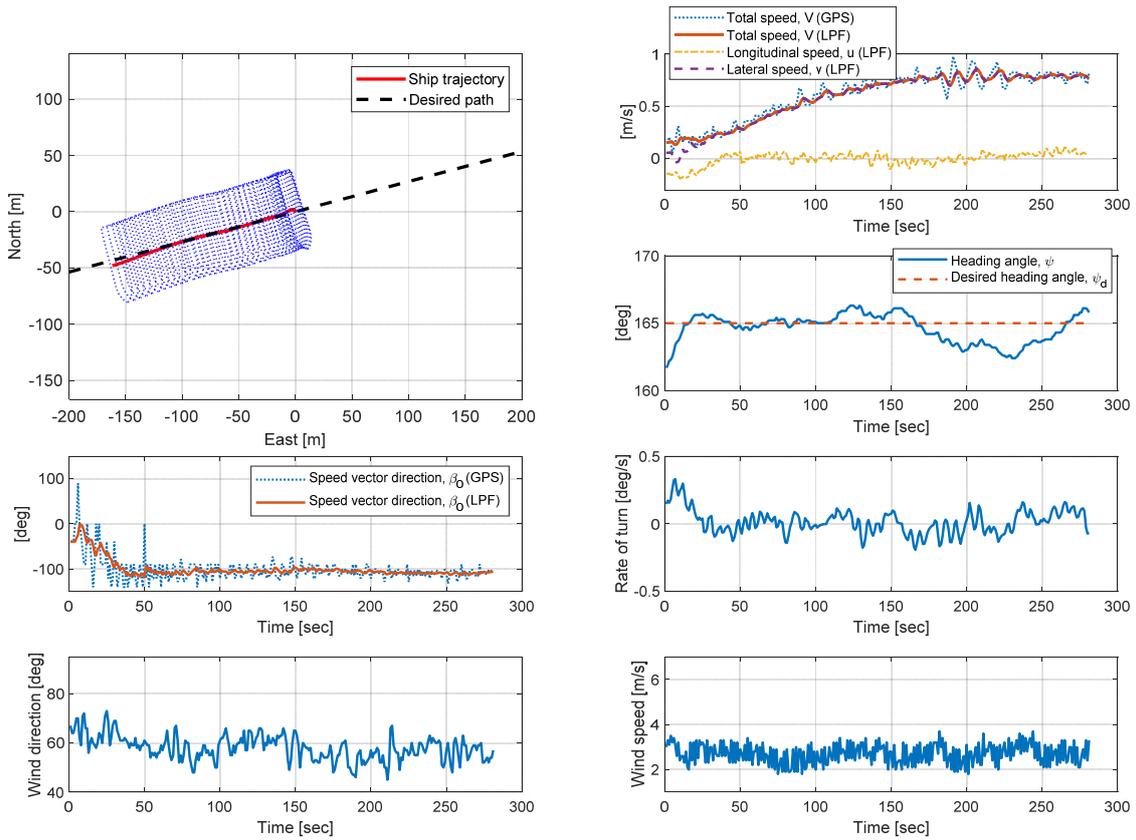


Fig. 6 Crabbing test results (case 3)

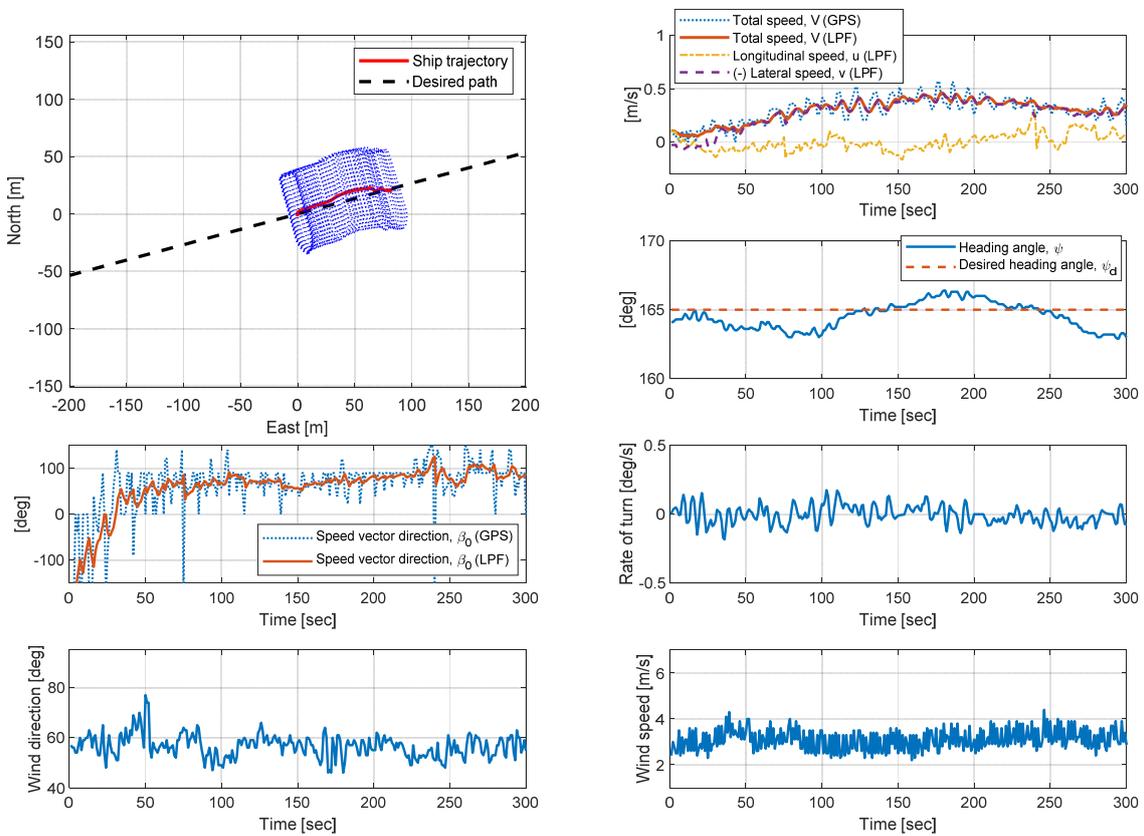


Fig. 7 Crabbing test results (case 4)

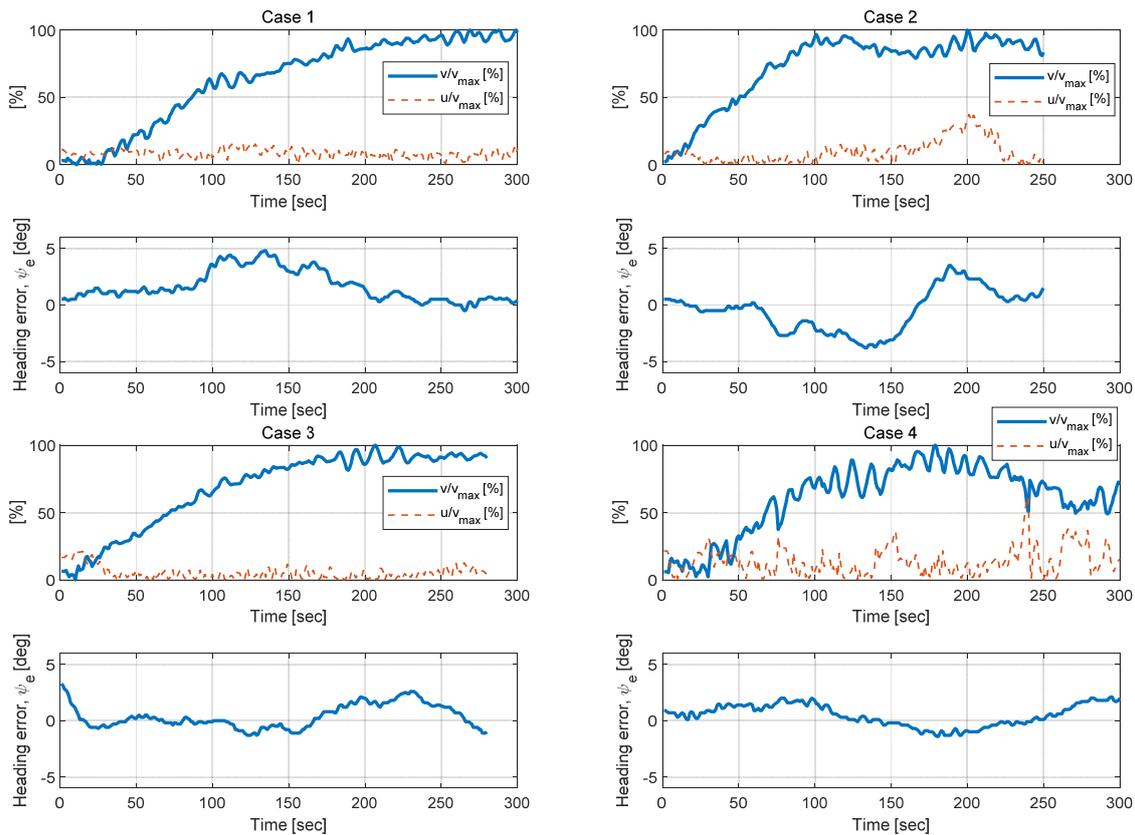


Fig. 8 Heading angle error and speeds per maximum lateral speed

목표 선수각(desired heading angle) ψ_d 와의 오차(error) ψ_e 가 작아야 한다. 둘째, 횡방향 속도 대비 전후방향 속도가 미소하여야 한다. 셋째, 정상상태로 정의한 구간에서는 시험 중 최대 횡속도에 근접한 응답이 유지되어야 한다. 정상상태의 시작 구간을 설정하기 위해서 정정시간(settling time)의 개념을 적용하였다. 정정시간이란 단위 계단응답(unit step response)에서 출력이 최종값의 95 % 혹은 98 %에 도달하는 데 걸리는 시간을 의미하며, 각 시간을 5 % 정정시간과 2 % 정정시간이라 정의한다. Fig. 4 ~ Fig. 7에 도시된 속도를 보면 저주파 통과필터를 적용하였음에도 불구하고 파랑의 영향이라 추정되는 응답의 변동을 완벽히 제거할 수 없음을 알 수 있다. 실제 해상에서 수행한 본 시험의 결과에서 출력의 최종값이라 정의할 수 있는 구간은 찾을 수 없으므로, 최대 횡방향 속도 대비 95 %에 도달한 시간을 정상상태의 시작으로 간주하였다. 각 시험 별 최대 횡방향 속도 v_{max} 대비 전후방향 속도 및 횡방향 속도와 선수각 오차를 Fig. 8에 도시하였다. 정상상태의 종말점을 결정하기 위하여 응답의 변동 주기 및 설정한 정상상태 조건을 고려하였다. 선수각 오차와 횡방향 속도 대비 전후방향 속도가 상대적으로 작고, 응답 변동 주기의 최소 5배 이상인 구간을 정상상태로 가정하였다. 예를 들어 case 2의 경우 횡방향 속도가 저주파 응답으로 인해 2개의 고점(peak)을 보이는데, 두 번째 고점 구간에서의 전후방향 속도가 첫 번째 고점 구간보다 상대적으로 크므로, 첫 번째 구간을 횡이동 정상상태 구간이라 정의하였다. 각 시험 별 횡이동 정상상태에서의 합속도, 횡방향 속

도, 전후방향 속도의 평균과 선수각, 선수각속도의 최댓값을 정리하면 Table 5와 같다.

Table 5을 보면, 설정된 정상상태 구간에서 선수각 오차는 4.800° , 선수각속도는 $0.332^\circ/s$ 이하로 횡이동시험이 수행된 것으로 확인된다. 횡방향 속도 최댓값 대비 전후방향 속도의 평균은 10 % 이하임을 알 수 있다. 횡이동 방향과 풍향이 일치하는 경우(case 1, case 3)가 횡이동 방향과 풍향이 상반되는 경우(case 2, case 4)보다 상대적으로 횡방향 속도가 더 큰 것을 알 수 있다. 해당 시험환경 중 나라호의 최대 횡방향 속도는 이동방향과 풍향이 일치하는 경우 약 0.844 m/s , 이동방향과 풍향이 상반되는 경우 약 0.529 m/s 로 추정된다.

Table 5 Crabbing test index

Items	case 1	case 2	case 3	case 4
Average total speed [m/s]	0.846	0.533	0.787	0.407
Average lateral speed [m/s]	0.844	0.529	0.785	0.405
Average longitudinal speed per max. lateral speed [%]	6.186	9.494	4.854	7.622
Maximum heading error [deg]	4.800	3.500	3.300	2.100
Maximum rate of turn [deg/s]	0.287	0.227	0.332	0.175

4. 결론

본 논문에서는 나라호의 횡이동 성능을 확인하기 위한 실선 스케일 조종시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 나라호에 탑재된 동적위치제어시스템으로 선수각을 제어하며 순수 횡이동에 가까운 운동을 구현하였다. 계획된 데이터로부터 유의미한 결과를 얻기 위하여 저주파 통과필터를 적용하고, 횡이동 정상 상태를 정의하기 위한 조건을 설정하였다. 분석결과 나라호는 Beaufort 3의 해상상태에서 최대 0.844 m/s의 횡이동이 가능한 것으로 보인다. 본 논문의 분석결과와 나라호의 입출항 데이터를 활용하여 자동 이/접안을 위한 제약조건과 참조모형(reference model)개발에 관한 연구를 추후 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2018학년도 부경대학교 자율창의연구비의 지원으로 연구되었습니다.

References

ITTC, 2017. Full Scale Manoeuvring Trials, ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-04-02-01 Revision 02.

Lee, S.W., Hwang, Y.S., & Kim, Y.S., 2000. Crabbing Simulation of Ship with Twin Rudder and Twin Skeg. Proceedings of the Annual Spring Meeting, Society of Naval Architects of Korea, pp.144-147.

Lee, J. H., Kong, K. J., Jung, B. K., 2018. Performance analysis of dynamic positioning system with loss of propulsion power of T/S NARA. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Ocean Technology*, 54(2), pp.181-187.

Park, J.Y., & Kim, N., 2013. Modeling and controller design of crabbing motion for auto-berthing. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(6), pp.56-64.

Park, J. Y., & Kim, N., 2014. Design of an adaptive backstepping controller for auto-berthing a cruise ship under wind loads. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), pp.347-360.

Park, J. Y., & Lee, J. H., 2020. A study on full-scale maneuvering trials using bow thruster. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(1), pp.52-59.

Park, J. Y., Oh, P., Kim, T., & Lee, J. H., 2020. Study on stopping ability of a ship equipped with azimuth propeller. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 34(1), pp.13-18.

Quadvlieg, F.H.H.A., & Toxopeus, S.L., 1998. Prediction of Crabbing in the Early Design Stage. Elsevier Science B.V., pp.649-654.

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.

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.

Yoo, W-J., Yoo, B.Y., & Rhee., K.P., 2006. An Experimental study on the maneuvering characteristics of a twin propeller/twin rudder ship during berthing and unberthing. *Ships and Offshore Structures*, 1, pp. 191-198.



박종웅

이준호