

선박 조종성능 평가를 위한 옥외 자유항주모형시험의 불확실성 해석

박종열¹·서정화^{2†}·이태일¹·이대한¹·박격포¹·윤현규³·이신형^{1,4}
서울대학교 조선해양공학과¹
충남대학교 선박해양공학과²
창원대학교 산업시스템 및 조선해양 융합공학부³
서울대학교 해양시스템공학연구소⁴

Uncertainty Assessment of Outdoor Free-Running Model Tests for Evaluating Ship Maneuverability

Jongyeol Park¹·Jeonghwa Seo^{2†}·Taeil Lee¹·Daehan Lee¹·Gyukpo Park¹·Hyeon Kyu Yoon³·Shin Hyung Rhee^{1,4†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University²
Department of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University³
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University⁴

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.

An outdoor free-running model test system was designed for assessing ship maneuverability with test uncertainty. The test model was a surface combatant of tumblehome hull geometry. The straight forward tests were conducted first to obtain the relationship between the propeller revolution rate and advance speed. During the outdoor tests, the propeller revolution rate to achieve a certain Froude number condition was higher than that in the indoor free-running model tests. Turning circle and zigzag tests for evaluating ship maneuverability criteria were carried out at the propeller revolution rate determined by the straight forward test results. The random and systematic standard uncertainties of maneuvering criteria were obtained by repeated tests and comparison with the indoor free-running model test results, respectively. The test uncertainty was largely dominated by the systematic standard uncertainty, while the random standard uncertainty was small with good repeatability.

Keywords : Free-running model test(자유항주모형시험), Test uncertainty(실험 불확실성), Ship maneuverability(선박 조종성능)

1. 서론

선박의 조종성능은 규정된 조종 시험을 수행하였을 때 얻어지는 조종 기준을 충족할 수 있는지의 여부로 판단된다. 이런 조종 기준은 선회, 지그재그 시험에서의 이동거리, 선수각 변화 등에서 얻어지는데, 일반적으로 선형 설계 단계에서 적합한 수학적 기법을 통해 추정되고, 시운전을 통해 확인하게 된다.

설계 단계에서 선박의 조종 성능 추정을 위해서는 주로 수학적 조종 모델을 이용한다. 조종 모델은 선박이 받는 유체력을 선체 운동 변수들의 식으로 나타낸 것으로, 대개는 다항식으로

구성된다 (Jeon et al., 2017). 이런 다항식의 계수들을 조종 미계수라 하며, 조종 미계수는 경험식이나 구속모형시험을 통해 얻는 경우가 일반적이며, (Shin et al., 2009; Ueno et al., 2009; Yoon et al., 2015) 시운전 결과를 통해서 구하기도 한다 (Yoon & Lee, 2003; Yoon et al., 2011).

앞에서 설명한 조종 모델을 이용한 전통적인 조종성능 평가 과정은 많은 수의 구속모형시험이 요구되고 조종모델의 신뢰성을 확보해야 한다는 어려움이 있다. 최근에는 모형시험 기법의 발전으로, 추진기와 방향타의 제어가 가능한 모형선을 이용해 실선에 대해 규정된 조종 시운전을 그대로 모사하는 자유항주 모형시험이 수행되기도 한다.

자유항주모형시험은 모형선-실선 상관관계를 적용한 실선 조종성능 추정에 대한 규정이 명확히 세워지지 않은 한계가 있지만, 선박의 동력학적 특성이 조종 입력에 대해 그대로 드러난다는 점에서 실험 결과의 신뢰성이 뛰어나다는 장점이 있다. 그리고 자유항주모형시험의 결과에 대해 Kalman 필터를 적용하여 조종 계수를 획득, 구속모형시험을 대체하고자 하는 연구도 활발히 수행되고 있다 (Yoon et al., 2007; Xue et al., 2020).

자유항주모형시험은 실험 환경이 잘 갖춰진 실내의 수조 시설에서 수행되는 경우가 일반적인데, 이런 실험시설을 운용할 수 있는 기관은 국내외적으로 매우 한정되어 있다. 대신 옥외의 호수 등지에서 자유항주모형시험을 수행할 수도 있는데, 바람, 파도 등의 외란을 제어할 수 없다는 문제가 항상 존재한다.

본 연구에서는 옥외 자유항주모형시험에 대해 선박 조종 성능을 추정하기 위한 방안으로서의 효용성을 평가하였다. 상세하게는 조종 관련 연구가 잘 수행된 대표 선형에 대해 옥외 자유항주 모형시험을 수행하고, 그 결과를 실내 수조의 실험 결과와 비교하여 신뢰성을 평가하는 것을 목표로 한다.

본 논문은 다음의 순서로 구성된다. 2장에서는 실험 구성을 모형, 환경, 계측 장비, 실험 조건 순으로 설명하였다. 3장에서는 옥외 자유항주모형시험에서 기대되는 불확실성 요소들을 열거하고, 이들을 정량화하기 위한 방안을 설명하였다. 4장에서는 불확실성 해석 결과와 실험 결과의 타 기관 실험과의 비교를 다뤘다. 5장은 연구 내용의 요약과 결론이다.

2. 실험 구성

2.1 실험 모형

본 연구에서 사용된 모형선은 미해군 연구처(Office of Naval Research, ONR)에서 연구목적으로 공개한 ONR Tumblehome 선형의 축소모형이다. 해당 선형은 흘수선 위로 선폭이 좁아지는 텃블홈 선형을 갖춰 복원성을 포함한 동적 특성이 일반적인 선박과 달라 조종성능과 내항성능에 대한 다양한 연구에 활용되었다 (Araki et al., 2012; Sanda et al., 2013; Sanada et al., 2019).

Fig. 1은 실험에 사용된 모형선이다. 모형선의 축척비는 1/48.93으로, 같은 선형에 대해 수행된 조종 성능 연구의 모형선 축척비와 동일하게 하여 축척 효과를 배제하였다.

모형선에는 각각 2개의 추진기와 방향타가 설치된다. 추진기의 회전수와 방향타각은 실험 중 제어할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 모형선 선미부의 사진이다. 방향타는 전가동타로, 21°/s의 속도로 회전할 수 있게 하였는데, 이는 실선 스케일에서 3.0°/s에 대응된다. 같은 축척비의 ONR Tumblehome 선형에 대한 실내 자유항주모형시험 연구가 수행되었으며, 이 때의 타 변경속도는 35°/s로 결과의 직접 비교를 위해서는 타 변경 속도에 대한 고려가 필요하다 (Sanada et al., 2019).



Fig. 1 Free-running model



Fig. 2 Arrangement of the stern of the test model

Table 1 Principal particulars of the test model

| 제 원 | Model scale | Full scale |
|-------------------------------|-------------|------------|
| Length (L) | 3.147 m | 154.0 m |
| Maximum beam of waterline (B) | 0.384 m | 18.78 m |
| Draft (T) | 0.112 m | 5.494 m |
| Displacement (Δ) | 72.6 kg | 8,507 ton |
| Propeller diameter (Dp) | 0.1066 m | 5.216 m |
| Metacentric height (GM) | 0.0422 m | 2.07 m |
| Moment of Inertia | K_{xx}/B | 0.444 |
| | K_{yy}/L | 0.25 |
| | K_{zz}/L | |

실험 모형은 배수량, 관성 반경에 대해 실선과 상사하도록 무게배치를 하였다. Table 1은 모형선과 실선의 주요 요목이다. 다만 모형선의 K_{zz}/L 은 K_{yy}/L 과 같은 값을 가질 것으로 가정하여 실제로 그 값을 계측하여 확인하지는 않았다.

2.2 실험 환경

실험은 경기도 김포시에 위치한 아라미리나에서 수행되었다. Fig. 3은 실험이 수행된 수역의 지도와 실험이 수행된 때의 환경이다. 평소에는 한강과 연결된 갑문이 닫혀 있어 조류의 영향을 최소화할 수 있었다. 실험이 수행된 수역은 200 m × 200 m 규모로, 강변에서는 최소 40 m 떨어져 있다. 수역의 수심은 6 m 내외로, 모형선 길이의 2배 정도이다.



Fig. 3 Test area in Ara Marina

실험은 풍속이 낮고 수면이 잔잔한 오전 5시부터 9시 사이에 수행되었다. 실험이 수행된 날의 평균 풍속은 수면으로부터 50 cm 높이에서 1.5 m/s 이하로 확인되었는데, 이는 계측에 사용한 풍향계의 최소 계측 가능 범위이다. 반복시험의 통일성을 위해 시나리오 시작점의 위치는 고정하여 실험을 수행하였다. Fig. 4는 실험 모형의 사진으로, 진수 후 외부 조종을 통해 실험 수역으로 이동 중에 촬영되었다.



Fig. 4 Snapshot of the free-running model moving to the test area

2.3 계측 및 제어 장비

Fig. 5는 실험에 사용된 좌표계이다. 시험 중 주요한 계측 내용은 지구고정좌표계($o-xyz$)에서 모형선의 위치, 물체고정좌표계($o_b x_b y_b z_b$)에서 선박의 자세, 추진기 회전수(n), 방향타 각도(δ)이다.

모형선의 위치는 고성능 GPS(Global Positioning System)를 이용해 계측되었다. 이는 선수/선미에 설치되는 2개의 GNSS-804L 안테나(NovAtel Inc., Calgary, Canada)와 PwrPak7D GPS 수신기(NovAtel Inc., Calgary, Canada)로 구성된다. GPS 안테나는 각각 Station 0, Station 18의 갑판 위에 설치되었다. 두 개의 GPS 안테나에서 각각 선수, 선미의 위치를 얻어 수평면 상의 위치와 선수각 ψ 를 구할 수 있다. 계측 정밀도는 0.04 m로, 본 연구에서와 같은 GPS 안테나 배치에서는 위치에 대해서는 0.056 m (0.018 L), 선수각에 대해서는 0.65°의 정밀도로 환산된다.

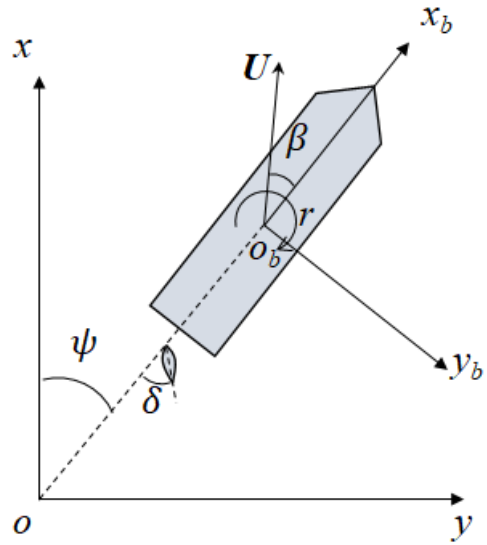


Fig. 5 Coordinate systems

선체의 횡경사, 종경사각은 MSENS-GY-485 자이로 센서(DAS, Hwaseong, Korea)를 이용해 계측하였다. 추진기 구동을 위해서는 좌우에 2개의 IG-52GM 04TYPE 감속기어(D&J WITH Co., Ltd., Seoul, Korea)를 사용하였다.

방향타의 제어는 링크지 구조와 EC 90 모터(Maxon, Obwalden, Swiss)를 이용해 좌우의 러더 각도가 동일하게 변경되도록 하였다.

모든 데이터는 LabVIEW Real-Time Module 프로그램(National Instruments, Austin, Texas)을 통해 20 Hz의 반복률로 기록되었다.

2.4 시험 조건

Table 2는 상세한 시험 조건이다. 자유항주모형시험은 n 을 고정한 상태로 수행되었다. n 의 단위는 초당 회전수(revolution per second, rps)로 나타내었다. 실험에서 n 은 직진 상태에서 선체 길이에 기반한 Froude 수($Fr = V/\sqrt{gL}$)로 0.2에 대응되는 값을 선정하였다. 여기서 V 는 모형의 전진속도, g 는 중력가속도이다. 우선 중립 타각에서 직진 시험을 통해 n 과 V 의 관계를 도출하였고, 직진 중 $Fr = 0.2$ 에 대응되는 V 를 달성하는 n 을 얻었다.

Table 2 Test condition

| Test item | Test cases |
|----------------------|---|
| Speed tests | $n = 2.5, 4.52, 6.67, 8.8, 10$ rps |
| Turning circle tests | $Fr = 0.2, \delta = 25^\circ, 35^\circ$ |
| Zigzag tests | $Fr = 0.2, \delta = 20^\circ/20^\circ$ |

조종 시험에서는 n 을 직진 시험을 통해 얻은 값으로 고정하고 δ 만 제어하였다. 선회시험에서는 δ 를 25°, 35°로 제어하였다. 선속과 선수각의 변화가 0.2°/s 미만을 유지하는 정속 항주 조건으로 0.2초를 유지한 뒤 방향타의 제어를 입력하여 선수각이 90°, 즉 두 바퀴 반 선회할 때까지 방향타각을 유지하였다. 이후 자동으로 추진기가 정지하게 하였다.

선회시험에서 얻어진 궤적과 시계열 정보는 바람 등으로 인한 표류를 감안하여 보정하였다. 선회시험에서 표류로 인한 궤적 변화는 Fig. 6과 같이 선회에 따른 일정한 변위로 나타낼 수 있으며, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 표류로 인한 궤적 변화를 보정하기 위한 외란 속도 벡터를 식 (1)과 같이 계산하였다 (IMO, 2002).

$$v_c = \frac{(x_2 - x_1, y_2 - y_1)}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

보정된 궤적(x',y')은 기존 궤적(x,y)과 외란 속도벡터를 이용하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$(x', y', t) = (x, y, t) - v_c t \quad (2)$$

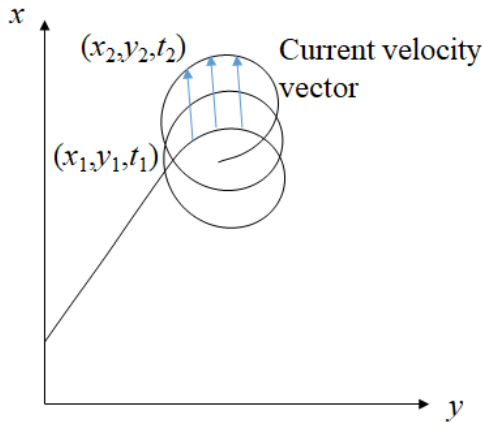


Fig. 6 Drift of the model ship by external disturbance in the turning circle test

지그재그 시험에서는 20°/20° 조건에 대해 자유항주모형시험을 수행하였다. 선회시험과 마찬가지로 정속 항주 조건에서 방향타각을 입력, 선수각이 방향타 입력각의 크기와 같아지면 반대로 방향타각을 주는 과정을 반복하였다. 지그재그 시험은 오버슈트가 세 번 발생하면 추진기를 정지하도록 하였다. 지그재그 시험에서는 주요 지표인 오버슈트가 일정한 방향의 조류, 파도, 바람 등에 영향을 받지 않는 것으로 가정하여 Fig. 6과 같은 궤적의 보정은 적용하지 않았다.

3. 옥외 자유항주모형시험의 불확실성

3.1 불확실성 해석 이론

본 장에서는 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers, ASME)의 실험 불확실성 관련 내용을 소개하고, 자유항주모형시험 조건에서의 적용 방안을 정리하였다 (ASME, 2005).

실험의 오차는 참값(true value)과의 차이로 정의된다. 다만 실험에서 참값과 오차를 알 방법은 없으므로, 실험 결과가 참값

과 통계적으로 얼마나 가까울지를 불확실성의 개념으로 나타낸다. 정확히는 실험 결과값으로부터 불확실성 범위 내에 참값이 위치할 확률이 95%가 되게끔 불확실성 값을 추산한다. 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에 따르면 불확실성을 구하는 방법은 반복 실험을 통해 구하는 Type A와 알려진 정보를 통해 구하는 Type B로 구분된다. 실제 실험 불확실성은 이 두 가지 방식을 우연오차와 고정오차의 해석에 적용하게 된다.

Fig. 7은 반복실험에서 얻을 수 있는 불확실성 요소의 구성을 나타낸다. 무한히 실험을 반복할 경우, 계측의 모평균(measurement population mean)을 구할 수 있다. 여기서 한 번의 실험 결과(measured value)와 모평균의 차이를 우연오차(random error), 모평균과 참값의 차이를 고정오차(systematic error)라고 정의한다.

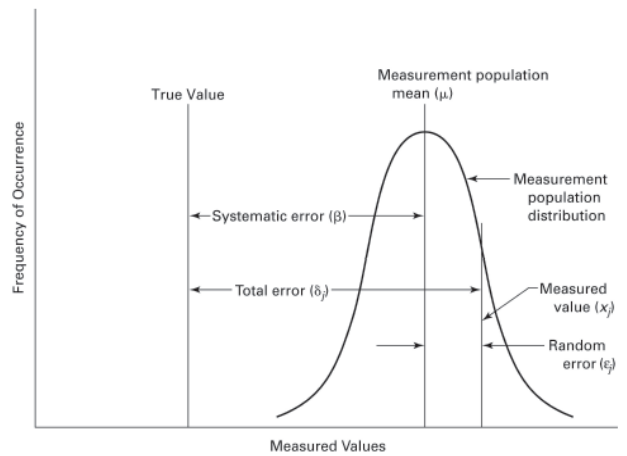


Fig. 7 Principle of test uncertainty (ASME, 2005)

우연오차는 모평균과 실험값의 차이이기 때문에 실험을 수행할 때마다 그 값이 달라지며, 같은 실험을 무한히 반복하여 모평균을 구하기 전에는 그 값을 알 수가 없다. 대신, 통계적인 처리를 통해 하나의 대푯값으로 그 크기를 나타낼 수 있는데, 이를 우연 표준 불확실성(random standard uncertainty, RSU)으로 정의한다. RSU는 얻어진 실험 값 X로부터 불확실성 범위 내에 모평균이 위치할 확률이 95%임을 의미한다.

N번의 반복 실험으로부터 표준편차 s_X 를 구하였다면, $s_{\bar{X}}$ 는 식 (3)을 이용해 구할 수 있다.

$$s_{\bar{X}} = s_X / \sqrt{N} \quad (3)$$

실험이 30회 이상 수행되었다면 정규분포로 간주할 만큼 충분히 큰 수의 샘플을 얻은 것으로 보아, $\bar{X} \pm s_{\bar{X}}$ 가 모평균을 포함할 확률이 68%라 할 수 있다. 잘 알려진 95% 신뢰구간은 $\bar{X} \pm 2s_{\bar{X}}$ 로 나타낼 수 있다. N이 커질수록 $s_{\bar{X}}$ 는 작아지기 때문에, N이 무한한 값을 갖게 된다면 \bar{X} 가 곧 모평균이 됨을 알 수 있다. 여기서 $s_{\bar{X}}$ 를 이용해 나타내는 신뢰구간이 좁아진다

는 것은 반복시험의 횟수가 늘어났을 때 모평균을 더욱 정확히 추정할 수 있다는 의미이지, 실험 데이터 자체의 표준편차가 줄어드는게 아님에 유의한다.

만약 N이 30보다 작다면 Student's t 분포를 따라 계수를 수정해야 한다. 예를 들어 실험을 4회 수행했다면 자유도 (degrees of freedom, N-1)는 30이므로 모평균에 대한 95% 신뢰구간은 $\bar{X} \pm 3.18s_{\bar{X}} = \bar{X} \pm 1.59s_X$ 가 된다.

고정 오차는 우연오차와 달리 실험 횟수를 무한히 늘려도 얻어낼 수 없다. 따라서 고정오차는 실험의 반복과 무관하게 계산된다. 일반적으로 각 센서들의 계측 해상도, 교정시험에서 기대되는 정밀도를 기반으로 추정된 고정오차 값을 이용하여 각 요소의 불확실성을 구하고, 이들이 Data reduction equation을 통해 어떻게 전파되는지에 대한 민감도 분석을 거쳐 고정 표준 불확실성(systematic standard uncertainty, SSU) $b_{\bar{X}}$ 을 구한다.

합성 표준 불확실성(combined standard uncertainty, CSU) $u_{\bar{X}}$ 은 RSU, SSU 값을 이용해 식 (4)와 같이 구하고, 자유도 개념을 적용해 95% 신뢰도의 불확실성 범위인 확장 불확실성(expanded uncertainty) $U_{\bar{X}}$ 를 구할 수 있다. $N > 30$ 의 충분히 큰 자유도를 갖는 조건에서는 $t = 2$ 가 되어 95% 신뢰구간을 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$u_{\bar{X}} = \sqrt{b_{\bar{X}}^2 + s_{\bar{X}}^2} \tag{4}$$

$$\bar{X} \pm U_{\bar{X}} = \bar{X} \pm 2u_{\bar{X}} \tag{5}$$

3.2 옥외 자유항주모형시험 조건의 분석

옥외 자유항주모형시험의 불확실성을 구하려면 실험에서 발생할 수 있는 오차의 원인을 정리하고, 이를 우연오차와 고정오차 성분으로 나누어 해석해야 한다. Fig. 8에 옥외 자유항주모형시험의 실험 조건이 실험 결과와 해석 과정에 미치는 영향을 정리하였다.

실험 불확실성 중 고정오차는 모형 제작의 공차, 제어 입력의 허용 오차, 실험 환경으로 인한 외력이 있다. 그리고 우연오차는 순간적인 실험 환경의 변동, 일관되지 못한 초기 조건에서 얻어진다. 고정오차는 기준값과의 비교를 통해 구할 수 있고, 우연오차의 해석은 실험 결과로 얻어진 모형선 궤적, 운동의 시계열 정보나 조종 지표 값들의 분포를 통해 이뤄질 수 있다.

고정오차 요소 중 모형 공차와 제어입력의 허용 오차는 실내 자유항주모형시험과 동일할 것으로 기대된다. 본 연구에서 주요한 관심을 두는 부분은 옥외 실험에서 필연적으로 발생하는 외력이 어떻게 자유항주모형시험의 결과에 영향을 미치는 지이다. 일반적인 수조시험과 달리 옥외 자유항주모형시험은 시험 조건의 통제가 어렵기 때문에 외란 성분의 영향이 항상 존재하게 된다. 이는 선체 자체에 미치는 힘으로도 작용하지만, 부가저항으로 인한 요구 추력의 증가가 방향타의 타력을 증가시키는 요소로 작용하는 것도 예상할 수 있다.

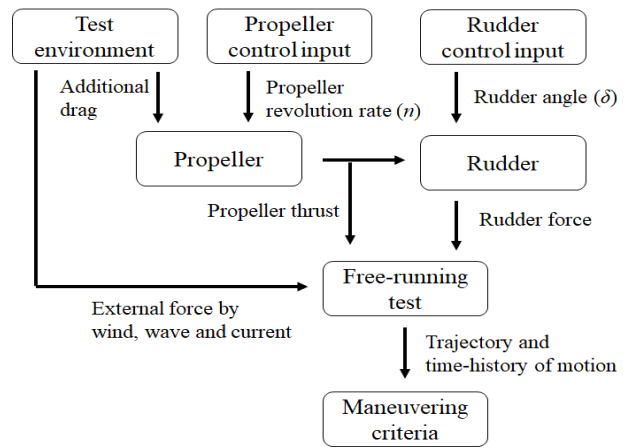


Fig. 8 Procedure of outdoor free-running model test

앞에서 다룬 내용과 유사하게, 국제수조회의(International Towing Tank Conference, ITTC)에서는 자유항주 모형시험에서 발생할 수 있는 오차 원인들을 특성에 따라 Table 3과 같이 정리하였다.

Table 3 Grouping of the uncertainties elements (ITTC, 2017)

| | Uncertainties of deterministic nature | Uncertainties of stochastic nature |
|------------------|--|--|
| Random error | (1) "error is constant during 1 run" - Initial drift angle - No steady state at start of run | (2) Inherent hydrodynamic uncertainty - Residual motion of the water - Wall effect - Bottom profile variation |
| Systematic error | (3) "error is constant during a set of tests" - Draught uncertainty - GM uncertainty - Permanent bias in the initial conditions | (4) Facility bias - Influence of umbilical - Open air facilities |

위의 내용에서 (1) 항은 시험 시작 조건을 잘 통제하여 줄일 수 있다. (2)는 옥외 조건이라도 잘 통제된 환경이라면 그 영향이 크지 않을 것으로 기대된다. 이들 결과는 4.1장에서 다시 다루도록 한다.

고정 오차에 대해서 (3) 항은 모형선의 세팅 정확도를 다룬다. 그리고 (4)항의 실험 시설 조건에 기인한 오차를 설명할 필요가 있다. 10회 가량의 반복시험으로 구성된 한 세트의 자유항주 시험은 대개 2시간 내에 완수되기 때문에, 시험 도중 바람이나 파랑이 유의미하게 바뀌지는 않으므로, 실험 결과에 일정한 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 이러한 오차 성분은 ISO의 Type B 오차로 보아 고정오차의 한 부분으로 간주하였다. 상세하게는 동일한 축척비의 모형선을 이용한 실내 자유항주모형시험 (Sanada et al., 2019)와 본 실험 결과를 비교하여 고정오차 성분을 분석하였다.

4. 자유항주모형시험 결과

4.1 우연 표준 불확실성

옥외 자유항주모형시험을 반복하여 결과의 표준편차를 구했고, 이로부터 $s_{\bar{x}}$ 를 구하였다. Fig. 9는 $Fr = 0.2$, $\delta = 25^\circ$ 조건의 반복 시험에서 얻어진 모형선의 궤적이다. 선회시험에서는 Fig. 6과 같은 방법으로 보정된 궤적을 이용하여 결과를 분석하였다.

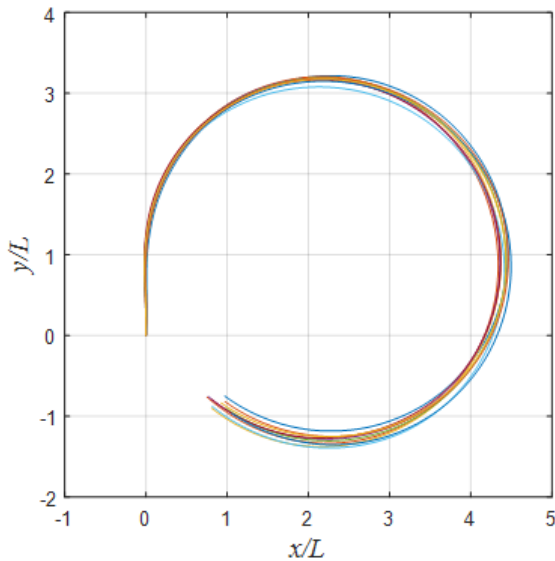


Fig. 9 Trajectory of the model ship in turning circle maneuvering at $Fr = 0.2$, $\delta = 25^\circ$

Fig. 10은 우선회 조건에서의 반복시험에서 얻어진 Advance (Ad)와 Tactical diameter(TD)에 대한 $ts_{\overline{Ad}}/Ad$, $ts_{\overline{TD}}/TD \times 100$ 의 반복 횟수(N) 별 추세이다. 반복 횟수에 따른 Student's t 분포의 계수 t와 표준편차 $s_{\bar{x}}$ 를 이용하여 우연 표준편차를 계산하였다. 실험의 반복 횟수가 적을 경우 표준편차가 오히려 작은 경우도 보였는데, 이는 실험의 우연성에 기인한 것이므로 큰 의미를 두어선 안되고, 전체적으로 N의 증가에 따른 수렴 경향을 비교해야 한다. Ad의 경우, 실험 반복 횟수가 5회를 넘어가자 RSU는 평균 실험값의 1.2% 미만으로 나타났다.

TD는 모형선이 180° 선회를 하는 과정의 횡이동거리를 의미하기 때문에, 90° 선회 과정의 Ad보다 모형선이 더 조종 운동을 진행한 다음에 얻어진다. Ad를 얻는 과정의 평균 시간은 13.2초, TD는 25.9초이다. 따라서 TD의 결과값의 산포도가 더 커졌으며, 반복시험에 따른 수렴이 더 큰 N에서 확인되었다. 5회 반복시험에서 기대되는 $ts_{\overline{TD}}/TD$ 는 3.69%이다.

추가로 25° 좌선회 조건, 35° 우선회 조건에 대해 반복시험을 6회 수행하여 그 결과를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 6회 반복의 선회시험에서 얻어지는 조종 지표들의 RSU는 얻어진 값의 2~3% 수준임을 확인하였고, 좌/우현 선회, 타각 조건에 따라 유의

미한 차이는 발생하지 않았다. Fig. 10에서 볼 수 있듯 실험 반복 횟수가 3회라면 RSU는 Table 4 결과의 2배 정도로 예상된다.

Fig. 11은 $Fr = 0.2$, $\delta = 20^\circ/20^\circ$ 조건에서 반복하여 수행된 지그재그 시험의 모형선 궤적이다. 원래 선박 조종성능 기준에서는

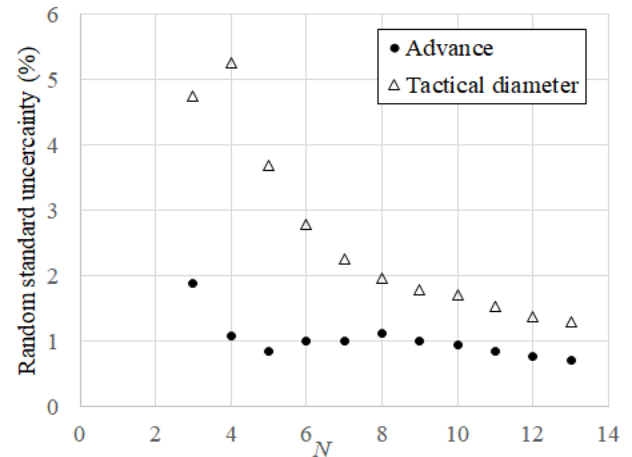


Fig. 10 Change of the random standard uncertainty ($ts_{\overline{Ad}}/Ad \times 100$ and $ts_{\overline{TD}}/TD \times 100$) with respect to the number of repeated tests (N) at $Fr = 0.2$, $\delta = 25^\circ$

Table 4 Turning circle test results (N = 6, Fr = 0.2)

| | $\delta = 25^\circ$ | | $\delta = -25^\circ$ | | $\delta = 35^\circ$ | |
|------|---------------------|------|----------------------|------|---------------------|------|
| | Mean | RSU | Mean | RSU | Mean | RSU |
| Ad/L | 3.13 | 1.1% | 3.15 | 1.3% | 2.72 | 1.8% |
| TD/L | 4.41 | 2.8% | 4.30 | 1.7% | 3.16 | 2.6% |

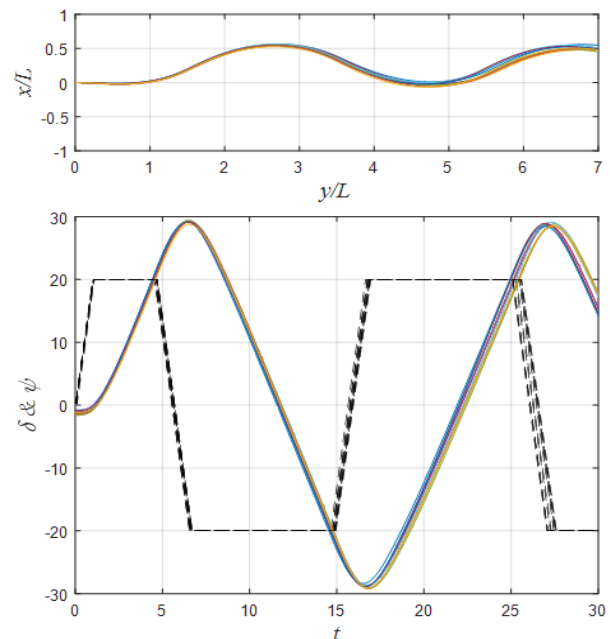


Fig. 11 Results of $20^\circ/20^\circ$ zigzag maneuvering at $Fr = 0.2$: trajectory of the model ship (top) and time-history of the rudder and heading angle (bottom)

20°/20° 지그재그 시험에서 첫 번째 오버슈트의 크기 α_{20_1} 만을 평가 지표로 삼지만 (American Bureau of Shipping, 2006), 본 연구에서는 두 번째 오버슈트의 크기 α_{20_2} 에 대해서도 RSU를 구하였다.

선회시험과 같이 반복시험에 따른 RSU의 추세를 Fig. 12에 나타내었다. 반복 횟수가 늘어날수록 RSU가 줄어드는 경향이 잘 나타났다.

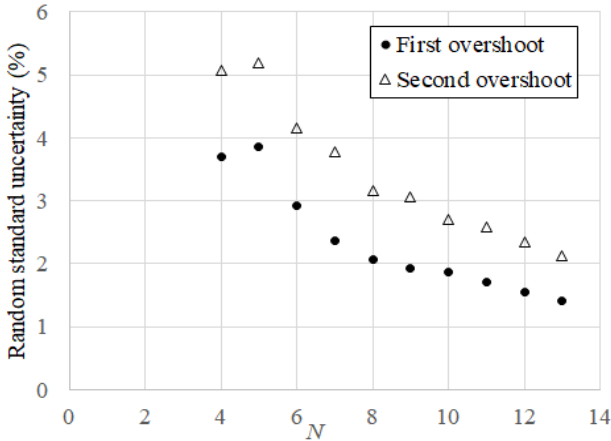


Fig. 12 Change of the random standard uncertainty ($ts_{\frac{\alpha_{20,1}}{\alpha_{20_1}} \times 100$ and $ts_{\frac{\alpha_{20,2}}{\alpha_{20_2}} \times 100$) with respect to the number of repeated tests (N) at $Fr = 0.2$, $\delta = 20^\circ/20^\circ$

α_{20_1} , α_{20_2} 에 대한 RSU의 추세는 같은 횟수를 반복하였을 때의 선회시험의 결과(Ad, TD)와 비교했을 때, 전체적으로 더 큰 값을 보였다. 이는 정상상태를 유지하여 타력, 추력, 유체력의 변화가 없는 선회시험에 비해 지그재그 시험에서는 선체에 가해지는 힘이 시간에 따라 변화하기 때문에 현상이 더욱 복잡하여 시험의 반복성이 떨어지기 때문으로 보인다.

Table 5와 6에 지그재그 시험을 각 6회 반복하여 얻어진 RSU를 정리하여 나타내었다. N=6 조건은 각 시험 결과의 수렴성을 확인하여 적절한 값으로 선정한 것이다. 시험 조건은 전진 속도가 $Fr = 0.2$ 에 대응되는 추진기 회전수로 고정, 타각은 좌/우현 각각 10°, 20°를 적용하였다. 선회시험과 유사하게 지그재그 시험에서도 선회 방향과 타각 크기에 따른 RSU의 변화는 유의미하게 나타나지 않았다.

Table 5 Zigzag test results: 10°/10° (N = 6, Fr = 0.2)

| | $\delta = -10/10^\circ$ | | $\delta = 10/10^\circ$ | |
|----------------|-------------------------|------|------------------------|------|
| | Mean | RSU | Mean | RSU |
| α_{101} | 3.31° | 2.6% | 3.38° | 2.1% |
| α_{102} | 3.57° | 4.3% | 3.47° | 3.8% |

Table 6 Zigzag test results: 20°/20° (N = 6, Fr = 0.2)

| | $\delta = -20/20^\circ$ | | $\delta = 20/20^\circ$ | |
|----------------|-------------------------|------|------------------------|------|
| | Mean | RSU | Mean | RSU |
| α_{201} | 9.28° | 2.9% | 9.19° | 2.6% |
| α_{202} | 8.88° | 4.1% | 8.78° | 3.9% |

4.2 고정 표준 불확실성

SSU의 해석을 위해서는 먼저 실험 조건에 대한 분석이 필요하다. 옥외 자유항주모형시험에서 직진 상태로 $Fr = 0.2$ 조건을 달성할 수 있는 추진기 회전수 n 를 먼저 구하고, 이를 실내 시험과 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 비교 대상은 예인수조의 자항시험 (Kim, 2018), 해양공학수조의 자유항주모형을 이용한 직진 시험 (Araki et al., 2012; Sanada et al., 2013)의 결과이다. 실험 모형의 축척비는 모두 동일하기 때문에 Fr 에 대응되는 n 의 직접 비교가 가능하다.

전체적으로 실내 실험들은 비슷한 속도-회전수 관계를 보였지만, 옥외 자유항주 모형시험은 같은 선속을 달성하기 위해 요구되는 회전수가 평균 8.8% 높게 나타났다. 이는 옥외 자유항주 모형시험에서 외란으로 인한 부가저항을 극복하기 위해 추진기의 요구 동력이 더 커졌음을 시사한다. Kim (2018)의 연구에서 제공된 추진기 단독성능 곡선을 통해 추정된 추진기 추력의 증가분은 실내 조건의 21%이다. 추진기의 추력 증가로 인해 방향타의 타력이 증가하겠지만, 다른 유체력 성분 또한 파랑의 영향으로 증가하기 때문에 타력의 증가만이 조종 시험 결과에 영향을 준다고 보아 결과를 해석할 수는 없다.

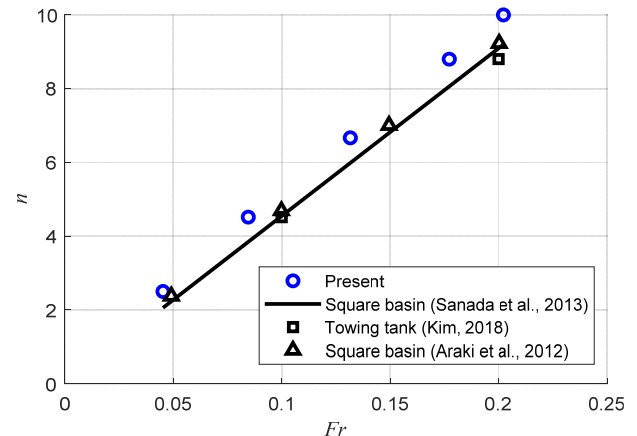


Fig. 13 Comparison of the propeller revolution rate

실내 자유항주모형시험의 조종 해석 결과와의 비교 이전에, 방향타 회전 속도의 차이를 고려해야 한다. 본 연구에서는 방향타의 회전 속도를 21°/s로 적용한데 반해, 실내 자유항주모형시험에서는 방향타의 회전속도가 35°/s로 적용되었다. Table 7은 방향타각 차이에 다른 조종 지표 값들을 Kim (2018)의 조종 모델을 이용한 시뮬레이션으로 구한 결과이다. 시뮬레이션 결과, 선회시험에서는 차이가 거의 발생하지 않았지만 지그재그 시험에서는 21°/s의 옥외 자유항주모형시험 조건에서 오버슈트 각도가 34%의 증가를 보였다. 따라서 본 연구의 옥외 자유항주모형시험과 실내 자유항주모형시험의 비교에서도 오버슈트 각도의 비교는 해당 비율을 고려하였다.

선회시험 결과에서 주요 조종 지표를 얻어내어 실내 자유항주모형시험 결과와 비교하여 Table 8에 나타내었다. 선회시험

결과에서 Ad는 옥외 자유항주모형시험의 경우 더 큰 값을 보였다. 반면, Transfer (Tr)은 값이 작았고, TD는 차이가 거의 나타나지 않았다. 좌/우현 선회에 대한 차이는 옥외 시험에서도 거의 나타나지 않았다.

지금까지 시험에서 주요 조종 지표를 얻어내어 실내 자유항주모형시험 결과와 비교하여 Table 9에 비교하여 나타내었다. 실내 자유항주모형시험 결과는 Table 7의 방향타 회전 속도 21°/s에서 증가한 오버슈트 비율을 적용, 추정된 값을 나타내었다. 방향타 회전 속도로 인한 성분을 제외하여도 옥외 자유항주모형시험에서 오버슈트가 더 큰 값을 보였다.

시험 결과의 비교를 통해 옥외 자유항주모형시험에서 Advance, 오버슈트가 실내 자유항주모형시험 대비 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 ITTC에서 설명한 바와 같이 옥외 자유항주 시험에서 일정하게 발생하는 바람, 파도 등의 외란의 영향 (ITTC, 2017), 모형선 세팅의 오차에 더하여 방향타 회전 속도에 의한 결과 보정 시에 발생하는 오차 등이 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 7 Comparison of maneuvering criteria by maneuvering simulation with different rudder rate (Fr = 0.2)

| | $d\delta/dt$ | 21°/s | 35°/s | Difference (%) |
|--|----------------|--------|-------|----------------|
| Turning circle test ($\delta = 35^\circ$) | Ad/L | 2.86 | 2.78 | 2.8 |
| | Tr/L | 1.65 | 1.65 | 0.0 |
| | TD/L | 3.95 | 3.94 | 0.1 |
| Zigzag test ($\delta = 20^\circ/20^\circ$) | α_{201} | 10.23° | 7.62° | 34.3 |
| | α_{202} | 9.59° | 7.11° | 34.9 |

Table 8 Comparison of turning circle test results (Fr = 0.2)

| | Present study (difference) | | Sanada et al. (2019) | |
|------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | $\delta = 35^\circ$ | $\delta = -35^\circ$ | $\delta = 35^\circ$ | $\delta = -35^\circ$ |
| Ad/L | 2.72 (15.7%) | 2.73 (16.7%) | 2.350 | 2.340 |
| Tr/L | 1.22 (-6.15%) | 1.21 (-7.63%) | 1.300 | 1.310 |
| TD/L | 3.16 (-0.63%) | 3.24 (1.56%) | 3.180 | 3.190 |

Table 9 Comparison of repeated zigzag test results (Fr = 0.2, $\delta = 20^\circ/20^\circ$)

| | Present study (difference) | | Estimated from Sanada et al. (2019) |
|----------------|----------------------------|---------------|-------------------------------------|
| | 20°/20° | -20°/20° | |
| α_{201} | 9.19° (27.5%) | 9.28° (28.7%) | 7.21° |
| α_{202} | 8.78° (21.6%) | 8.88° (22.9%) | 7.22° |

SSU는 이렇게 구한 실내 자유항주모형시험과의 차이에 더하여 선박의 위치, 선수각 계측 시스템의 불확실성을 함께 고려해야 한다. 그 결과를 Table 10에 나타내었다.

Table 10 Systematic standard uncertainty of maneuvering criteria (Fr = 0.2)

| | Error source | | $b_{\bar{X}}$ |
|----------------|--------------|-------------|---------------|
| | Disturbance | Measurement | |
| Ad/L | 0.38 | 0.018 | 0.38 |
| Tr/L | 0.09 | 0.018 | 0.092 |
| TD/L | 0.015 | 0.018 | 0.023 |
| α_{201} | 2.25° | 0.65° | 2.34° |
| α_{202} | 1.56° | 0.65° | 1.69° |

4.3 확장 불확실성

앞의 우연, 고정 표준 불확실성 값을 이용하여 옥외 자유항주모형시험의 확장 불확실성을 계산하였다. Table 11에 각각 N = 6에 대한 시험 결과와 불확실성 값을 나타내었다. SSU는 기준 실험과의 차이를 통해 구하였으므로, Student's t 분포를 적용하지 않은 값을 그대로 사용하였다.

Table 11 Expanded uncertainty of maneuvering criteria at N = 6

| | \bar{X} | $s_{\bar{X}}$ | $b_{\bar{X}}$ | $U_{\bar{X}}(U_{\bar{X}}/\bar{X})$ |
|----------------|-----------|---------------|---------------|------------------------------------|
| Ad/L | 2.72 | 0.019 | 0.38 | 0.38 (14.1%) |
| Tr/L | 1.22 | 0.041 | 0.092 | 0.14 (11.5%) |
| TD/L | 3.16 | 0.032 | 0.023 | 0.085 (2.70%) |
| α_{201} | 9.19° | 0.093° | 2.34° | 2.35° (25.6%) |
| α_{202} | 8.78° | 0.133° | 1.69° | 1.72° (19.6%) |

TD/L을 제외한 모든 조종 지표값들에 대해 고정오차가 지배적이며, RSU는 상대적으로 작은 값으로 나타났다. 우연오차는 N의 증감에 영향을 받지만, 본 실험의 불확실성 수준이라면 N을 더 작은 값으로 설정하여 자유항주모형시험을 수행해도 전체 불확실성의 큰 변화는 기대되지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 선박의 조종성능 분석을 위한 옥외 자유항주모형시험을 수행하였고, 그 결과의 불확실성을 해석하였다. 옥외 자유항주모형시험 특성을 고려한 불확실성 해석 방안을 정리하였으며, 주요 조종 지표들에 대한 반복시험을 통해 불확실성 해석을 수행하였다.

자유항주모형시험에서는 수면파, 등의 영향으로 인해 같은 전진속도를 달성하기 위한 추진기 회전수가 더 높게 얻어졌다. 이외에도, 주요 조종 지표들이 실내 시험에 비해 크게 나타났

데, 이는 고정오차로 이해할 수 있는 외란, 모형선 세팅 등에 기인한 것으로 보인다.

우연 표준 불확실성은 반복시험을 통해 얻을 수 있었으며, 그 크기는 고정 표준 불확실성보다 작았기 때문에 시험의 반복성은 좋은 것으로 판단되었다. 이후 외란 성분의 영향을 분석할 수 있는 방안이 함께 제공되면 옥외 자유항주모형시험을 통해서도 선박의 조종성능과 관련된 주요 지표를 높은 신뢰성으로 얻어낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단(2018R1A6A3A11049664, 2019R1F1A1057551)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- American Bureau of Shipping (ABS), 2006. *Guide for vessel maneuverability*. Houston, TX: ABS.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2005. *Test uncertainty: ASME performance test code*, 19.1, New York, NY: ASME.
- Araki, M. et al., 2012. Estimating maneuvering coefficients using system identification methods with experimental, system-based, and CFD free-running trial data. *Ocean Engineering*, 51, pp.63–84.
- International Maritime Organization (IMO), 2002. Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability: *MSC.Circ. 1053*, London, United Kingdom: IMO.
- International Towing Tank Conference (ITTC), 2017. *Uncertainty Analysis for Free Running Model Tests: ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-06-05*, Zurich, Switzerland.
- Jeon, M.J., Yoon, H.K., Hwang, J. & Cho, H.J., 2017. Study on maneuvering characteristics of submerged body by changing its design parameters. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(2), pp.155–163.
- Kim, D., 2018. *A study on the maneuvering characteristics for a damaged surface combatant ship*. Ph.D. Thesis, Seoul: Seoul National University.
- Sanada, Y. et al., 2013. Trajectories for ONR tumblehome maneuvering in calm water and waves. *Ocean Engineering*, 72, pp.45–65.
- Sanada, Y., Elshiekh, H., Toda, Y. & Stern, F., 2019. ONR tumblehome course keeping and maneuvering in calm water and waves. *Journal of Marine Science and Technology*, 24(3), pp.948–967.
- Shin, H., Jung, J. & Lee, H., 2009. Prediction of ship maneuverability by circular motion test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp.259–267.
- Ueno, M., Yoshimura, Y. & Taukada, Y., 2009. Circular motion tests and uncertainty analysis for ship maneuverability. *Journal of Marine Science and Technology*, 14, pp.469–484.
- Xue, Y., Liu, Y., Ji, C. & Xue, G., 2020. Hydrodynamic parameter identification for ship manoeuvring mathematical models using a Bayesian approach. *Ocean Engineering*, 195, Article No. 106612.
- Yoon, H.K. & Lee, 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. et al., 2015. Benchmark CFD validation data for surface combatant 5415 in PMM maneuvers – Part 1: force/moment/motion measurements. *Ocean Engineering*, 109, pp.705–734.
- Yoon, H.K., Son, N.S. & Lee, G.J., 2007. Estimation of the roll hydrodynamic moment model of a ship by using the system identification method and the free running model test. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 32(4), pp.798–806.
- Yoon, H.K., Yun, K. & Park, I.H., 2011. Identification of four-DOF dynamics of a RIB using sea trial tests (I) – sea trial test, resistance and propulsion model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.8–14.



박종열

서정화

이태일

이대한



박격포



윤현규



이신형