

해상시험 결과를 이용한 RIB의 4자유도 동력학 식별 (I) - 해상시험, 저항·추진 모델

윤현규^{1,†}·윤근항²·박인홍³
창원대학교 조선해양공학과¹
한국해양연구원 해양시스템안전연구소²
(주)지엠비 기술연구소³

Identification of Four-DOF Dynamics of a RIB using Sea Trial Tests (I) - Sea Trial Test, Resistance and Propulsion Model

Hyeon Kyu Yoon^{1,†}·Kunhang Yun²·In-Hong Park³
Department of Naval Architecture & Marine Engineering, Changwon National University¹
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI²
GMB Inc.³

Abstract

RIB(Rigid Inflatable Boat) is widely used for coastal transportation in the commercial use and for ISR(Intelligence, Surveillance, Reconnaissance) in the military use. Since RIB is around 10 meters in length and over 30 knots in speed, its motion characteristics in waves is quite different from a large scale ship. When it turns, large roll occurs and heeling direction is opposite to the large ship's case. Currently, many countries are developing USV(Unmanned Surface Vehicle) of which type is RIB. In order to develop high performance autopilot and way point controller, it is very important to identify RIB's motion characteristics. In this paper, sea trial test results of a 7-meter RIB such as speed, turning, zig-zag, and way point control tests were represented and its resistance and propulsion model was identified by using sea trial data and Savitsky's formula. In addition, the state space model which will be used in the identification of the four-degree-of-freedom dynamics in the next step was formulated and the identification procedure was proposed.

Keywords : RIB(고형부력선), Unmanned Surface Vehicle(무인선), Sea Trial Test(해상시험), System Identification(시스템 식별), Ship Dynamics(선박동력학)

1. 서론

RIB(Rigid Inflatable Boat)는 뛰어난 복원성을 보장하기 위하여 테두리에 고무 튜브를 장착하고, 선체는 강화형 플라스틱의 경량 소재로 만들어진 소형 선박이다. RIB는 용도에 따라 다양하게 구성할 수 있고, 제작이 용이하면서도 운항성능이 뛰어나므로 현재 들어 민간 또는 군용으로 널리 사용되고 있다. RIB의 추진장치로는 인보드 디젤 엔진과 워터제트, 지펠러(Z-peller) 또는 아웃보드 추진장치 등이 사용되고, 대부분의 제품들은 단품 형태의 상용으로 개발·판매되고 있다. 따라서, RIB 형태의 선박은 연안택시, 군용 고속정, 연안 경비정, 레저보트 등의 목적에 맞도록 선체, 추진장치, 항법장치 등을 손쉽게 구입하여 제작할 수 있다.

한국해양연구원과 (주)지엠비에서는 방위사업청 민군겸용기술 개발과제인 "원격 선박통제 제어기술 개발" (Lee, et al., 2007)에서 연안경비정, 사격표적정으로 사용될 무인시제선을 개발하였

다. Yoon, et al.(2007)은 RIB형 무인선의 침로제어기 개발을 위하여 속력시험, 선회시험 결과를 이용하여 K-T 모델(Lewis, 1989) 기반 전후동요(Surge), 선수동요(Yaw)의 비연성 운동방정식을 정립하였다. Son, et al.(2009)은 무인선의 경유점 추종제어 알고리즘을 개발하여 실선 시험을 통하여 검증하였으며, Yun, et al.(2010)은 실선 시운전시 조종자의 최적 입력패턴을 분석하여 자동 침로제어기를 설계하였다. RIB와 같은 고속 활주선에 대한 정상상태 자세각, 저항, 유효마력 등의 추정식은 힘 및 모멘트 평형식에 기반하여 Savitsky(1964), Lewandowski (2004)가 경험식으로 제안하였다. Lewandowski (1997)는 활주선의 좌우동요, 횡동요, 선수동요의 3자유도 수평면 안정성 해석을 위하여 각 운동 방향의 동유체력 모델에 대한 선형 동유체력계수의 경험식과 비연성 횡동요 안정성에 대한 판별식을 제안하였다. 또한 Lewandowski (2004)는 Denny and Hubble(1991)이 수행한 활주선의 선회시험 결과를 회귀 분석하여 정상선회반경 경험식도 제안하였다.

RIB는 과도한 선회운동을 하는 경우 큰 횡동요가 동시에 발생되므로, RIB형 무인선이 선회운동을 하는 경우에도 최적의 운동 성능을 고려한 제어 알고리즘을 개발하기 위해서는 RIB의 조종운동방정식을 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 횡동요(Roll), 선수동요(Yaw)의 4자유도 동역학 모델로 구성할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 목표의 첫단계로서 4자유도 동역학 식별에 필요한 해상시험 및 유효 데이터 보정 방법과 시스템 식별법을 적용하기 위한 상태공간모델 정식화 및 모델 식별 절차를 제시하기로 한다. 또한 Savitsky (Faltinsen, 2005)가 제안한 활주선의 정상항주상태 자세각, 저항성분, 유효마력 계산식과 해상 속력시험 결과를 이용하여 저항·추진 모델 식별 결과를 제시하기로 한다.

2. 운동방정식

2.1 좌표계

RIB의 운동방정식을 정립하기 위한 좌표계는 Fig. 1과 같이 관성좌표계로 간주할 수 있는 지구고정좌표계($O-x_0y_0z_0$)와 물체고정좌표계인 RIB고정좌표계($o-xyz$)로 구성한다. 지구고정좌표계는 RIB의 위치와 자세각을 기술하는데 사용되고, RIB고정좌표계는 RIB에 작용하는 동유체력을 표현하는데 용이하기 때문에 사용한다. 본 연구에서 RIB고정좌표계의 원점은 운전석 바닥면의 전후, 좌우 중앙점으로 선정하였다. Fig. 10에서 u, v, p, r 은 각각 전후동요, 좌우동요 선형속도, 횡동요, 선수동요 각속도를 나타내고, ϕ, ψ 는 각각 횡동요각, 선수동요각을 나타낸다.

2.2 운동방정식

RIB의 4자유도 운동방정식은 Fig. 1의 RIB고정좌표계에 대하여 기술된 Newton 법칙, 각 좌표계의 운동변수들 간의 운동학적 조건식으로 구성된다.

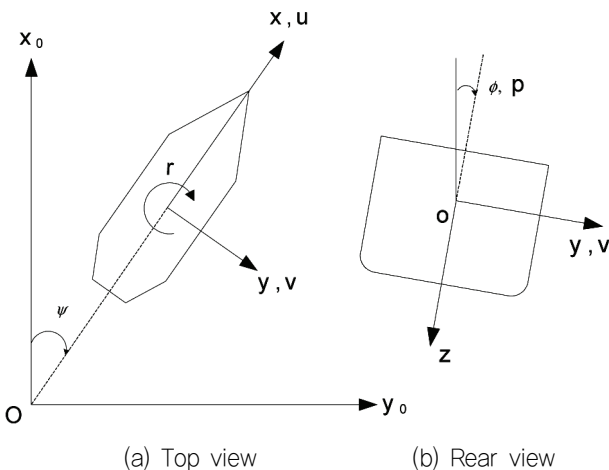


Fig. 1 Coordinate systems

$$m(\dot{u} - vr - x_G r^2 + z_G pr) = X_H + X_P$$

$$m(\dot{v} + ur - z_G \dot{p} + x_G \dot{r}) = Y_H + Y_P \quad (1)$$

$$I_x \dot{p} - m z_G (\dot{v} + ur) = K_H + K_P$$

$$I_z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) = N_H + N_P$$

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \cos \phi$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \cos \phi \quad (2)$$

$$\dot{\phi} = p$$

$$\dot{\psi} = r \cos \phi$$

식 (1), (2)에서 운동변수들 위의 ‘·’는 시간미분을 나타내고, m, I_x, I_z 는 각각 RIB질량, x, z 축에 대한 질량관성모멘트를 나타낸다. x_G, z_G 는 무게중심의 x, z 좌표값이다. 또한 RIB고정좌표계는 관성주축이고, 무게중심의 y 좌표값은 0으로 가정하였다. 하첨자, H, P 는 각각 RIB의 운동에 의한 동유체력과 워터제트에 의한 힘을 나타낸다.

2.3 동유체력미계수

식 (1)의 운동방정식 우변의 힘과 모멘트 성분은 다음과 같이 모델링한다.

$$X_H = X_{HA} + X_{HD}$$

$$Y_H = Y_{HA} + Y_{HD} \quad (3)$$

$$K_H = K_{HA} + K_{HD}$$

$$N_H = N_{HA} + N_{HD}$$

$$X_P = T \cos \delta$$

$$Y_P = T \sin \delta \quad (4)$$

$$K_P = -z_P T \sin \delta$$

$$N_P = x_P T \sin \delta$$

식 (3)으로 기술된 RIB의 운동에 의한 동유체력에서, 하첨자 HA, HD 는 각각 부가질량력, 속도관련 감쇠력 성분을 나타낸다. 각각은 동유체력미계수들로 모델링하고(Fossen, 1994), 동유체력 식별시 상관관계 해석을 통하여 상관도가 큰 계수들을 소거한 후 대표 계수로 통합하기로 한다.

식 (4)의 워터제트에 의한 힘에서 T 는 엔진 및 추계 등의 손실을 모두 고려한 최종 추력을 나타낸다. 이는 엔진 회전수의 함수가 되고, δ 는 워터제트의 변형각이다. x_P, z_P 는 RIB고정좌표계에 대한 워터제트 노즐 분사구의 x, z 좌표값이다.

3. 동유체력 모델 식별

3.1 식별 절차

식 (1)의 우변에 포함된 RIB의 운동에 의한 동유체력과 워터제트에 의한 힘은 모델링 전 추정기법(Estimation Before Modeling method)(Yoon, 2001, 2003, 2004)의 1단계에서 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF)와 수정 브라이슨-프레지어 스무더(Modified Bryson-Frazier Smoother, MBFS)를 이용하여 추정한다. 2단계에서는 속력시험에서 정립된 저항·추진 모델, 선형 동유체력 성분을 제외한 나머지 성분들에 대하여 상관관계 해석을 수행하여 모델 구조를 정립한 후, 최종 남은 동유체력계수를 최소자승법을 이용하여 추정한다. 그 절차를 Fig. 2에 도시하였다.

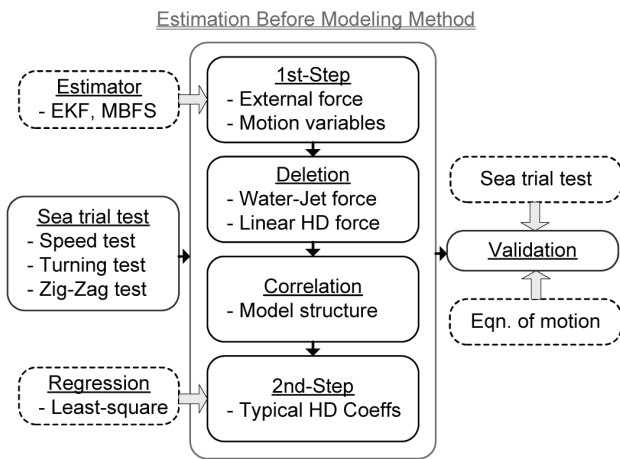


Fig. 2 Procedure for identification of hydrodynamic model

3.2 상태공간 모델

Fig. 2의 모델링 전 추정기법의 1단계에서 식 (1)의 우변에 기술된 외력항을 추정하기 위해서는 식 (1), (2)에 포함된 변수들로 다음과 같이 상태변수를 선정하고, 상태방정식과 측정방정식으로 구성되는 상태공간모형을 구성하여야 한다.

$$\underline{x} = [u \ v \ p \ r \ x \ y \ \phi \ \psi]^T \quad (5)$$

상태방정식은 식 (1), (2)의 운동방정식과 운동학적 조건식이 된다. 측정방정식은 다음 장에 기술할 RIB의 해상시험시에 적용한 계측센서 출력값을 식 (5)의 상태 변수로 구성된 함수식으로 나타낸 것이며 다음 식과 같다.

$$\underline{z} = [p \ r \ \phi \ \psi \ x \ y \ V \ \psi_t]^T \quad (6)$$

여기서, $V = \sqrt{u^2 + v^2}$,
 $\psi_t = \psi + v/u$

V, ψ_t 는 각각 합속력, 항로각을 나타낸다. 각각의 변수들을 계측하는 센서들에 대해서는 다음 장에 기술하기로 한다.

4. 해상시험

4.1 대상 RIB

Table 1에는 해상시험을 실시한 대상 RIB(Fig. 3 참조)에 대한 주요 제원을 나타내었다. 대상 RIB에는 볼보 인보드 디젤 엔진, 해밀턴사의 워터제트, 자동식별장치, 위성 및 자상파통신장치, dGPS, 항해레이더 등이 탑재되어 있다(Lee, et al., 2007).

4.2 시험 장치

식 (1)로 기술된 RIB의 운동방정식에 포함된 동유체력을 식별하기 위해서는 식 (4), (6)에 포함된 워터제트 노즐 변형각, 엔진 회전수, 운동변수들을

Table 1 Principal dimensions of the RIB

Item	Value
Displacement	2.6 ton
Length	7.80 m(Rigid hull only), 7.90 m(Tube included)
Breadth	2.50 m(Rigid hull only), 3.25 m(Tube included) 2.25 m(at chine)
Draft	0.44 m(at stern)
LCG	2.40 m
VCG	0.58 m
Deadrise angle	22°



Fig. 3 RIB for unmanned surface vehicle

계측하여야 한다. Fig. 4에는 엔진 회전수, 노즐 변형각 및 운동변수 계측을 위한 시험장치 구성도를 도시하였다.

Fig. 4에서 계측센서의 출력값을 샘플링 하고 저장하기 위하여 어드벤처사의 PPC-123T 패널 컴퓨터를 사용하였고, 엔진 카운트, 워터젯 노즐각 신호 수집을 위하여 저가 NI USB 다가능 신호수집모듈을 적용하였다. 운동계측센서로는 횡동요, 선수동요 각속도, 횡동요각을 계측하기 위하여 xBow사의 VG400 수직자이로, 자복 침로각을 계측하기 위하여 MicroStrain사의 3DM-GX1, 정밀 위치, 대지속도, 항로각 계측을 위하여 RTK dGPS를 사용하였다(Lee, et al., 2007).

4.3 시험 항목 및 결과

해상시험 항목은 RIB의 운항성능 분석 및 동력학 식별을 위하여 속력시험 및 선회·지그재그시험으로 구성된 조종시험과 무인선으로서의 기본 임무인 경유점 추종제어시험을 수행하였다. 해상시험은 2008년 7월 28일 부산 광안리 앞바다에서 수행하였다.

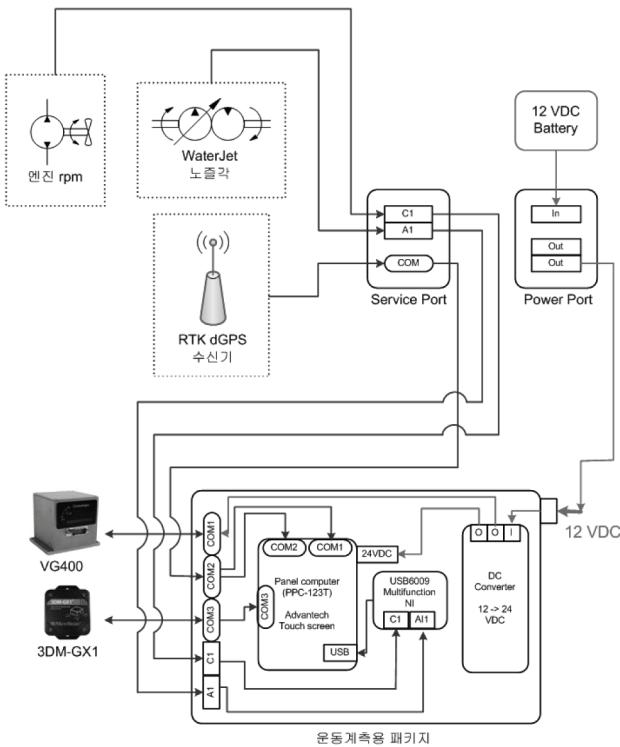


Fig. 4 Configuration of measuring devices for control inputs and motion variables

Fig. 5~6에는 속력시험시의 시간별 궤적, 엔진 회전수 카운트, 대지 속력을 도시하였고, Fig. 7~8에는 조종시험시의 시간별 궤적, 노즐각을 도시하였다. Fig. 9~10에는 동력학 식별후 검증에 사용될 경유점 추종제어시험 궤적, 횡동요각, 노즐각을 나타내었다. Fig. 5~10의 궤적은 RIB 내에 장착된 RTK dGPS 안테나 위치에서의 위·경도 각도 단위 데이터를 미터 단위로 변환한 후, RIB 고정좌표계의 원점에 대한 값으로 보정한 것이다.

Fig. 5~6의 속력시험에서는 바람, 조류 등의 영향을 보정하기 위하여 왕복시험을 수행하였으므로, 주행 방향에 따라서 속력이

다른 것을 볼 수 있다. Fig. 7~8에 도시한 조종시험은 좌우현 선회시험 및 지그재그시험 결과이고, 다음 단계 연구에서 수행할 4 자유도 동력학 식별에 적용하기 위해서 수행하였다. Fig. 9~10에 의하면 일반 선박과는 달리 RIB가 좌현 선회하면 횡동요도 좌현 방향으로 발생하여 뱅크 선회를 하는 것을 알 수 있다. Fig. 8, 10에서 노즐각 부호는 RIB가 우현 선회 할 때에 양수가 되도록 설정하였다.

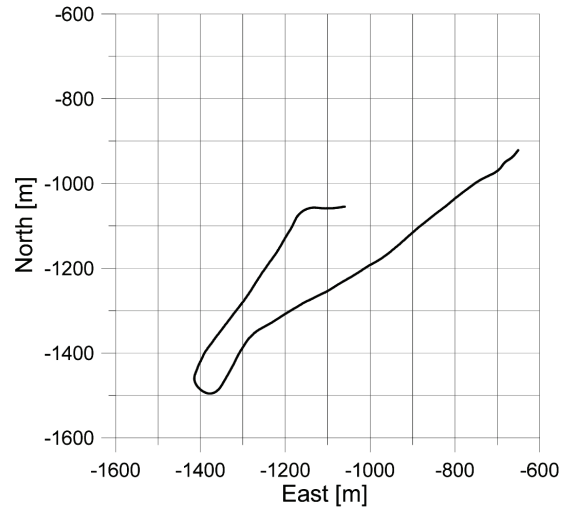


Fig. 5 Trajectory of speed test

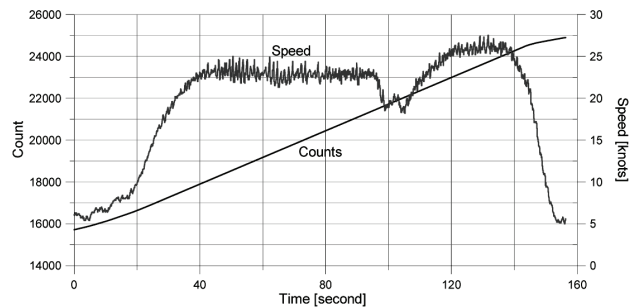


Fig. 6 Speed and engine rpm count in speed test

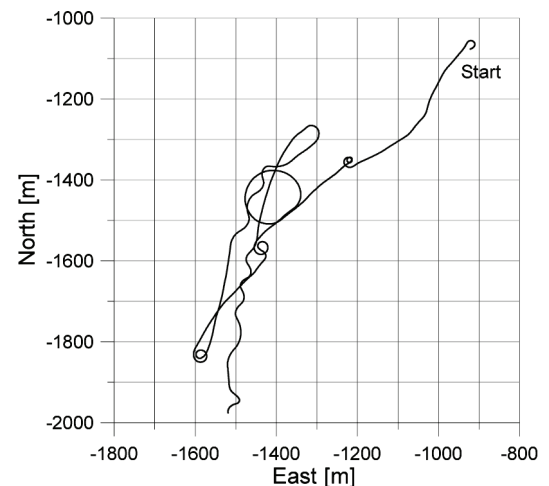


Fig. 7 Trajectory of maneuvering test

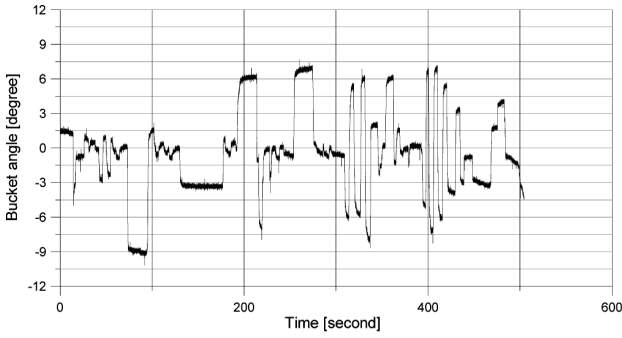


Fig. 8 Nozzle angle in maneuvering test

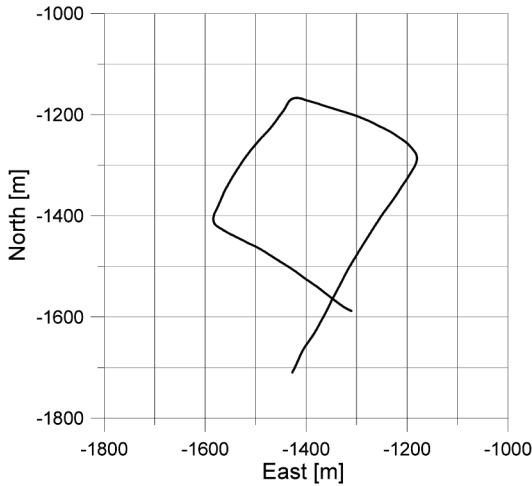


Fig. 9 Trajectory of waypoint control test

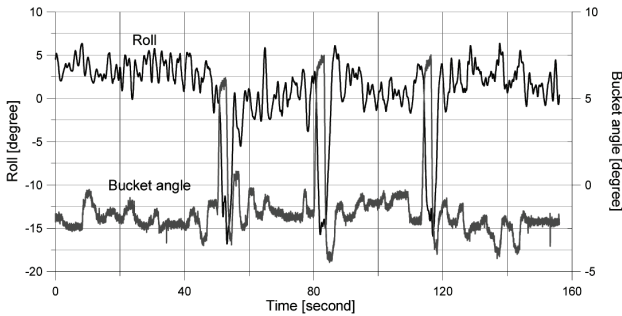


Fig. 10 Roll and nozzle angle in waypoint control test

4.4 시험 데이터 보정

RIB가 파랑 중 항주할 때는 종방향으로 큰 충격을 받을 수 있고, 해상시험시 센서와 샘플링 전산기 간 통신 등의 문제 때문에 계측값들에는 무의미값(Outlier)이 존재할 수 있다(Fig. 11(a)). 무의미값은 각 계측값들에 대하여 가능한 최대 변화값 Δx_{max} 를 지정하여 다음식으로 제거하였다.

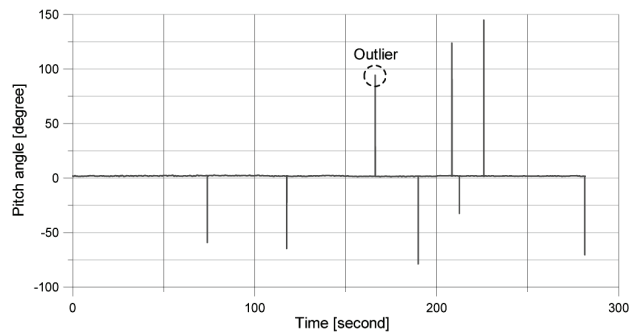
$$|x_i - x_{i-1}| > \Delta x_{max} \quad (7)$$

여기서, x_i 는 i 번째 샘플링 시간에서의 계측값이다. Fig. 11(b)에

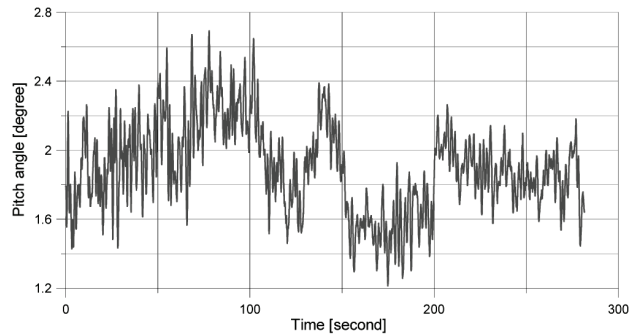
무의미값이 제거된 샘플링 데이터를 도시하였다.

RIB의 조종운동시 발생하는 편류각 및 RTK dGPS 안테나 위치에 대한 궤적을 원점으로 변환하기 위해서는 진북값에 대한 침로각 정보가 필요하다. Fig. 4에 도시한 3DM-GX1은 침로각을 마그네토미터로 계측하므로, 진북값이 아닌 자북값이 되고, 이를 진북값으로 보정해주어야 한다.

RIB가 일정 항로로 직진하는 경우에 RTK dGPS에 의한 항로각과 3DM-GX1에 의한 자북값 차이는 시험해역 내에서는 일정하다. 따라서 Fig. 5의 속력시험시에 계측된 값들을 이용하여 시험해역에서의 진북값과 자북값 차이를 추정하면 -12.464° 로 계산된다. Fig. 12(a), (b)에는 각각 자북에 대한 침로각과 항로각, 진북에 대한 값으로 보정한 후의 침로각과 항로각을 도시하였다.



(a) Before deleting outliers



(b) After deleting outliers

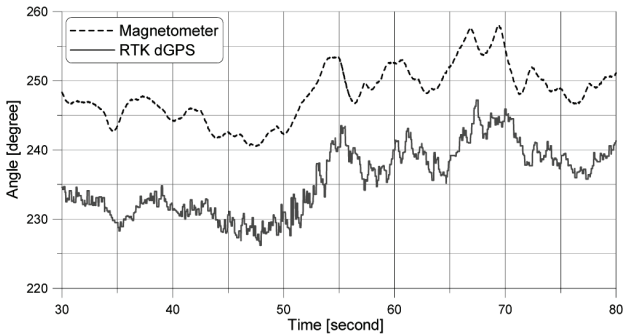
Fig. 11 Pitch angle measured by VG400

식 (1)의 운동방정식은 Fig. 1의 RIB고정좌표계에 대하여 기술되었다. 따라서 RTK dGPS 안테나 위치에 대한 궤적값을 RIB고정좌표계의 원점에 대한 값으로 다음식을 이용하여 변환한다.

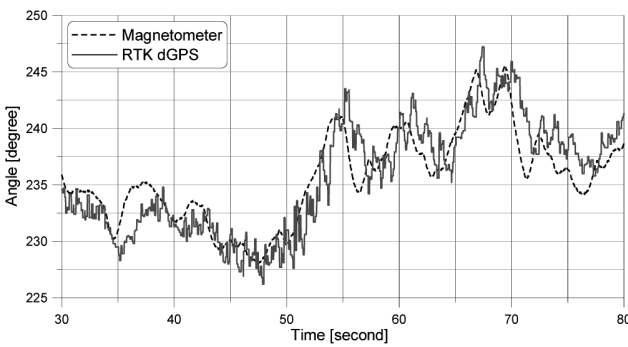
$$\underline{R}_O = \underline{R}_A - C_b^m \underline{r}_A \quad (8)$$

여기서, \underline{R}_O , \underline{R}_A , \underline{r}_A 는 각각 지구고정좌표계에 대한 RIB 원점과 안테나 위치벡터, RIB고정좌표계에 대한 안테나 위치벡터이다. C_b^m 은 RIB의 자세각으로 표현되는 RIB고정좌표계에서 공간고정좌표계로 변환하는 321 Euler 변환행렬이다.

Fig. 13에는 선회시험시 계측된 안테나 궤적을 식 (8)로 계산된 RIB고정좌표계의 원점 궤적과 비교하여 도시하였다. RIB의 선회 반경은 뱅크 선회에 의해 매우 작으므로, 선미에 부착된 안테나 위치에 대한 궤적과 원점 궤적 간에는 무시할 수 없는 차이가 있음을 볼 수 있다.



(a) Before correcting magnetic north



(b) After correcting magnetic north

Fig. 12 Heading and course angles

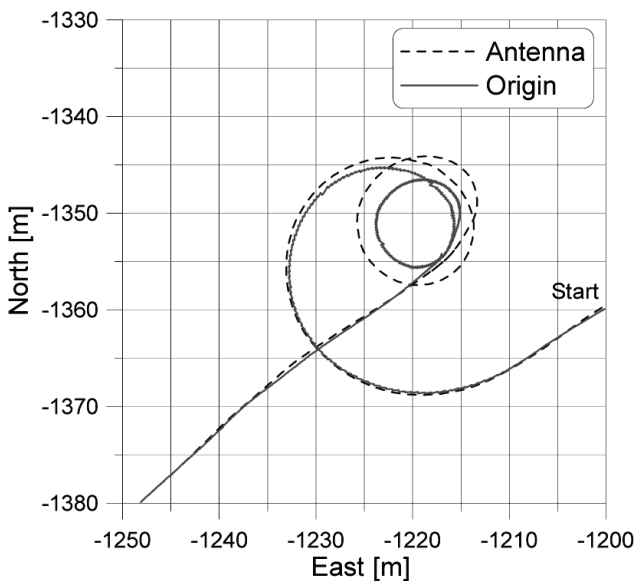


Fig. 13 Trajectories of RTK dGPS antenna and the origin of RIB-fixed coordinate

5. 저항·추진 모델 식별

RIB가 조종운동을 하지 않고 직진할 때는 식 (1)의 전후동요 방정식에서 저항·추진 성분만 남게 되고, 다음과 같이 간략하게 모델링한다.

$$R = X_{uu}u^2 \quad (9)$$

$$T = c_T n^2 \quad (10)$$

RIB의 속력시험시 정상항주상태방정식은 다음과 같이 바람에 의한 힘(X_{wind})을 고려하여 나타낼 수 있다. 여기서, u_1, u_2 는 각각 180° 의 방향 차이가 나는 속력들이다.

$$T + \frac{\rho}{2} L^2 X'_{uu} u_1^2 + X_{wind} = 0 \quad (11)$$

$$T + \frac{\rho}{2} L^2 X'_{uu} u_2^2 - X_{wind} = 0$$

식 (11)의 저항계수에 ‘’은 무차원계수를 의미한다. 식 (11)의 두 식을 더하면 바람에 의한 힘이 소거되고, 다음과 같이 추력 함수로 표현된 무차원 저항계수식을 얻을 수 있다.

$$X'_{uu} = -\frac{4T}{\rho L^2 (u_1^2 + u_2^2)} \quad (12)$$

식 (12)에서 T 는 Savitsky(1964)의 정상항주상태에서의 저항계산식을 이용하여 추정하고, u_1, u_2 는 Fig. 6의 속력시험시에 계측된 값을 적용한다. 평균 속력 24.426 knots에 대한 추력 T 는 3940.14 N로 추정되었고, u_1, u_2 에 대한 계측값은 각각 22.91, 25.94 knots이므로, X'_{uu} 는 $-7.9534E-40$ 이 된다. 끝으로 T , 속력시험시의 평균 rps를 식 (10)에 대입하면, 추력계수 c_T 는 $9.0792E-1 \text{ N/rps}^2$ 가 된다.

6. 결론

본 논문에서는 RIB의 전후동요, 좌우동요, 횡동요, 선수동요의 4자유도 동역학 식별을 위한 1단계 연구를 수행하였다. 1단계 연구에서는 전체 동역학 식별 과정의 정립, 해상시험 수행, 해상시험 결과 보정, 시운전 데이터에 기반한 저항·추진 모델 식별을 수행하였다. 저항·추진 모델은 해상시험 결과와 Savitsky(1964)의 정상항주상태에서의 고속 활주선의 저항추정식을 적용하여 식별하였다.

앞으로 수행될 2단계 연구에서는 1단계에서 가공된 해상시험

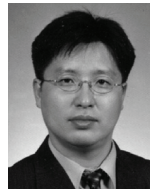
데이터와 모델링 전 추정기법(Yoon, 2003)을 적용하여 동유체력의 추정, 동시 표류현상(Hwang, 1980)을 제거한 모델 구조 정립, 동유체력미계수 추정, 추정 모델 검증을 수행하여 최종 목표인 RIB의 4자유도 동역학 모델을 식별하기로 한다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원에서 수행한 방위사업청 민군겸용기술개발사업인 “원격 선박통제 제어기술 개발” 과제와 “2009~2010년도 창원대학교 연구비” 의 지원에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

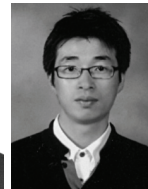
- Denny, S.B and Hubble, E.N., 1991, Prediction of Craft Turning Characteristics, *Marine Technology*, 28(1), pp.1-13.
- Faltinsen, O.M., 2005. *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press. pp.360-362.
- Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons.
- Hwang, W., 1980. *Application of System Identification to Ship Maneuvering*. Ph.D Thesis, MIT.
- Lee, C.M, et al., 2007. *Development of Control Systems for Remote-Controlled Vessel - Application Research Phase*, BSPN00940- 76-2, MOERI, KORDI.
- Lewandowski, E.M., 2004. *The Dynamics of Marine Craft*, World Scientific, pp.361-396.
- Lewandowski, E.M., 1997. Transverse Dynamic Stability of Planing Craft, *Marine Technology*, 34(2), pp.109-118.
- Lewis, E.V., 1989. *Principles of Naval Architecture 2nd Ed, Vol. III Motions in Waves and Controllability*, SNAME, pp.207-208.
- Savitsky, D., 1964. Hydrodynamic Design of Planing Hulls, *Marine Technology*, pp.71-95.
- Son, N.S. & Yoon, H.K., 2009. Study on a Waypoint Tracking Algorithm for Unmanned Surface Vehicle (USV). *Journal of Navigation and Port Research*, 33(1), pp.35-41.
- Yoon, H.K. et al., 2007. A Simplified Horizontal Maneuvering Model of a RIB-Type Target Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), pp.572-578.
- Yoon, H.K. & Rhee, K.P., 2001. Estimation of External Forces and Current Variables in Sea Trial by Using the Estimation- Before-Modeling Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(4), pp.30-38.
- Yoon, H.K. & Rhee, K.P., 2003. Comparison of the Estimation- Before-Modeling Technique with the Parameter Estimation Method Using the Extended Kalman Filter in the Estimation of Manoeuvring Derivatives of a Ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(5), pp.43-52.
- Yoon, H.K. & Son, N.S., 2004. Estimation of Roll Related Coefficients of a Ship by Using the System Identification Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(4), pp.572-578.
- Yun, K.H, Yeo, D.J. & Yoon, H.K., 2010. Design of Course Keeping Controller for RIB-type USV Using a Pilot's Steering Pattern. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(3), pp.462-468.



윤현규



윤근항



박인홍