

능동제어가 가능한 선미 인터셉터가 부착된 활주선형 선박의 시스템 식별과 자세 제어에 관한 연구

최후재^{1,3}·박종용²·김동진³·김선영³·이주호⁴·안진형⁴·김낙완^{5,†}
서울대학교 조선해양공학과¹
부경대학교 조선해양시스템공학과²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소³
국방과학연구소 제6기술연구본부⁴
서울대학교 해양시스템공학연구소⁵

System Identification and Pitch Control of a Planing Hull Ship with a Controllable Stern Interceptor

Hujae Choi^{1,3}·Jongyong Park²·Dongjin Kim³·Sunyoung Kim³·Jooho Lee⁴·Jinhyeong Ahn⁴·Nakwan Kim^{5,†}
Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University²
Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Korea Institute of Ocean Science and Technology³
The 6th R&D Institute, Agency for Defense Development⁴
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University⁵

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.

Planing hull type ships are often equipped with interceptor or trim tab to improve the excessive trim angle which leads to poor resistance and sea keeping performances. The purpose of this study is to design a controller to control the attitude of the ship by controllable stern interceptor and validate the effectiveness of the attitude control by the towing tank test. Embedded controller, servo motor and controllable stern interceptor system were equipped with planing hull type model ship. Prior to designing the control algorithm, a model test was performed to identify the system dynamic model of the planing hull type ship including the stern interceptor. The matrix components of model were optimized by Genetic Algorithm. Using the identified model, PID controller which is a classical controller and sliding mode controller which is a nonlinear robust controller were designed. Gain tuning of the controllers and running simulation was conducted before the towing tank test. Inserting the designed control algorithm into the embedded controller of the model ship, the effectiveness of the active control of the stern interceptor was validated by towing tank test. In still water test with small disturbance, the sliding mode controller showed better performance of canceling the disturbance and the steady-state control performance than the PID controller.

Keywords : High speed planing hull(고속 활주선), Stern interceptor(선미 인터셉터), Ship attitude control(선박 자세 제어), System identification(시스템 식별), Genetic algorithm(유전 알고리즘), Towing tank test(예인수조실험)

1. 서론

활주선형 선박은 여러 고속선형 중에서도 빠른 편에 속해 임무 수행 능력이 우수하고, 선저형상이 단순하여 설계가 용이하다는 장점이 있다. 활주선형 선박은 고속으로 항주 시 중량의 상당 부분을 양력으로 지지하게 되며, 이때 선박의 부상량이 급격히

증가하게 되는데 이를 활주상태라고 한다. 활주상태에서는 종종 운항 중 과도한 트림각(trim)을 갖게 된다. 이럴 경우 항해사의 가시영역이 줄어들 뿐만 아니라 해상환경이 나빠질 경우 안 좋은 저항성능 및 내항성능을 보이게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 활주선형 선박에 인터셉터, 트림탭, 트림섬 웨지와 같은 부가물을 부착하여 음의 종동요 모멘트를 발생시켜 트림각을 줄

여주기도 한다. 이 중 인터셉터는 보통 선미에 수직으로 부착하는 얇은 판으로, 선저에 흐르는 유동을 막아 선미부분의 입력을 증가시켜 음의 종동요 모멘트를 발생시키는 방법으로 트림각을 줄여주는 역할을 한다.

본 연구의 목적은 능동제어가 가능한 선미 인터셉터를 포함한 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델을 식별하고 선박의 자세 제어를 위한 제어를 설계하는 것이다. 예인수조실험 주행 입·출력 데이터를 이용한 시스템 식별법을 통해 동역학 모델을 식별하고 식별한 모델을 이용해 선박의 자세 제어를 설계하였으며 예인수조실험을 통해 설계한 제어를 검증하였다. 본 연구와 관련하여 다음과 같은 선행연구들이 수행되었다.

인터셉터나 트림탭과 같은 선미 부가물과 관련된 연구는 대부분 전산유체역학과 예인수조실험을 통해서 이루어졌으며, 활주선형 선박의 자세 안정과 운동진폭 감소와 관련된 연구가 주로 수행되어왔다. Molini and Brizzolara (2005)는 전산유체역학을 통해서 활주선형 선박에 부착된 인터셉터에 의한 선저의 양력 변화를 계산했다. Luca and Pensa (2012)는 전산유체역학을 통해 활주선형 선박에 부착된 인터셉터에 의한 종동요 모멘트가 트림각을 감소시키는 효과에 대한 계산을 수행하고 예인수조실험을 통해 결과를 검증하였다. Kim et al. (2011)는 워터젯 추진 고속선의 트림탭이 항주 자세 및 저항 성능에 미치는 영향에 대한 예인수조실험을 수행하였다. 정수 중 예인수조실험 결과 트림탭에 작용하는 양력이 어느 수준까지 커질수록 부상량과 트림각이 줄어들고 저항이 감소하는 효과가 있었으며 규칙파 중 예인수조실험 결과로는 트림탭에 작용하는 양력이 커질수록 상하동요와 종동요 운동 진폭이 감소하는 효과를 확인하였다. Seo et al. (2013)는 대표적인 선미 부가물인 인터셉터, 트림탭, 트랜섬 웨지가 Deep-V형상의 쌍동선의 트림과 저항에 미치는 영향을 확인하기 위한 예인수조실험을 수행하였다. 예인수조실험 결과 선미 부가물 중 인터셉터가 가장 높은 효율을 보였다. Rijkens et al. (2011)은 예인수조실험을 통해 선미 인터셉터의 길이별 선저의 양력 변화를 계측하여 양력계수를 계산했고 이를 기존의 경험식과 비교 검증했다.

선미 부가물의 능동제어에 대한 연구는 Wang (1985)에 의해 처음 발표되었다. Wang은 고속선이 해상에서 종동요 각속도를 되먹임하여 선미 트림탭을 능동제어할 경우 상하동요와 종동요 진폭을 효율적으로 감소시킬 수 있다는 것을 확인하였다. 이후 Rijkens et al. (2011)은 계산한 선미 인터셉터의 길이별 양력계수를 이용하여 규칙파 중에서 능동제어 시뮬레이션을 수행하여 결과를 검증하였다. Karimi et al. (2015)는 인터셉터가 포함된 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델링을 수행하고 LQR제어를 설계하여 규칙파 중에서 선미 인터셉터 능동제어 시뮬레이션을 통해 운동진폭 감소 효과를 보였다.

활주선형 선박의 주행 입·출력 데이터를 바탕으로 시스템 식별법을 이용하여 동역학 모델을 식별하는 연구는 Mansilla et al. (2009)과 Ertogan et al. (2017)등에 의하여 수행되었다. Mansilla et al. (2009)은 비선형 최소화승법을 이용하여 활주선형 선박의

파랑 중 roll-pitch-heave 동역학 모델을 식별하였다. Ertogan et al. (2017)은 딥러닝(Deep learning)을 활용하여 능동제어가 가능한 선미 인터셉터가 부착된 활주선형 선박의 파랑 중 surge-pitch 동역학 모델을 식별하였다.

이렇듯 최근 들어 활주선형 선박에 부착된 선미 인터셉터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 선미 인터셉터에 의한 자세 안정 및 운동진폭 감소 효과에 대한 연구가 보고되고 있지만, 인터셉터의 능동제어기법과 관련된 연구는 극히 소수의 연구자에 의해 수행되었다.

본 연구를 수행하기 위해 모형선에 임베디드 제어기와 능동제어가 가능한 선미 인터셉터를 부착한 시스템을 구축하였다. 선박의 종방향 동역학 모델을 식별하기 위하여 시스템 식별을 위한 실험을 수행하였다. 예인수조실험 주행 입·출력 데이터를 이용하여 동역학 모델을 식별하고 유전알고리즘을 통해 모델 파라미터의 최적화를 수행하였다. 식별한 동역학 모델을 이용하여 자세 제어를 설계하고 정수 중 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 설계한 제어를 모형선의 임베디드 제어기에 삽입하여 서울대학교 예인수조에서 예인수조실험을 수행하였다. 예인수조실험결과 선미 인터셉터의 능동제어를 통한 자세 제어 효과를 실험적으로 검증할 수 있었다.

2. 모형시험 개요

2.1 모형선

본 연구의 대상선은 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KRISO)에서 개발 중인 무인선 아라곤 2호이다. 선박의 선미에는 스웨덴의 Humphree사에서 개발한 능동제어가 가능한 인터셉터 모듈이 부착되어있다. 실선의 길이는 8 m, 폭은 2.3 m이며 무게는 모든 장비 탑재시 배수량 기준 3000 kg으로 설계되었다. Fig. 1은 육상에서 찍은 아라곤 2호의 모습을 나타낸다. 그림을 통해 선박의 대략적인 선형을 확인할 수 있다.



Fig. 1 Aragon II, Unmanned surface vehicle of KRISO

모형선은 1/5.333의 축적비로 제작되었으며 이에 따라 길이는 1.5 m이다. Table 1에 실선과 모형선의 주요 치수를 나타내었다.

Table 1 Principal dimensions of ships

Item	Full scale	Model scale
LOA	8.000 m	1.500 m
LWL	7.539 m	1.414 m
Breadth (ext)	2.300 m	0.431 m
Breadth (chine)	2.200 m	0.413 m
Draft	0.415 m	0.0778 m
Displacement	3000 kg	19.78 kg
LCG from A.P.	2.647 m	0.496 m

2.2 모형선 예인시스템

모형 시험은 서울대학교 예인수조에서 수행되었다. 서울대학교 예인수조는 길이 110 m, 폭 8 m, 깊이 3.5 m의 예인수조 시설로 최대 속도 10 m/s로 운행할 수 있는 고속예인전차장비를 갖추고 있다. 트러스(truss) 구조로 제작된 고속 예인전차는 예인수조 측면의 와이어(wire)에 연결되어 드럼(drum)의 회전 속도에 맞춰 일정한 속도로 예인된다 (Kim, 2012). 예인시스템은 종동요(pitch) 및 상하동요(heave)가 자유롭게 운동할 수 있도록 되어있으며 전후동요(surge)는 구속되어있다.

예인수조실험 수행 시 선박의 상하동요와 종동요는 구속되지 않고 자유롭게 운동을 하게 되며 가변저항을 이용한 계측장치를 통해 계측된다. 선박이 고속예인전차에 연결된 사진을 Fig. 2에 나타내었다.



Fig. 2 High speed towing system(Left), Heave measurement unit(Right)

종동요 계측장치의 경우 모형선 트림 변화에 따라 추력 방향이 바뀌어도 항상 바뀐 추력방향으로 예인력이 가해지도록 고안되었다 (Kim, 2012).

2.3 인터셉터 능동제어시스템

인터셉터 능동제어 시스템은 인터셉터 구동부와 임베디드 제

어기로 구성된다. 또한 인터셉터 구동부는 구동기인 인터셉터를 포함하여 임베디드 제어기에서 명령을 받아 회전 운동을 발생시키는 서보모터(Servo motor)와 서보모터의 회전 운동을 직선운동으로 변환시켜 인터셉터의 돌출길이를 조작해주는 랙과 피니언(rack and pinion)으로 구성된다. 모형선의 인터셉터는 실선에 부착된 인터셉터와 길이상사를 맞춰주어 제작하였다. Table 2에 실선과 모형선 인터셉터의 주요 치수를 나타내었으며 제작된 인터셉터를 모형선에 부착한 모습은 Fig. 3과 같다.

Table 2 Principal dimensions of interceptors

Item	Full scale	Model scale
Interceptor breath	300 mm	56.3 mm
Maximum Interceptor stroke	50 mm	9.4 mm

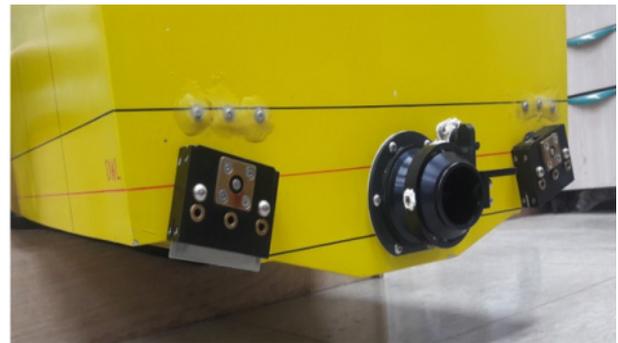


Fig. 3 Stern interceptors of model ship

인터셉터의 제어명령은 모형선에 부착된 임베디드 제어기에서 발생하며, 임베디드 제어기에서 발생한 전기 신호를 서보모터가 토크로 변환하여 회전 운동을 만들고, 랙과 피니언이 회전운동을 직선운동으로 변환시켜 인터셉터의 제어가 이뤄진다. 교정시험을 통해 임베디드 제어기의 전기 신호와 서보모터의 각도, 인터셉터 돌출길이 사이의 관계식을 알아내었으며, 이를 통해 임베디드 제어기에서 서보모터에 전기 신호를 주어 원하는 돌출길이를 인터셉터를 구동시킬 수 있도록 하였다.

임베디드 제어기는 미국의 TI(Texas Instrument)사에서 개발한 싱글보드컴퓨터(single board computer) 비글본 블랙을 이용하여 제작하였다. 임베디드 제어기는 두 개의 PWM(Pulse Width Modulation) 채널을 통하여 양측의 서보모터를 독립적으로 제어할 수 있으며 두 개의 ADC(Analog to Digital Conversion) 채널에서 가변저항 신호를 받아 자세 계측이 가능하다.

본 연구에서 임베디드 제어기는 크게 세 가지 역할을 수행한다. 첫 번째로 자세계측장치를 통해 계측된 모형선의 자세 정보를 받는다. 두 번째로 자세 정보를 되먹임하여 제어입력, 즉 인터셉터 돌출길이에 상응하는 서보모터 각도를 계산한다. 세 번째로 서보모터에 전원과 전기 신호를 주어 모터를 구동시킨다.

2.4 좌표계

좌표계의 중심은 Fig. 4에 보이는 것과 같이 길이 방향으로 배의 주행과 함께 움직이고, 수직 방향으로는 정수 중 정상상태에서 주행 자세의 질량중심에 고정되도록 설정하였다. 상방이 양수인 수직축을 z축, 후방이 양수인 수평축을 x축으로 설정하였다. 상하동요는 η_3 로 나타내고 단위는 mm를 사용하였으며, 종동요는 η_5 , 트림각은 τ 로 나타내고 단위는 모두 도(deg[°])를 사용하였다. 트림각 τ 와 종동요 η_5 는 모두 bow-up 상황에서 양수 값을 갖는다. lcg(longitudinal center of gravity)는 선미에서 질량중심까지 길이방향거리를 의미하며 h_i 는 인터셉터 돌출길이가 돌출되지 않았을 때를 0, 최대로 돌출되었을 때를 100으로 하는 돌출길이 백분율(%)을 단위로 하며 양의 값만을 갖게 된다.

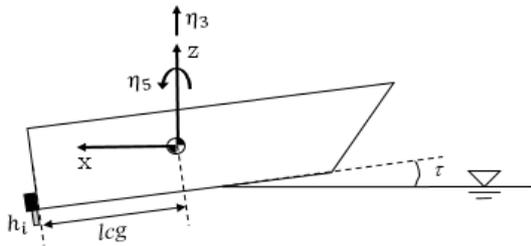


Fig. 4 Coordinates system and key symbols of planing hull

3. 시스템 식별을 위한 예인수조실험

제어 대상의 동역학 모델링을 수행하는 것은 모델기반 제어를 설계하기 위한 필수적인 작업이다. 본 연구에서는 예인수조실험 주행 입-출력 데이터를 이용한 시스템 식별법을 통해 선미 인터셉터가 포함된 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델을 식별하였다. 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델을 상하동요(heave)-종동요(pitch) 연성 2차 선형 모델로 가정하였다 (Faltinsen, 2005). 인터셉터의 제어력은 상하동요 방향과 종동요 방향 모두 돌출길이에 선형적으로 비례한다고 가정하였다 (Karimi, 2015). 이 경우 동역학 모델을 식 (3)과 같은 선형 시불변 상태 공간 방정식으로 나타낼 수 있고, 시스템 식별 문제는 시스템의 행렬 성분을 찾는 문제로 환원된다. 이때 시스템의 상태변수는 종동요 (η_5 [deg]), 종동요각속도($\dot{\eta}_5$ [deg/s]), 상하동요(η_3 [mm]), 상하동요속도($\dot{\eta}_3$ [mm/s])이며, 제어입력은 인터셉터 돌출길이(h_i [%])에 해당한다. 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \dot{\eta}_3 \\ \eta_5 \\ \dot{\eta}_5 \end{bmatrix}, \mathbf{u} = h_i \quad (1)$$

인터셉터 제어력이 포함된 상하동요-종동요 연성 2차 모델을 식 (2)에, 이를 상태 공간 방정식으로 변환시킨 선박의 종방향 동역학 모델을 식 (3)에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 \\ \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\eta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_3 + F_{3,h_i} \\ F_5 + F_{5,h_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

- m = 모형선의 질량
- K_{yy} = 모형선의 종방향 관성모멘트
- A_{ij} = j 방향 운동에 의한 i 방향 부가질량
- B_{ij} = j 방향 운동에 의한 i 방향 감쇠계수
- C_{ij} = j 방향 운동에 의한 i 방향 복원력계수
- F_i = i 방향 외력(환경하중)
- F_{i,h_i} = i 방향 선미 인터셉터 제어력

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_5 & a_6 & a_7 & a_8 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (3)$$

식 (2)에서 우변의 외력 항에 환경하중에 의한 외력을 제거한 후, 좌변의 둘째 항과 셋째 항을 우변으로 이항시키고, 양변에 좌변의 질량 성분 행렬의 역행렬을 곱하면 식 (2)를 아래의 식 (4)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 \\ \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\eta}_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{3,h_i} \\ F_{5,h_i} \end{bmatrix} \quad (4)$$

또한 식 (3)을 전개하면 식 (5)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 \\ \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 & a_4 \\ a_6 & a_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\eta}_3 \\ \dot{\eta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_5 & a_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} h_i \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 비교해보면, 식 (3)의 행렬의 각 성분이 나타내는 바는 다음 식 (6)~(8)과 같다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} a_2 & a_4 \\ a_6 & a_8 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_{33} & B_{35} \\ B_{53} & B_{55} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 \\ a_5 & a_7 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_{33} & C_{35} \\ C_{53} & C_{55} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} h_i = \begin{bmatrix} m + A_{33} & A_{35} \\ A_{53} & K_{yy} + A_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F_{3,h_i} \\ F_{5,h_i} \end{bmatrix} \quad (8)$$

시스템 식별은 대상선의 주 주항속도인 실선 기준 20knots에서 수행되었다. 이를 모형선 기준으로 프루드 상사를 시키면 4.45m/s이다. 시스템 식별을 위한 예인수조실험은 5개의 계단 입력(Step Input)조건과 10개의 정현파 입력(Sinusoidal Input)조건에서 수행되었다. 계단 입력조건 실험을 통해 모델의 정상상태 응답을 식별하고, 정현파 입력조건 실험을 통해 다양한 주파수의 제어입력에 따른 모델의 과도응답을 식별할 수 있다. 제어입력에 해당하는 값은 돌출되지 않았을 때를 0, 최대로 돌출되었을 때를 100으로 하는 인터셉터 돌출길이의 백분율(%)이며 정현파 입력에 사용된 주파수는 선박이 해상에서 운항 중 파도와 조우했을 때 발생하는 운동의 주파수 범위 내에서 선택되었다. 이 범위 내에는 운동 응답의 고유 진동수가 포함되어있다.

Table 3 Test condition for the system identification test

	Test #	Control input [%]	
	Step Input	test 1	20
test 2		40	
test 3		60	
test 4		80	
test 5		100	
	Test #	Amplitude [%]	w [rad/sec]
	test 6	40	10.41
	test 7	40	9.18
	test 8	40	8.25
	test 9	40	6.91
	test 10	40	6.00
	test 11	50	10.41
	test 12	50	9.18
	test 13	50	8.25
	test 14	50	6.91
test 15	50	6.00	

Fig. 5, 6은 시스템 식별을 위한 예인수조실험의 결과 그래프의 예시를 나타낸다.

Fig. 5, 6의 그래프에는 출력 값인 상하동요와 종동요, 입력 값인 인터셉터 돌출길이의 시계열 데이터를 나타내었다. Fig 6에는 추가적으로 등속 구간에서 종동요를 사인함수로 피팅한 결과를 나타내었다.

계측을 시작한 후 약 7초부터 예인이 시작되며, 5초간의 가속 구간을 가진 후 12초경 등속 구간에 도달하게 된다. 이후 15초부터 인터셉터 제어명령이 들어가게 되며 25초경부터 감속이 시작되어 예인을 마치게 된다. 고속예인전차가 주행 중 일정한 속도

를 정확하게 유지하지 못하기 때문에 등속 구간임에도 불구하고 출력 값에 잡음이 포함되어있다. 계단입력 조건의 실험에서는 등속 구간에서 출력 값의 평균을 실제 출력 값으로 생각하면 되지만 정현파 입력조건에서는 그럴 수 없다. 동역학 모델을 선형 모델로 가정하였기 때문에 정현파 입력을 주었을 때, 출력인 각 상태변수들은 준 정상상태에서 입력과 주파수는 같지만, 진폭과 위상이 다른 정현파로 나타나게 된다. 그러므로 푸리에 변환을 이용하면 출력 값을 Fig. 6의 두 번째 그래프와 같이 사인함수로 근사시킬 수 있다. 이처럼 계단 입력조건의 주행시험 결과는 정상상태에서의 상하동요 및 종동요의 평균, 정현파 입력조건의 주행시험 결과는 사인함수로 근사하는 방식으로 잡음을 제거하여 데이터를 이용하였다.

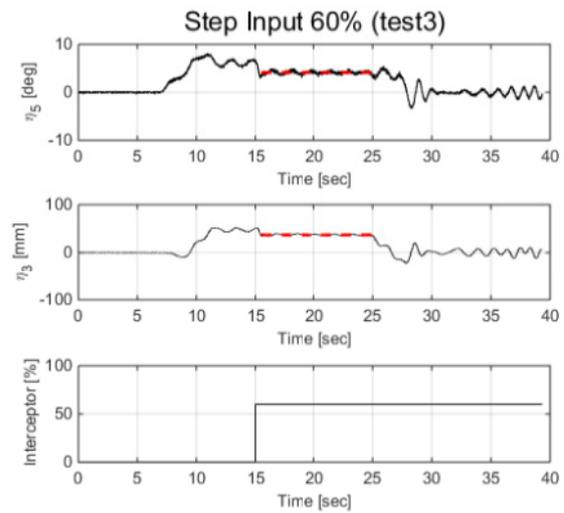


Fig. 5 Example of system identification test result (test 3)

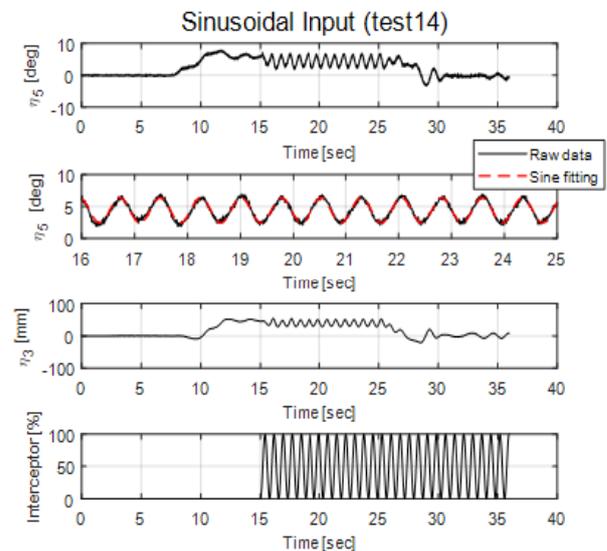


Fig. 6 Example of system identification test result (test 16)

4. 유전 알고리즘을 이용한 시스템 식별

4.1 유전 알고리즘

본 연구에서는 유전 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 동역학 모델의 시스템 식별 최적화를 수행하였다. 유전 알고리즘은 자연세계의 생물의 진화를 모방하여 다윈의 적자생존 이론을 기본 개념으로 하는 계산 모델로 John Holland (1975)에 의해 개념이 정립되었다. 유전 알고리즘은 유전자라고 일컬어지는 풀고자 하는 문제의 해를 정해진 형태의 자료구조로 표현한 다음 진화연산에 기초하여 점점 더 좋은 해를 만들어내는 일종의 전역 최적화 탐색 알고리즘이다. 유전 알고리즘을 사용하기 위해서 제일 처음 수행해야하는 일은 인위적인 진화현상을 일으킬 초기 유전자 집단을 형성하는 것이다. 이후 이 집단은 진화원리를 모방한 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전 연산에 의해 점진적으로 개선된다. 각 집단의 유전자는 더 적합하고 덜 적합한 특징을 가지고 있기 때문에 적합도 평가를 통해 적합도가 더 높은 유전자가 더 많이 선택된다. 선택된 유전자들은 다시 유전 연산을 통해 진화가 일어난 후 다음 세대의 집단을 형성하게 된다. Fig. 7의 순서도는 이와 같은 유전 알고리즘의 기본 구조를 보여주고 있다.

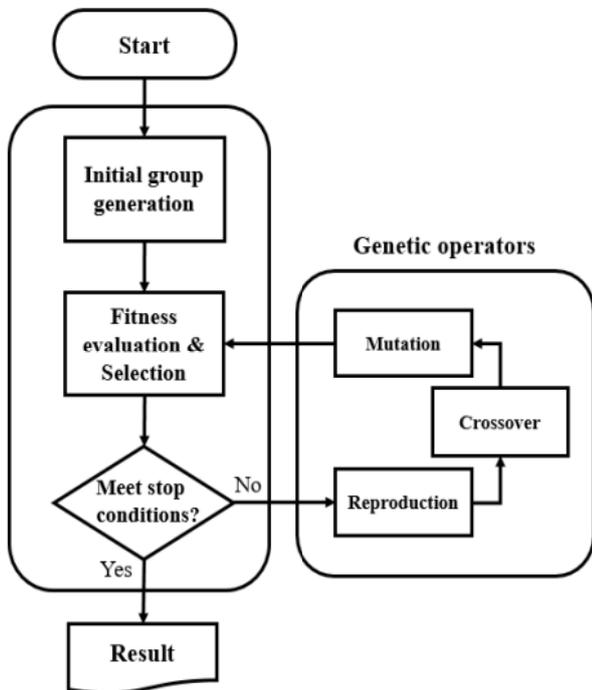


Fig. 7 Basic structure of genetic algorithm

유전 알고리즘은 자연 진화를 모방하고 있다는 사실 외에도 기존의 탐색 알고리즘과 구분되는 몇 가지 특징들을 가진다 (Goldberg, 1989).

- 문제의 파라미터를 직접 이용하는 것이 아니라 이를 적절히 기호로 표현하여 이용한다.
- 하나의 해를 다루는 것이 아니라 해 집단을 취급한다.
- 최적화를 위해 목적함수만을 필요로 하며 목적함수의 연속성, 미분가능성, 단봉성 등의 조건은 필요하지 않다.
- 최적화 결과 얻어진 해는 결정적(deterministic)이기보다는 확률적(probabilistic)이다.

이 외에도 유전 알고리즘은 변수들이 잘 설정되었을 경우 복잡하고 넓은 탐색공간에서도 강인하게 동작하며, 목적함수를 선택하는 데에 있어도 유연하다. 또한, 경험에 의존하는 휴리스틱 최적화 기법(heuristic optimization)에 속하기 때문에 경사하강법(gradient descent)과 같이 목적함수에 제약을 받지 않고 목적함수가 미분가능하지 않더라도 최적화가 가능하다는 강점이 있다. 본 연구에서도 목적함수를 상태변수에 대하여 미분하는 것이 불가능하므로 유전 알고리즘을 이용한 최적화 기법을 사용하여 동역학 모델의 최적화를 수행하였다.

4.2 최소자승법을 이용한 시스템 식별

앞선 3장에서 선미 인터셉터가 포함된 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델을 식 (3)과 같이 정의하였다. 최소자승법을 이용한 시스템 식별은 선형 모델의 행렬 성분을 추정하기 위한 예비 과정이며, 그 자체로 시스템 식별방법의 한 종류라고 할 수 있다 (Oh et al., 2012). 최소자승법을 이용하여 시스템 식별을 하면 그 과정이 비교적 단순하여 주행 입·출력 데이터만으로 쉽게 동역학 모델을 식별할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 최소자승법을 이용한 시스템 식별의 결과를 유전 알고리즘을 이용한 동역학 모델 최적화 계산의 초기 해로 설정하여 초기 해 주변에서 전역 해를 집중적으로 탐색하는 방식으로 탐색 영역과 계산시간을 단축했다.

최소자승법을 이용한 시스템 식별과정은 다음과 같다. 우선 계단입력 시스템 식별 실험결과 제어입력에 따른 정상상태에서의 트림각, 부상량은 Table 4와 같다.

Table 4 Relationship between static control input and trim, Rise of C.G

h_i [%]	0	20	40	60	80	100
τ [°]	6.05	5.24	4.59	4.05	3.56	3.03
Sinkage [mm]	47.01	43.01	40.31	37.15	34.87	32.85

상하동요와 종동요의 원점은 제어입력이 0일 때의 트림각과 부상량으로 설정하였다. 제어입력에 따른 상하동요와 종동요를 나타내면 Table 5와 같다.

Table 5 Relationship between static control input and shifted pitch, heave

h_i [%]	0	20	40	60	80	100
η_5 [°]	0	-0.81	-1.35	-1.92	-2.52	-3.09
η_3 [mm]	0	-4.00	-6.69	-9.86	-12.14	-14.16

Table 5를 보면 정적 제어입력과 종동요, 상하동요의 증가폭은 어느 정도 선형적으로 비례하는 관계를 보이므로 이들의 선형성을 가정하여 식 (9)와 같이 최소제곱해를 갖는 상수 ϕ_1 과 ϕ_2 값을 구할 수 있다. 식 (9)에서 아래 첨자 $_{,ss}$ 는 정상 상태 (steady-state)를 의미한다.(Sonnenburg & Woolsey, 2013)

$$\begin{aligned} h_{i,ss} &= \phi_1 \eta_{5,ss} \\ \eta_{3,ss} &= \phi_2 \eta_{5,ss} \end{aligned} \quad (9)$$

식별하고자 하는 동역학 모델인 식 (3)의 정상상태를 가정하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} b_1 h_{i,ss} &= -a_1 \eta_{3,ss} - a_3 \eta_{5,ss} \\ b_2 h_{i,ss} &= -a_5 \eta_{3,ss} - a_7 \eta_{5,ss} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)를 식 (10)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} b_1 &= -a_1 \phi_2 / \phi_1 - a_3 / \phi_1 \\ b_2 &= -a_5 \phi_2 / \phi_1 - a_7 / \phi_1 \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (3) 동역학 모델에 대입하고 정현파 입력 예인수 조실험 주행 데이터를 이용하여 최소자승법을 이용해 시스템 식별을 수행한다. 예인수조실험의 입·출력 데이터는 열벡터로 표현되며, 아래 식 (12)~(13)에 굵게 나타내어 스칼라 성분들과 구분되는 벡터임을 표시하였다. 시스템 식별결과 아래와 같이 최소제곱해를 갖는 동역학 모델의 행렬 성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 \\ \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_3 - \frac{h_i \phi_2}{\phi_1}, \dot{\eta}_3, \eta_5 - \frac{h_i}{\phi_1}, \dot{\eta}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 & a_5 \\ a_2 & a_6 \\ a_3 & a_7 \\ a_4 & a_8 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_5 \\ a_2 & a_6 \\ a_3 & a_7 \\ a_4 & a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_3 - \frac{h_i \phi_2}{\phi_1}, \dot{\eta}_3, \eta_5 - \frac{h_i}{\phi_1}, \dot{\eta}_5 \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \ddot{\eta}_3 & \ddot{\eta}_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

최소자승법을 이용한 시스템 식별 수행결과 동역학 모델의 행렬 성분은 아래 Table 6과 같이 계산된다.

Table 6 Components of dynamic model matrix (result of system identification using Least square method)

Component	Value	Component	Value
a_1	11.155	a_6	-1.292
a_2	-7.591	a_7	-10.10
a_3	46.076	a_8	-0.576
a_4	77.048	b_1	3.208
a_5	-3.716	b_2	-0.881

4.3 유전 알고리즘을 이용한 시스템 식별

최소자승법을 이용한 시스템 식별법은 주행시험 입·출력 데이터를 이용하여 간단하게 동역학 모델을 식별할 수 있다는 장점이 있지만, 최적의 시스템 식별방법은 아니다. 그 이유를 고찰해보면 다음과 같다.

식 (13)을 통해 구해지는 동역학 모델의 행렬 성분 $a_1 \sim a_8$ 은 아래 식 (14)를 최소화하는 값이다.

$$\sum \left[\left\{ a_1 \eta_3 + a_2 \dot{\eta}_3 + a_3 \eta_5 + a_4 \dot{\eta}_5 + b_1 h_i - \ddot{\eta}_3 \right\}^2 + \left\{ a_5 \eta_3 + a_6 \dot{\eta}_3 + a_7 \eta_5 + a_8 \dot{\eta}_5 + b_2 h_i - \ddot{\eta}_5 \right\}^2 \right] \quad (14)$$

즉, 이렇게 구한 행렬 성분은 선형 동역학 모델이 최소제곱오차를 갖게 하는 초평면(hyperplane)의 계수 값으로, 식 (5)로 표현되는 선형 운동방정식의 오차를 최소화하는 시스템 식별방법이라고 할 수 있다. 만약 실제 시스템이 완전한 선형일 경우 이는 최적의 시스템 식별방법이 될 수 있으나 실제 선박의 동역학 모델에는 비선형적 요소가 포함되어있으므로 이에 해당하지 않는다. 본 연구에서는 모델을 이용한 주행 시뮬레이션 결과가 실제 주행실험 결과와 최대한 일치하는 동역학 모델을 얻기 위하여 유전 알고리즘의 최적화 기법을 이용하여 시스템 식별을 수행하였다.

본 연구에서는 Goldberg (1991)가 제안한 실수코딩 유전 알고리즘(Real-coded genetic algorithm)을 사용하여 동역학 모델의 최적화를 수행하였다. 유전자 표현형은 동역학 모델의 파라미터를 이용하여 $S = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8]$ 과같이 설정하였다.

초기 집단은 최소자승법을 통한 시스템 식별의 결과로 얻어진 행렬 성분을 변형시켜 생성하였다. 식 (13)을 통해 얻어진 각 행렬 성분에 임의로 0.5 ~ 2 사이의 값을 곱하여 70개의 초기 집단을 생성하였다. 최소자승법을 이용한 시스템 식별 결과로 얻어진 동역학 모델이 실제 시스템을 어느 정도 반영하기 때문에 이 주변에서 해를 찾음으로써 탐색에 걸리는 계산시간을 크게 단축시킬 수 있다.

적합도 평가를 위한 목적함수는 식 (15)와 같이 정의하였다. 종동요와 상하동요의 주형실험 결과와 모델 시뮬레이션 결과를 정규화시킨 후 RMS(Root Mean Square)차를 이용하여 계산하였다. 종동요에 더 가중치를 주었으며 c_1 과 c_2 는 각각 종동요와 상하동요에 대한 가중치를 의미한다. 식 (15)에서 주형실험 결과 벡터는 $_{test}$ 라는 아래 첨자를 덧붙여 나타내었고 모델 시뮬레이션 결과 벡터에는 아래 첨자를 덧붙이지 않았다.

$$Obj = \sum \left\{ c_1 \sqrt{(\eta_{5,test} - \eta_5)^2} + c_2 \sqrt{(\eta_{3,test} - \eta_3)^2} \right\} \quad (15)$$

($c_1 = 0.7, c_2 = 0.3$)

재생산은 Baker (1985)와 Whitely (1989)에 의해 제안된 선형 순위 재생산 방법을 사용하였다. 선형 순위 재생산은 다른 재생산 방법과 비교하였을 때 유전적 다양성을 중요시 하는 방식이다. 즉 탐색 성능이 조금 낮아 수렴 속도가 더디더라도 더 다양한 유전자들이 교배를 수행할 기회를 주어 지역 최적해에 수렴할 확률을 낮춘다. 선형 순위 재생산은 다음과 같이 이루어진다. 적합도 평가를 바탕으로 식 (16)과 같이 각 유전자의 선형 순위에 따른 재생산 확률을 계산한다.

$$P_r = \frac{1}{N} [p_{max} - (p_{max} - p_{min}) \frac{j-1}{N-1}] \quad (16)$$

여기서 p_{max}/N 는 적합도가 가장 높은 유전자의 선택확률이고, p_{min}/N 는 적합도가 가장 낮은 유전자의 선택확률이다. 집단의 크기가 고정된 경우 $p_{min} = 2 - p_{max} \geq 0$ 의 관계가 충족되어야 한다. p_{max} 는 1과 2 사이의 값을 가지며 이 값이 클수록 순위 간의 선택확률의 상대적 차이가 확대된다. 즉, 이 값이 유전적 다양성에 미치는 주요 변수임을 알 수 있다.

교배는 집단 내에서의 유전정보 교환을 통해 유전자의 변화가 이루어지는 과정이다. 본 연구에서는 Jin and Joo (2000)에 의해 제안된 수정단순교배 방법을 사용하였다. 수정단순교배는 이진 코딩의 일점교배를 근접하게 묘사한 교배 방식이다. 집단 내에 유전자 두 개를 임의로 선택하였으며 두 유전자가 교배를 수행할 확률은 85%로 설정하였다. 식 (17)과 같이 표현된 두 부모 유전자 S_1 과 S_2 를 통해 만들어지는 자식 유전자 S'_1 과 S'_2 는 식 (18)과 같이 나타내게 된다.

$$S_1 = [c_1^1, c_2^1, \dots, c_{n-1}^1, c_n^1, c_{n+1}^1, \dots, c_l^1] \quad (17)$$

$$S_2 = [c_1^2, c_2^2, \dots, c_{n-1}^2, c_n^2, c_{n+1}^2, \dots, c_l^2]$$

$$S'_1 = [c_1^1, c_2^1, \dots, c_{n-1}^1, d_n^1, c_{n+1}^1, \dots, c_l^1] \quad (18)$$

$$S'_2 = [c_1^2, c_2^2, \dots, c_{n-1}^2, d_n^2, c_{n+1}^2, \dots, c_l^2]$$

여기서 $d_n^1 = \lambda c_n^1 + (1-\lambda)c_n^2, d_n^2 = \lambda c_n^2 + (1-\lambda)c_n^1$ 로 계산되며 λ 는 곱인수로 $[0,1]$ 사이의 난수이다.

돌연변이는 집단 내에 새로운 유전정보를 추가해줌으로써 탐색공간을 넓혀, 해가 지역 최적해에 도달하는 것을 방지해 준다. 본 연구에서는 Janikow and Michalewicz (1991)와 Michalewicz (1996)에 의해 제안된 동적돌연변이(dynamic mutation)를 사용하였다. 돌연변이가 발생하면 유전자의 j 번째 성분 c_j 는 아래 식 (19)와 같은 계산을 통해 c'_j 와 같이 변이된다. 본 연구에서는 돌연변이 발생확률은 5%로 설정하였다.

$$c'_j = \begin{cases} c_j + y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b, & \tau = 0 \text{ 일 때} \\ c_j - y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{k}{T}\right)^b, & \tau = 1 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (19)$$

여기서 τ 는 0 또는 1의 임의의 변수이고 y 는 돌연변이 정도를 나타내는 이득, r 은 0과 1 사이의 난수, k 는 현재 세대수, T 는 알고리즘이 실행되는 최대 세대수, b 는 불균등 정도를 나타내는 변수이다. 이와 같은 돌연변이 방식은 세대수 k 가 증가함에 따라 돌연변이를 통해 변하는 크기가 작아진다. 즉 이와 같은 돌연변이 방식을 통해 초기에는 큰 공간을 탐색하다가 세대수가 증가함에 따라 지역적인 탐색이 이뤄진다.

본 연구에서는 이에 더하여 엘리트 전략(Elite strategy)을 채택하여 탐색을 수행하였다. 엘리트 전략이란 재생산과정에서 직전 세대의 최적의 유전자가 다음 세대에서 살아남지 못하고 소멸되는 것을 방지하기 위하여 적합도 평가에서 가장 적합도가 높은 것으로 판명된 유전자를 다음 세대에 그대로 전달하는 전략을 말한다. 이를 통해 유전자의 다양성은 다소 감소할 수 있으나 탐색 시간을 단축시킬 수 있다. 이 방법은 일반적으로 유전 알고리즘의 성능을 개선하는 것으로 알려져 있다 (De Jong, 1975).

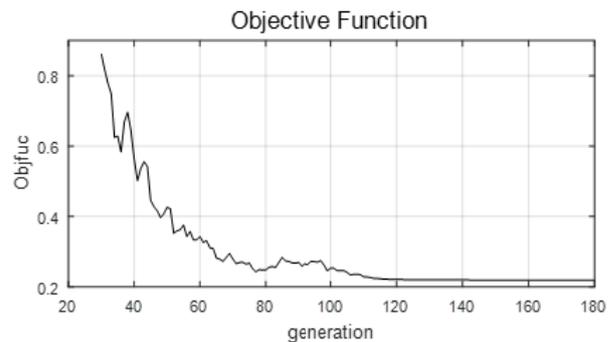


Fig. 8 Optimization result (Objective function)

본 연구에서는 한 세대당 유전자의 개수는 70개로 설정하였으며 한 세대에 동일한 유전자가 95% 이상이 되면 탐색을 종료하도록 탐색 종료 조건을 설정하였다. 10개의 정현파 입력 예인수 조실험 주형 압-출력 데이터 중 최적화를 위해 사용된 데이터는 8개의 데이터이며, 나머지 2개의 데이터는 최적화 과정에서 과적합이 일어나지 않았는지에 대한 검증에 사용되었다. 최적화를 수행한 결과는 다음과 같다. Fig. 8은 최적화 결과로 세대별 유전

자의 목적함수의 평균값을 나타내었다. 30세대 이전에는 목적함수의 평균이 너무 크게 나타나 그래프에는 30세대 이후의 값들만 나타내었다. 목적함수가 작을수록 유전자의 적합도가 높으며 약 110세대부터는 목적함수가 크게 감소하지 않는다. 즉 유전자 대부분이 최적해에 수렴하게 되었다는 것을 의미한다.

유전 알고리즘을 이용한 시스템 식별 수행결과 동역학 모델의 행렬 성분은 Table 7과 같이 계산된다.

Table 7 Components of dynamic model matrix (result of system identification using Genetic Algorithm)

Component	Value	Component	Value
a_1	57.318	a_6	-1.406
a_2	-12.088	a_7	-5.946
a_3	85.186	a_8	-0.333
a_4	133.987	b_1	11.393
a_5	-4.002	b_2	-0.795

두 시스템 식별방법을 통해 얻은 동역학 모델의 결과를 비교하면 다음과 같다. 우선 계단 입력에 대한 결과를 비교해보면 아래 Table 8과 같다.

Table 8 System Identification result (Step Input, trim angle & sinkage)

h_i [%]	Experiment		Least square		Genetic Algorithm	
	τ [°]	Sinkage [mm]	τ [°]	Sinkage [mm]	τ [°]	Sinkage [mm]
0	6.05	47.01	6.05	47.01	6.05	47.01
20	5.24	43.01	5.48	43.81	5.33	44.11
40	4.59	40.31	4.86	40.74	4.60	41.21
60	4.05	37.15	4.24	37.70	3.88	38.31
80	3.56	34.87	3.60	34.68	3.16	35.40
100	3.03	32.85	2.97	31.65	2.43	32.50

계단 입력에 대한 실험결과와 모델 시뮬레이션 결과 사이의 오차는 모델의 구조에서 기인한다. 본 연구에서는 선형 동역학 모델을 가정하여 상하동요와 종동요에 작용하는 제어력이 모두 돌출 길이에 선형적으로 비례한다고 가정하였다. Table 8을 보면 선형적으로 증가하는 제어입력에 대해 실제 실험결과는 트림각과 부상량의 감소폭이 일정하지 않으나, 모델 시뮬레이션 결과 트림각과 부상량 모두 선형적으로 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다.

정현파 입력에 대해서는 각 모델별로 8개의 실험데이터를 최적화에 사용하였으며 2개의 실험데이터를 검증에 사용하였다. Table 3에서 test6, test7, test9, test10, test11, test12, test14, test15는 최적화를 위해 사용되었고 test8, test13은 검증에 사용되었다. Fig. 9는 정현파 입력 실험결과와 각 모델별 시뮬레이션 결과 예시를 보여준다.

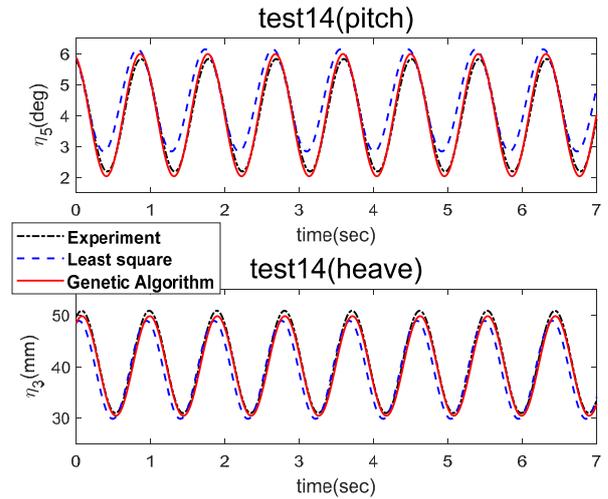


Fig. 9 Example of system identification result (Sinusoidal input, test 14)

두 모델에 대해 각 실험데이터 별로 목적함수를 계산한 결과를 Table 9에 나타내었다. 목적함수는 식 (15)를 통해 계산된다.

Table 9 System identification result (Sinusoidal input, objective function)

Set	Test #	Least square	Genetic Algorithm
optimization set	test 6	0.0892	0.0221
	test 7	0.0549	0.0191
	test 9	0.0819	0.0187
	test 10	0.0920	0.0242
	test 11	0.0919	0.0115
	test 12	0.0549	0.0274
	test 14	0.1000	0.0269
	test 15	0.0816	0.0305
Validation set	test 8	0.0615	0.0207
	test 13	0.0978	0.0188
Total sum	-	0.8057	0.2199

표를 보면 유전 알고리즘을 이용해 최적화를 수행한 모델이 최소자승법을 이용해 식별한 모델보다 더 작은 목적함수를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 검증에 사용된 실험데이터 역시 모델의 결과와 주행실험 결과가 잘 일치하는 것으로 미루어 보았을 때 최적화 수행 시 과적합이 일어나지 않았음을 확인할 수 있다. 마지막으로, 학습에 사용된 데이터뿐 아니라 검증에 사용된 데이터 역시 최소자승법을 사용한 모델보다 유전 알고리즘을 통하여 최적화 시킨 모델의 목적함수가 더 작은 것으로 보았을 때, 유전 알고리즘을 통하여 식별한 동역학 모델이 최소자승법을 통하여 식별한 모델보다 더 적합한 모델이라고 할 수 있다.

5. 선미 인터셉터를 이용한 자세 제어

선미 인터셉터의 능동제어를 통해 정수 중에서 자세를 제어하는 제어기를 설계하였다. 제어의 목적은 선박이 명령한 트림각을 추종하는 것이다. 자세 제어를 통해 정수 중에서 존재하는 가벼운 외란을 상쇄시킬 수 있으며, 선박이 항해사의 가시거리나 저항 성능 등을 고려한 최적의 자세로 운항할 수 있다. 예인수조 실험의 경우 예인시스템을 통해 상하동요를 계측할 수 있으나 실선의 경우 선박의 상하동요를 계측하는 것은 어려운 일이다. 중동요와 중동요각속도의 경우 선박에 내장된 관성측정장치(Inertia Measurement Unit, IMU)를 통해 측정할 수 있으므로 본 연구에서는 실선으로의 확장을 고려하여 상하동요는 되먹임하지 않고 중동요만 되먹임하여 제어기를 설계하였다. 설계한 제어기는 고전 제어기인 PID제어기와 모델 불확실성과 외란에 강인한 비선형 강건 제어기의 일종인 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller, SMC)이다.

PID제어기의 제어 알고리즘은 식 (20)과 같다.

$$u(t) = K_p e + K_I \int_0^t e dt + K_D \dot{e} \tag{20}$$

여기서 e 는 $e = \eta_5 - \eta_{5d}$ 와 같이 정의되는 현재 중동요와 목표 트림각사이의 차이를 나타내고, K_p, K_I, K_D 는 각각 비례상수, 적분상수, 미분상수이다. 충분한 게인 튜닝(Gain tuning)을 통해 각 상수 값을 설정하여 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 3개의 목표 트림각에 대해 중동요와 제어입력의 시계열 데이터를 나타내면 그림 Fig. 10 ~ 12와 같다. 시뮬레이션 시간은 20초로 설정하였고 10초까지는 제어 명령이 들어가지 않다가 10초부터 제어를 시작하도록 설정하였다. 인터셉터 돌출길이가 길어질수록 선박에 더 큰 음의 중동요 모멘트가 발생하게 되는데, 이로 인해 인터셉터 제어입력이 클수록 주행 시 선박의 트림각은 작아지게 된다. 계단 입력 실험결과인 Table 4를 보면 이러한 경향을 확인할 수 있다. 그래프에 선박이 추종해야 할 목표 트림각을 빨간색 점선으로 나타내었다.

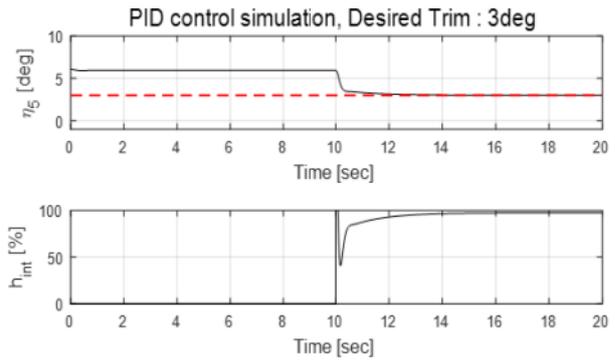


Fig. 10 PID control simulation result (Desired trim : 3 deg)

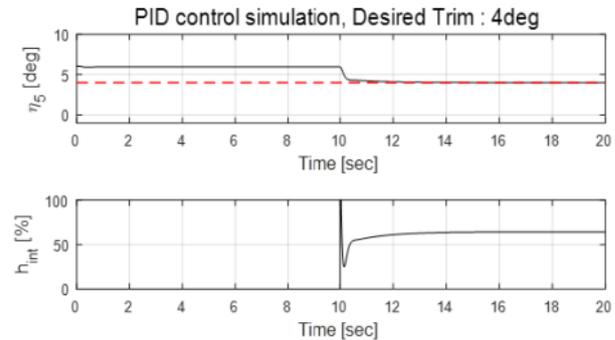


Fig. 11 PID control simulation result (Desired trim : 4 deg)

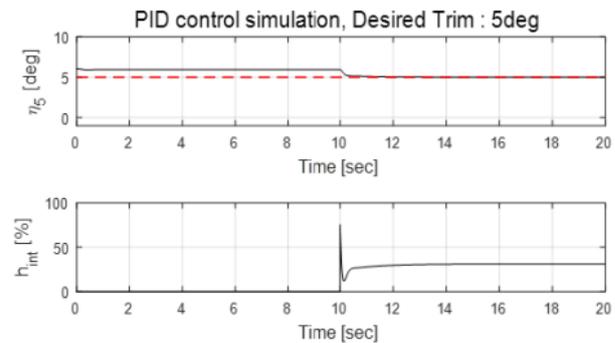


Fig. 12 PID control simulation result (Desired trim : 5 deg)

슬라이딩 모드 제어기는 모델 불확실성과 외란에 강인한 비선형 강건제어기의 일종이다. 슬라이딩 모드 제어는 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

- (1) 슬라이드 평면을 설계한다.
- (2) 시스템의 상태변수들을 슬라이딩 평면상에 위치시키는 제어입력을 생성한다.
- (3) 슬라이딩 평면상에 올라온 상태변수들이 목표 값에 수렴하게 된다.

이때, 제어입력은 상태변수들이 유한시간 내에 슬라이딩 평면에 올라올 수 있도록 만들어 주어야 하며, 상태변수들이 슬라이딩 평면에 올라오게 되면 제어기는 모델 불확실성과 외란에 둔감해지게 된다. 설계한 슬라이딩 평면은 식 (21), 슬라이딩 모드 제어기는 식 (22)와 같다.

$$s = \dot{e} + \lambda e \tag{21}$$

$$u(t) = -\frac{(a_1 + a_3\phi_1)\eta_{5d}}{b_1} + \rho \left\{ \text{sat}\left(\frac{s}{\epsilon}\right) \right\} \tag{22}$$

식 (21)의 슬라이딩 평면에서 λ 는 평면의 상수로 이 값이 클수록 슬라이딩 평면상에서 상태변수들이 더 빠르게 0으로 수렴하게 되지만 구동기에 가해지는 부담이 증가하게 된다. 제어입력에 해당하는 식 (22)를 보면 목표 트림각이 포함된 앞먹임에 해당하는 첫 번째 항과 슬라이딩 모드 제어기에서 제어입력의 부호를 변화시켜 주는 두 번째 항으로 구성된다. 두 번째 항에서 ρ 는 스위칭 이득(switching gain)으로 이 항이 클수록 상태변수들이 슬라이딩 평면에 빠르게 올라오게 되지만 채터링(chattering)이 증가하게 된다. 채터링을 감소시켜 주기 위해서 두 번째 항을 리아푸노프 안정성을 만족시키는 기존 슬라이딩 모드 제어기의 $\rho \text{sign}(s)$ 대신 $\rho \left\{ \text{sat}\left(\frac{s}{\epsilon}\right) \right\}$ 으로 변형시켰다. 여기서 ϵ 는 sat함수의 기울기를 의미한다. 설계한 제어기는 비선형 제어기이기 때문에 제어 시스템의 리아푸노프 안정성(Lyapunov stability)을 보여야 한다. 이에 대한 증명은 Khalil (2002)를 참고할 수 있다. 각 상수에 적당한 값을 대입하고 3개의 목표 트림각에 대한 주행 시뮬레이션을 수행한 결과는 아래 Fig. 13 ~ 15와 같다. 마찬가지로 그래프에 선박이 추종해야 할 목표 트림각을 빨간색 점선으로 나타내었다.

설계한 PID제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 모형선의 임베디드 제어기에 삽입하여 모형선 예인 수조실험을 수행한 결과는 다음과 같다. Fig. 16 ~ 18은 PID제어기 실험결과, Fig. 19 ~ 21은 슬라이딩 모드 제어기 실험결과를 나타낸다.

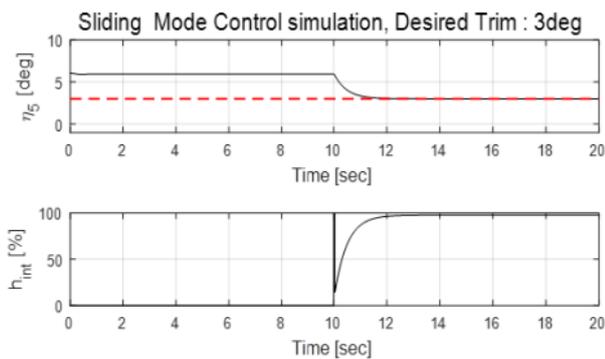


Fig. 13 Sliding mode control simulation result (Desired trim : 3deg)

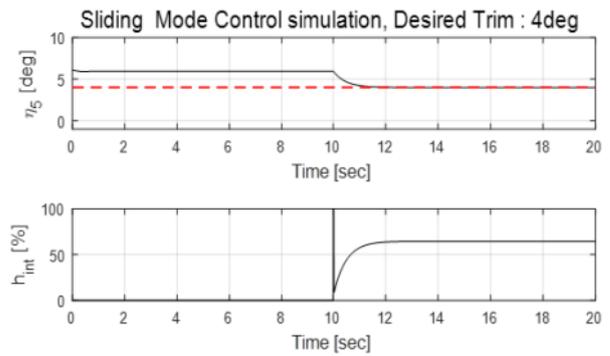


Fig. 14 Sliding mode control simulation result (Desired trim : 4deg)

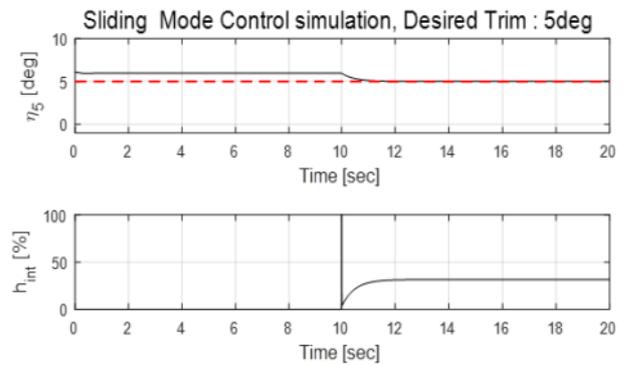


Fig. 15 Sliding mode control simulation result (Desired trim : 5deg)

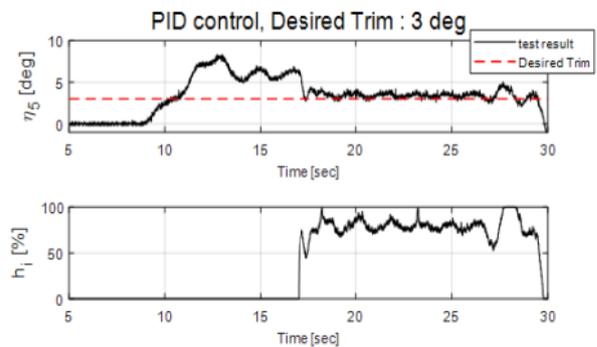


Fig. 16 PID control test result (Desired Trim : 3 deg)

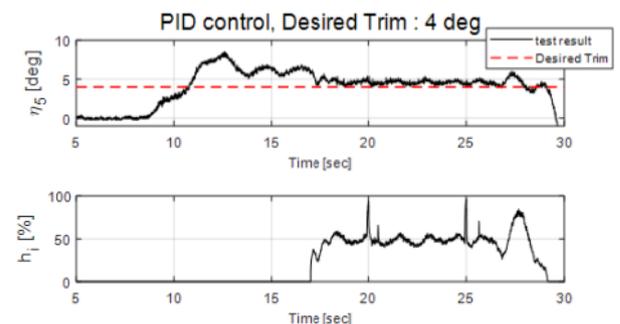


Fig. 17 PID control test result (Desired trim : 4 deg)

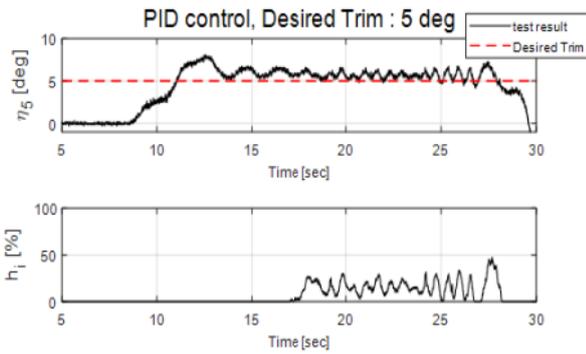


Fig. 18 PID control test result (Desired trim : 5deg)

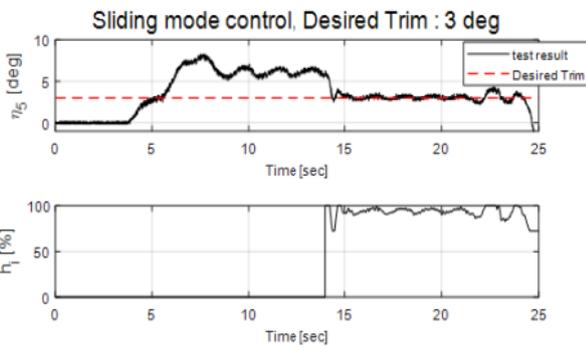


Fig. 19 Sliding mode control test result (Desired trim : 3 deg)

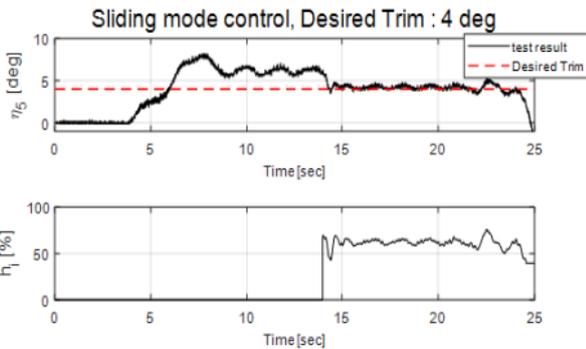


Fig. 20 Sliding mode control test result (Desired trim : 4deg)

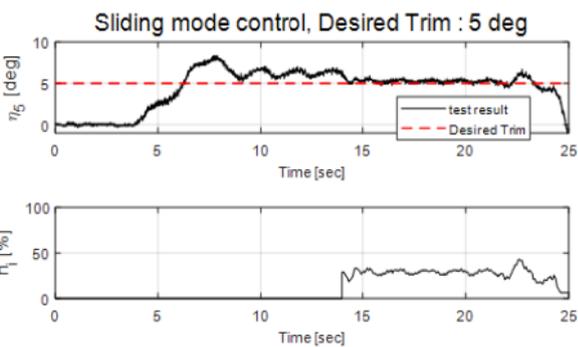


Fig. 21 Sliding Mode Control test result (Desired trim : 5deg)

예인수조실험 결과 그래프의 자세 제어를 시작하기 전(PID제어의 경우 17초 이전, 슬라이딩 모드 제어기의 경우 14초 이전) 상황을 보면 초기에 정지 상태에 있던 선박이 예인이 시작되면서 예인속도의 증가에 따라 선박의 종동요각이 점점 증가하고, 출발 후 약 5초 후에는 목표 예인속도에 도달하여 선박의 자세 역시 정상상태를 유지해야 하지만, 예인 과정에서 예인전차가 일정한 속도로 예인을 하지 못해 선박의 자세가 일정치 못하고 약간의 진동이 포함되어있는 것을 확인할 수 있다. 이는 선박에 작용하는 외란으로 생각할 수 있다.

자세 제어를 시작하게 되면 슬라이딩 모드 제어기를 이용해서 자세를 제어했을 때 PID 제어기를 사용했을 때보다 정상상태 오차가 적고, 예인 과정에서 발생하는 외란에 대한 상쇄 효과가 큰 것을 확인할 수 있다. Table 10에 두 제어기의 목표 트림각 별로 정상상태 트림각과 목표 트림각과의 오차를 나타내었다. 두 제어기 모두 모든 목표 트림각에 대해서 정상상태 트림각이 목표 트림각보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. PID제어기가 슬라이딩 모드 제어기에 비해 정상상태 오차가 더 크게 나타나는데, 두 제어기의 제어입력의 크기를 비교해보면 모든 목표 트림각에 대해 PID제어기의 제어입력이 슬라이딩 모드 제어기의 제어입력에 비해 작게 나타난다. 즉 PID제어기의 경우 충분한 제어입력을 만들어내지 못하고 있으며 이로 인해 슬라이딩 모드 제어기에 비해 정상상태 오차가 크게 나타난다.

Table 10 Steady-state trim angle for each controller

Desired trim angle	PID		SMC	
	τ	error	τ	error
3°	3.34°	11.3%	3.06°	2.0%
4°	4.49°	12.3%	4.13°	3.3%
5°	5.56°	11.2%	5.17°	3.4%

6. 결론

본 연구에서는 능동제어가 가능한 선미 인터셉터가 포함된 활주선형 선박의 종방향 동역학 모델을 식별하였으며, 선박의 자세를 제어하는 제어기를 설계하고 예인수조실험을 통해 능동제어의 실효성을 검증하였다. 본 논문의 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 1.5 m 활주선형 모형선에 인터셉터 능동제어 시스템 구축
- 2) 예인수조실험 입·출력 데이터를 이용하여 시스템 식별 수행. 최소자승법 결과를 초기치로 이용한 유전 알고리즘을 통한 시스템 식별결과와 시스템 식별 성능이 개선됨
- 3) 식별한 모델을 이용하여 선박의 자세 제어기 설계. 자세 제어 실험 결과 슬라이딩 모드 제어기가 PID제어기에 비해 외란을 잘 상쇄시키며 정상상태 제어성능 또한 우수하게 나타남

본 연구의 후속으로 다음과 같은 연구를 제안한다.

- 1) 관측기 설계 또는 출력되먹임 제어기 설계를 통한 상하동요를 고려한 자세 제어기 설계
- 2) 파 강제력 유체력 모델링 후 동역학 모델에 추가하여 파랑 중 운동 응답을 최소화 시키는 제어기 설계
- 3) 자유항주시험을 통한 선회 중 횡동요 및 선회직경 제어 등과 같은 다양한 목적의 인터셉터 능동제어에 관한 연구

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가R&D사업 "다목적 지능형 무인선 국산화 개발(8/8)"(MS3750)과 국방과학연구소 위탁과제인 '고속 활주선 동특성 해석기술 연구'의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Baker, J.E., 1985. Adaptive selection methods for genetic algorithms. *Proceeding of 1st International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications*, Pittsburgh, United States of America, 24–26 July 1985.
- De Jong, K.A., 1975. *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. Engineering Doctoral Dissertation. The University of Michigan Ann Arbor.
- Ertogan, M., Wilson, P.A., Tayyar, G.T., & Ertugrul, S. 2017. Optimal trim control of a high-speed craft by trim tabs/interceptors Part I: Pitch and surge coupled dynamic modelling using sea trial data. *Ocean Engineering*, 130, pp.300–309.
- Faltinsen, O.M., 2005. *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Co. Inc.: Boston.
- Goldberg, D.E., 1991. Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets, and blocking. *Complex Systems*, 5, pp.139–167.
- Holland, J.H., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan Press: Michigan.
- Janikow, C.Z. & Michalewicz, Z., 1991. An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms. *Proceeding of 4th International Conference on Genetic Algorithms*, San Diego, United States of America, 13–16 July 1991.
- Jin, G.G. & Joo, S.R., 2000. A study on a real-coded genetic algorithm. *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, 6(4), pp.268–275.
- Karimi, M.H., Seif, M.S. & Abbaspoor, M., 2015. A study on vertical motions of high-speed planing boats with automatically controlled stern interceptors in calm water and head waves. *Ships and Offshore Structure*, 10(3) pp.335–348.
- Khalil, H.K., 2002. *Nonlinear systems*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Kim, D.J., Park, J.Y., Lee, J.H., Go, J.Y., & Rhee, K.P., 2011. Effects of trim tabs on running attitude and resistance performance of a water-jet propelled high speed vessel. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK*, Mokpo, Republic of Korea, 3–4 November 2011.
- Kim, D.J., 2012. *A study on the running attitude and dynamic stability of a semi-displacement round bilge vessel at high speed*. Engineering Doctoral Dissertation, Seoul National University.
- Luca, F.D. & Pensa, C., 2012. Experimental investigation on conventional and unconventional interceptors. *International Journal of Small Craft Technology Part B of The Royal Institution of Naval Architects transactions technical papers*, 153, pp.B65–B72.
- Mansila, R.M., Aranda, J., Diaz, J.M. & Cruz, J., 2009. Parametric model identification of high-speed craft dynamics. *Ocean Engineering*, 36(12), pp.1025–1038, 2009.
- Michalewicz, Z., 1996. *Genetic algorithms + data structures = evolution Programs*. Springer-Verlag: Berlin.
- Molini, A. Brizzolara, S., 2005. Hydrodynamics of interceptors: a fundamental study. *International Conference on Marine Research and Transportation*, Naples, Italy, 19–21 September 2005.
- Oh, K.T., Park, C.W., Kim, M.G., Park, J.H. & Kim, Y.D., 2012. Small UAV system identification in time domain. *Korean Conference on Aeronautical And Space Sciences*, Gangwon, Republic of Korea, 11–13 April, 2012.
- Rijkens, A.A.K., Keuning, J.A. & Huijsmans, R.H.M.. 2011. A computational tool for the design of ride control systems for fast planing vessels.

International Shipbuilding Progress, 58(4), pp.165-190.

Seo, K.C., Copakumar, N. & Atlar, M., 2013. Experimental investigation of dynamic trim control devices in fast speed vessel. *Journal of Korean Institute of Navigation and Port Research*, 37(2), pp.137-142.

Sonnenburg, C.R. & Woolsey, C.A., 2013. Modeling, identification, and control of an unmanned surface vehicle. *Journal of Field Robotics*, 30(3), pp.371-398, 2013.

Wang, L.W., 1985. A study on motions of high speed planing boats with controllable flaps in regular waves. *International Shipbuilding Progress*, 32(365), pp.6-23.

Whitley, D., 1989. The genitor algorithm and selection pressure: why rank-based allocation of reproductive trials is best. *Proceeding of 3rd International Conference on Genetic Algorithms and Their*

Applications, Arlington, United States of America, 1989.

