

구속모형시험을 통한 잠수함 선형의 수상 조건 조종성능 추정 연구

권창섭[†]·김동진·이영연·김연규·윤근항·조성록
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Prediction of Maneuverability of a Submarine at Surface Condition by Captive Model Test

Chang-Seop Kwon[†]·Dong-Jin Kim·Young-Yeon Lee·Yeon-Gyu Kim·Kunhang Yun·Sungrok Cho
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

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.

In this paper, the results of Planar Motion Mechanism (PMM) test for a 1/15 scaled model of the MARIN Joubert BB2 submarine is dealt with to derive the maneuvering coefficients for surface condition. For the depth of surface navigation, the top of the sail was exposed 0.46 m above the water surface in the model scale, and it corresponds to 6.9 m in the full scale. The resistance and self-propulsion tests were conducted, and the model's self-propulsion point was obtained for 1.328 m/s, which corresponded to 10 knots in the full scale. The maneuvering tests were performed at the model's self-propulsion point, and the maneuvering coefficients were obtained. Based on the maneuvering coefficients, a turning simulation was performed for starboard 30 degree of stern fins. The straight-line stability and control effectiveness in the horizontal plane were analyzed using the maneuvering coefficients and compared with the appropriate range. For the analysis of the neutral fin angle of the X-type stern fin, the stern fin test with drift angles was carried out. As a result, the flow straightening effect at lower and upper parts of the stern fin was discussed.

Keywords : Surface navigation(수상 운항), PMM(평면운동장치), BB2 submarine(BB2 잠수함), Maneuvering(조종)

1. 서론

1896년 프랑스의 해양 엔지니어인 막심 로베프(Maxime Laubeuf)는 잠수함의 둥근 내압 선체에 수상선 모양의 외부 선체를 결합하는 이중선체 설계를 도입했다. 이를 통해 기존의 둥근 내압 선체로만 이루어진 단일 선체에 발생했던 잠수 상태의 불안정성 문제와 부상했을 때의 열악한 항해 성능 문제를 해결했다. 더불어 전기추진시스템에 증기엔진을 결합하여 수중과 수상 운항 속도와 항속거리를 증가시켰다. 그의 이러한 혁신적인 설계는 이후 잠수함 설계의 표준이 되었다(Miller, 1991). 이후 디젤엔진, 핵 추진 잠수함의 등장으로 수중 및 수상 운항 속도와 항속거리는 비약적으로 증가되었다. 잠수함의 활동영역이 넓어짐에 따라 유체동역학적인 특성 분석이 중요해졌고, 잠수함의 조종운동 시뮬레이션을 위한 연구가 다수 수행되었다(Gertler and Hagen, 1967; Feldman, 1979; Watt, 2007). 그리고 잠수함의 6자유도 조종운동 방정식에 필요한 유체력 미계수 분석을 위해 평

면운동장치(Planar Motion Mechanism, PMM)시험을 이용한 연구(Goodman, 1979; Rhee et al. 2000; Kim et al. 2012)와 회전팔시험(rotating arm test) 기반 연구(Feldman, 1987) 및 원추형시험(coning motion test)에 대한 연구(Lewandowski, 1991; Kim et al. 2000; Rhee et al. 2000; Park et al. 2015)와 같은 구속모형시험 기반 연구와 자유항주 모형시험을 이용한 연구(Overpelt et al. 2015)가 활발히 수행되어 오고 있다. 최근에는 CFD를 이용하여 수중 뿐만 아니라 자유수면 근처에서의 성능 변화에 대한 연구도 수행되고 있다(Griffin et al. 2002; Conway et al. 2018; Torunski, 2018; Kim, 2021). Carrica et al. (2019)는 CFD를 이용한 자유항주 시뮬레이션 기법을 개발하여 잠수함 조종성능에 대한 자유수면 영향을 분석한 바 있다. 그러나, 자유수면 근처에 대한 CFD 기반 연구를 뒷받침할만한 시험 결과는 부족한 실정이다.

선박해양플랜트연구소는 수중운동체의 수중뿐만 아니라, 스노클과 수상 운항을 통합하는 조종운동성능 해석을 위한 구속모형시험과 자유항주 모형시험연구를 수행해오고 있다. 선형이 공개

된 BB2 선형에 대해 수중 운항 조건에 대한 PMM 시험을 수행하여 유체력 계수를 도출하였고 (Kim et al. 2021) 현재는 스노클과 수상 조건에 대한 연구가 수행되고 있다. 그 중에서 본 논문에서는 수상 조건에서의 조종유체력 계수를 도출하기 위한 PMM 시험 연구 결과를 다루고자 한다.

2. 조종운동 방정식

수중운동체의 수평면에 대한 3자유도 조종운동을 기술하기 위한 좌표계는 Fig. 1과 같이 지구고정좌표계 ($O-x_0y_0z_0$)와 물체고정좌표계 ($o-x_by_bz_b$)로 구성된다. 잠수함 형상이 수직면에 대해 좌우 대칭이라고 가정하면 잠수함의 3자유도 조종운동 방정식은 식 (1)과 같이 기술된다 (Kim et al., 2012). 식 (1) 좌변의 가속도 및 속도항은 물체고정좌표계 기준의 물리량이다. 위첨자 ·과 아래 첨자 G는 각각 시간에 대한 미분과 무게중심 위치를 나타낸다. 식 (1)의 우변은 외력항으로, 식 (2)와 같이 선체력, 추력, 제어력, 정유체력이 포함된다. 하첨자 H는 선체력, P는 추력, C는 제어력, S는 정유체력을 나타낸다. 각각의 성분은 식 (3)-(6)과 같이 표현된다 (Gertler and Hagen, 1967; Yeo and Rhee, 2006). 여기서 δ_{s_i} 는 i 번째 X형 함미타, δ_B 는 함수수평타를 의미하고, 타각은 Fig. 1과 같이 타에서 선체 바깥 방향을 향하는 축을 회전축으로 정의하였다. W 는 선체 무게, B 는 선체 부력을 나타낸다. 힘과 모멘트는 각각 $1/2\rho L^2 V^2$ 과 $1/2\rho L^3 V^2$ 로 무차원화하였다.

$$\begin{aligned} m[\dot{u}-vr+wq-x_G(\dot{q}^2+r^2)+z_G(pr+\dot{q})] &= X \\ m[\dot{v}-wp+ur+z_G(qr-\dot{p})+x_G(pq+\dot{r})] &= Y \\ I_{zz}\dot{r}+(I_{yy}-I_{xx})pq+mx_G(\dot{v}-wq+ur) &= N \end{aligned} \quad (1)$$

$$F = F_H + F_P + F_C + F_S \quad (2)$$

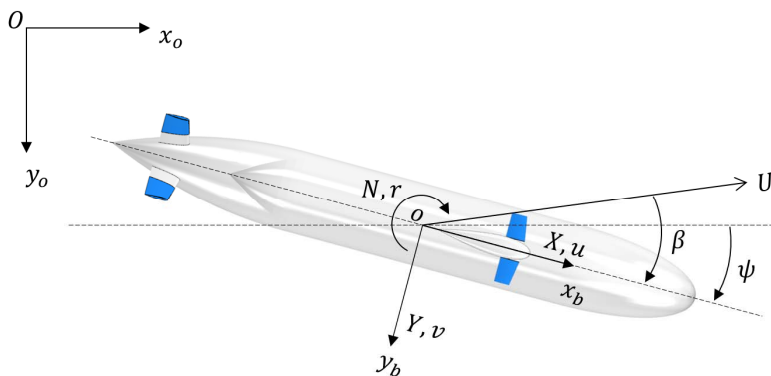


Fig.1 Coordinate system and definition of motion

$$X_H = X_u \dot{u} + X_{uu} u^2 + X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2 + X_{qq} \dot{q}^2 + X_{rr} \dot{r}^2 + X_{vr} vr + X_{wq} wq + X_{pr} pr \quad (3)$$

$$Y_H = Y_v \dot{v} + Y_{vp} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_{v|v|} |v| + Y_p p + Y_r r + Y_{r|r|} |r| + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 + Y_{wv} wp + Y_{wr} wr + Y_{pq} pq + Y_{qr} qr$$

$$N_H = N_v \dot{v} + N_p \dot{p} + N_r \dot{r} + N_v v + N_{v|v|} |v| + N_p p + N_r r + N_{r|r|} |r| + N_{vw} vw + N_{vq} vq + N_{wp} wp + N_{pq} pq + N_{qr} qr + N_{vvr} v^2 r + N_{vrr} vr^2$$

$$X_P = (1-t)\rho n^2 D_P^4 K_T \quad (4)$$

$$Y_P = Y_0$$

$$N_P = N_0$$

$$X_C = X_{\delta_{s1}\delta_{s1}} \delta_{s1}^2 + X_{\delta_{s2}\delta_{s2}} \delta_{s2}^2 + X_{\delta_{s3}\delta_{s3}} \delta_{s3}^2 + X_{\delta_{s1}\delta_{s1}} \delta_{s1}^2 + X_{\delta_{s1}\delta_{s1}} \delta_{s1}^2 + X_{\delta_{s1}\delta_{s1}} \delta_{s1}^2 \quad (5)$$

$$Y_C = Y_{\delta_{s1}} \delta_{s1} + Y_{\delta_{s2}} \delta_{s2} + Y_{\delta_{s3}} \delta_{s3} + Y_{\delta_{s1}} \delta_{s1}$$

$$N_C = N_{\delta_{s1}} \delta_{s1} + N_{\delta_{s2}} \delta_{s2} + N_{\delta_{s3}} \delta_{s3} + N_{\delta_{s1}} \delta_{s1}$$

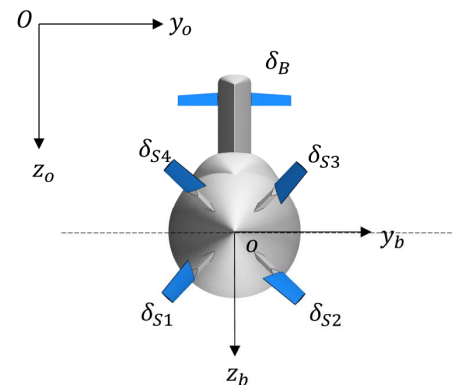
$$X_S = -(W-B)\sin\theta \quad (6)$$

$$Y_S = (W-B)\cos\theta\sin\phi$$

$$N_S = (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi$$

3. 대상선형 및 시험 조건

대상선형은 Figs. 2-3과 같이 네덜란드 MARIN에서 공개한 Joubert BB2 선형이다 (Overpelt et al. 2015). 해당 선형에는 동적안정성과 제어유효성이 우수하다고 알려진 X형 함미타가 적용되었다. 수상 운항 심도는 Fig. 3과 같이 실선 기준 D0 - 6.9 m 조건을 고려하였다 (Carrica et al. 2019). 참고로 D0는 세일 상단이 물에 잠기는 깊이로, 음의 부호는 세일 상단이 수면 밖으로 드러나는 조건을 의미한다. 모형선은 1/15 축척으로 제작되었고 수상 조건에 대한 상세 정보는 Table 1에 정리하였다. 배수량, 부력중심은 CAD 계산값이며 관성반경은 모형선 측정치를 기재하였다.



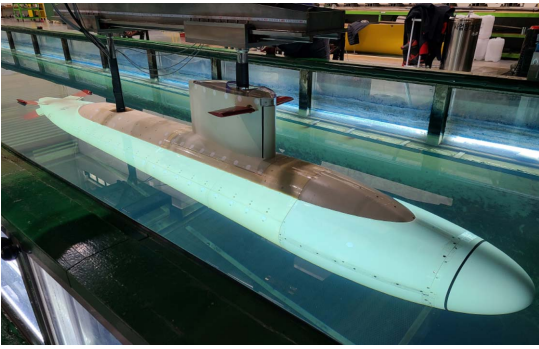


Fig. 2 BB2 submarine model

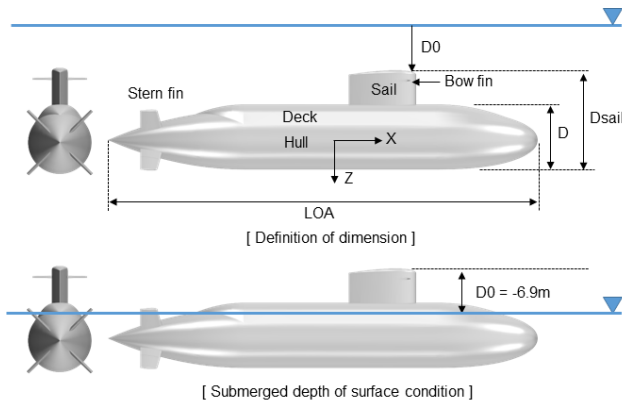


Fig. 3 BB2 submarine and surface condition

Table 1 Principal dimensions of surface condition

Quantity	Unit	Ship	Model
Hull			
Scale	-	1	1/15
LOA	m	70.200	4.680
B	m	9.600	0.640
D	m	10.600	0.707
Dsail	m	16.200	1.080
D0	m	-6.900	-0.460
Displacement	m ³	4026.4	1.193
X _O from nose	m	33.630	2.242
X _G from nose	m	32.550	2.170
X _B from nose	m	32.550	2.170
Kzz	L	0.238 (Measured)	
Propeller			
Diameter	m	5.000	0.333
Pitch ratio (0.7R)		0.966	
A _E /A ₀		0.74	
Number of blade		6	
Location from nose	m	68.27	4.551
Stern fin			
Mean span	m	2.596	0.173
Mean chord	m	3.048	0.203
Movable area	m ²	7.837	0.035
Fin rate	°/s	7.110	27.537

구속모형시험은 Fig. 4와 같이 선박해양플랜트연구소의 선형 시험수조에서 평면운동장치를 이용하여 수행되었다. 선형시험수

조의 길이, 폭, 수심은 200 m x 16 m x 7 m 이다. 모형선은 두 개의 수직 기둥 하단에 고정되었다. 수직 기둥과 모형선 사이에는 Fig. 5와 같이 선수와 선미 기둥 하단에 X, Y축 방향으로 단방향 힘 분력계들을 각각 한 개씩 연결하여 설치하였다. X1, Y1은 선수 기둥에, 그리고 X2, Y2는 선미 기둥에 연결되었다. 선수동요 모멘트는 Y1과 Y2 힘에 수직 기둥 사이의 간격 1.4 m를 고려하여 계산하였다.

구속모형시험 조건은 Table 2에 정리하였다. 저항시험은 실선 4 ~ 12 노트 구간, 자항시험은 실선 6, 8, 10노트 조건에서 수행되었고, 모형선 속도는 Froude 수 상사에 따라 적용되었다. 조종시험은 실선 10노트에 해당하는 모형선 속도 1.328 m/s 조건에서 수행되었다. 모형 프로펠러 회전수는 자항시험으로부터 도출되었으며, 추후 자유항주 모형시험과의 비교를 위해 모형선 자항점인 5.32 rps가 적용되었다. 순수 좌우동요와 순수

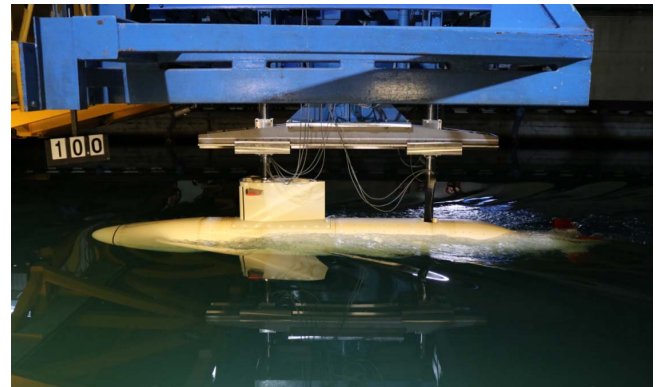


Fig. 4 Captive model test using PMM

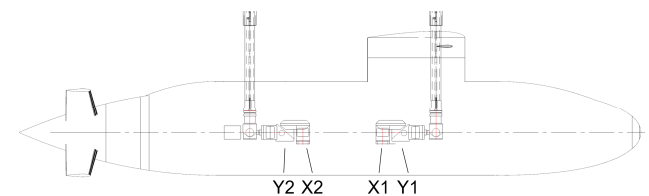


Fig. 5 Force sensor arrangement

Table 2 Test conditions

Test	Test range
Resistance	U = 0.531, 0.797, 1.063, 1.328, 1.594 m/s
Self-propulsion	U = 0.797, 1.063, 1.328 m/s
Static drift	$\beta = 0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ, \pm 6^\circ, \pm 9^\circ, \pm 12^\circ, \pm 15^\circ, \pm 19^\circ$
Pure sway	$i' = -0.03, -0.06, -0.09, -0.12$
Pure yaw	$r' = 0.1, 0.2, 0.3$ $i' = -0.068, -0.193, -0.355$
Static stern fin (δ_1, δ_4)	$\delta = 0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ$
Static drift & stern fin	$\beta = 0^\circ, \pm 6^\circ, \pm 12^\circ$ $\delta = 0^\circ, \pm 15^\circ$

선수동요는 사인 함수로 구현되었고 좌우동요 진폭은 각각 0.5 m 와 1.0 m가 적용되었다. X형 함미타는 좌우 대칭이므로, 좌현 하 단의 1번타와 좌현 상단의 4번타에 대해 각각 정적타각시험을 수 행하였다. 추가적으로 사항상태에서의 중립타각을 분석하기 위한 사항상태 함미타 시험을 수행하였다.

4. 저항 및 자항시험 결과

Fig. 6은 저항시험에 따른 속도별 X힘을 무차원화하여 나타 낸 것이다. u' 은 실선 10노트에 해당하는 모형선 속도 1.328 m/s로 무차원화한 것이다. 붉은 실선은 u' 에 대해 2차식으로 근사한 값을 의미한다. 저항시험에서 구해진 X_{uu} 는 $-3.501E-3$ 로 나타났다. Fig. 7은 자항시험에서 도출된 모형선 자항점의 프로펠러 rps, 모형선의 추력감소계수(thrust deduction factor)를 나타낸 것이다. 모두 모형선 속도에 대해 나타내었다. 1.328

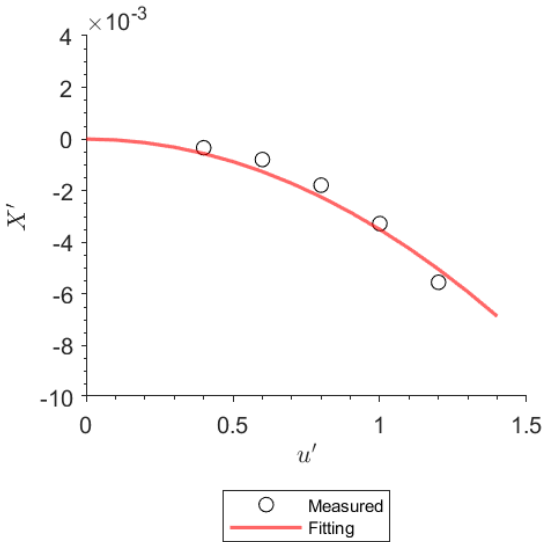


Fig. 6 Result of resistance test

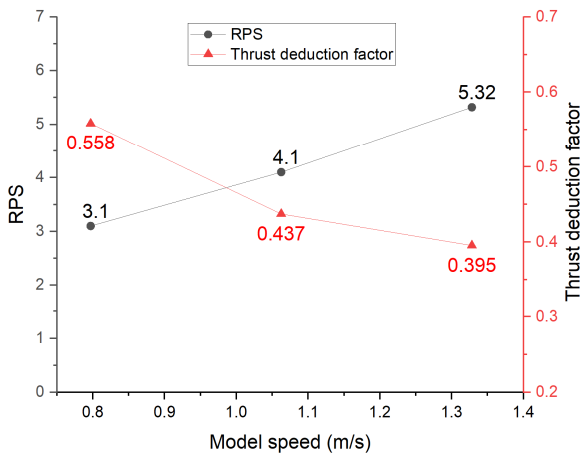


Fig. 7 Result of self propulsion test

m/s 속도에 대한 모형선 자항점은 5.32 rps로 분석되었다. 실험에서 자유수면을 통해 프로펠러에 공기가 유입되는 현상 (ventilation)은 관찰되지 않았다. 수상 운항 조건에서의 프로펠러 중심 위치의 심도, h와 프로펠러 반경, R의 비율인 h/R은 1.8에 해당된다. Ha et al. (2021)은 프로펠러 심도에 따른 추력과 토크 변화 특성을 실험적으로 분석한 바 있다. 실선과의 상사를 위한 층류효과 제거를 위해 레이놀즈(Reynolds number) 수 3×10^5 이상, 표면장력 효과를 무시할 수 있는 웨버 수 (Weber number) 180 이상 조건에서 실험을 수행하였고, 결과적으로 h/R = 1.6 ~ 3.0 영역에서는 추력, 토크 계수의 변화가 없어 수면의 영향이 없는 완전 침수 조건에 해당됨을 보였다. 본 시험은 h/R = 1.8 조건에 해당되므로 프로펠러 완전 침수 조건에 해당되어 공기유입 현상이 나타나지 않은 것으로 판단된다.

5. 조종시험 결과

Figs. 8-12에 조종시험 결과와 해석 결과를 나타내었다.

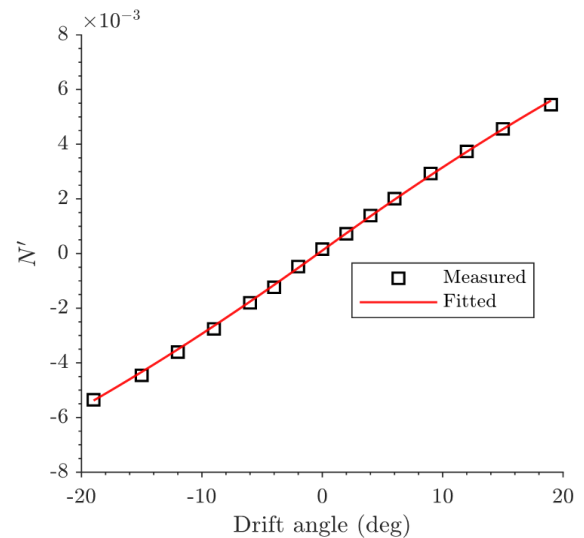
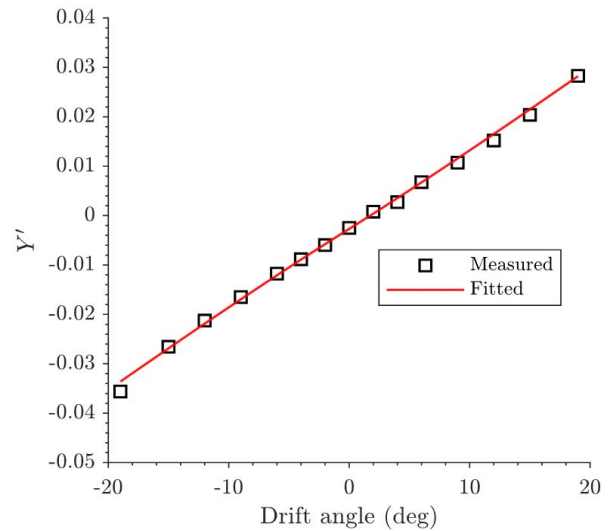


Fig. 8 Results of static drift test

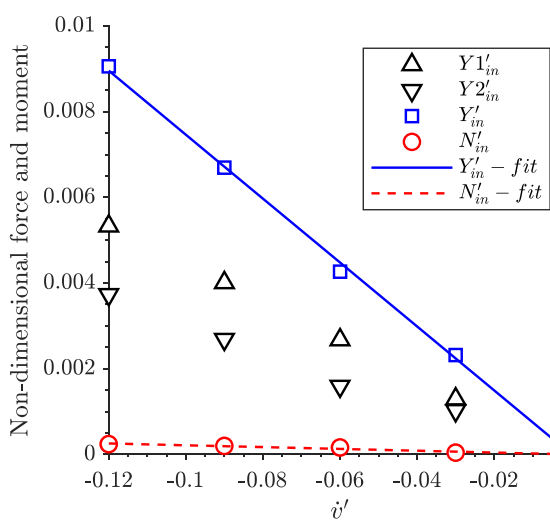


Fig.9 Results of pure sway test

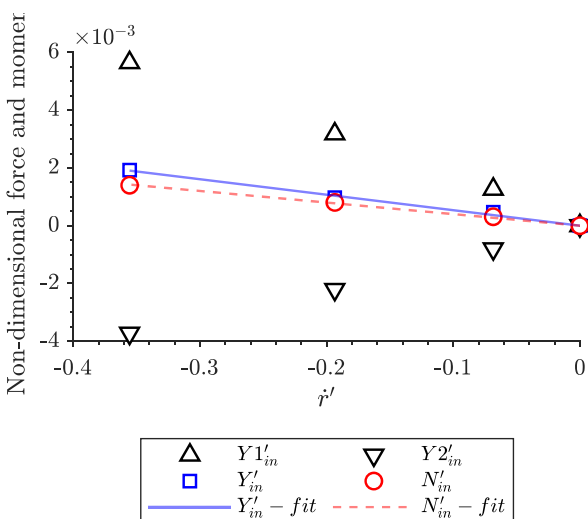
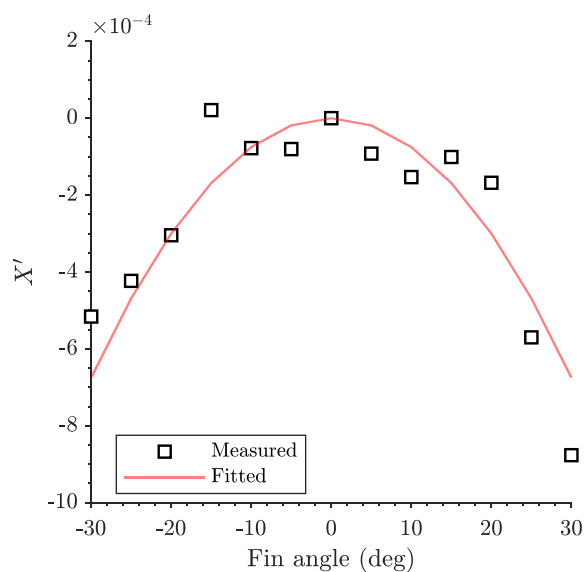


Fig. 10 Results of pure yaw test

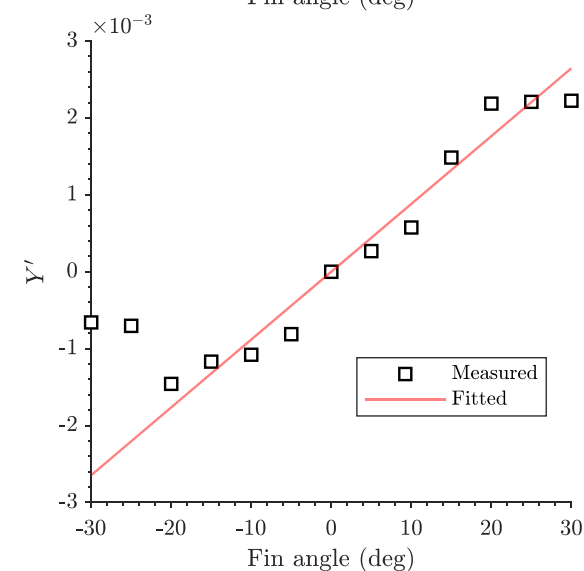
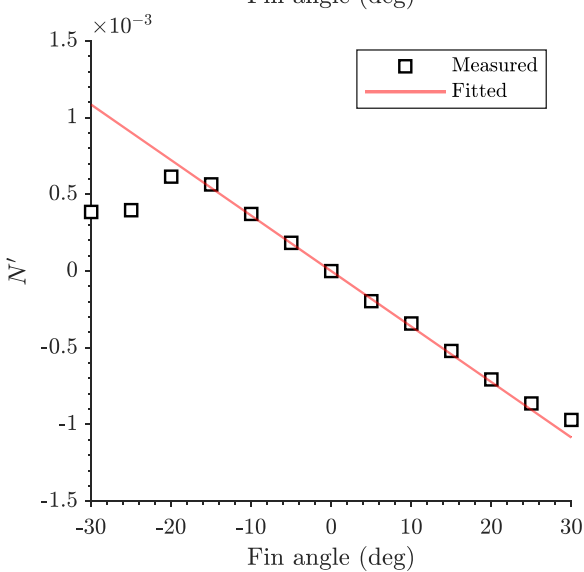
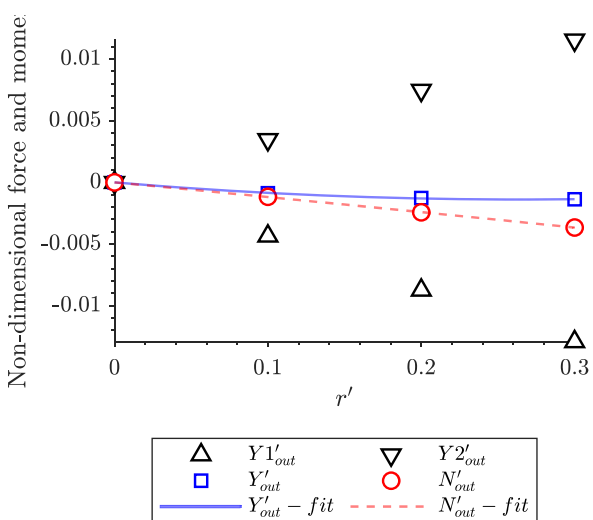


Fig. 11 Results of stern fin #1 test



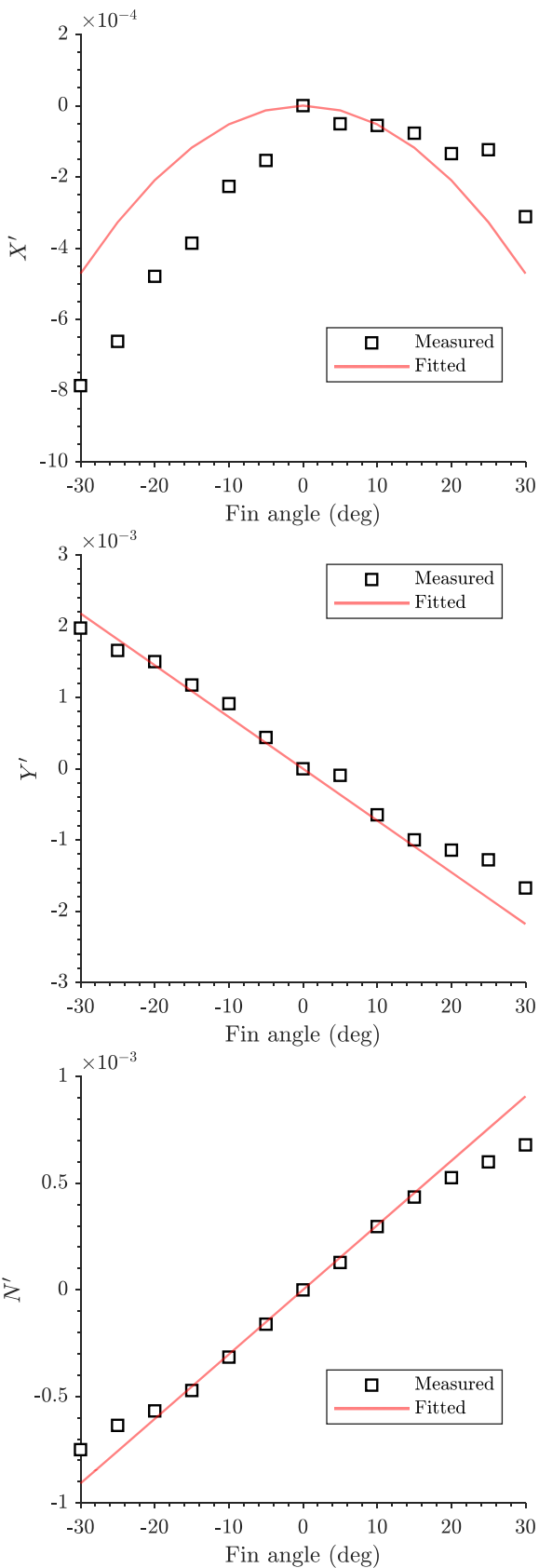


Fig. 12 Results of stern fin #4 test

Fig. 8의 정적사향시험의 경우에는 사향각 6도 범위 내에서

선형유체력 계수를 도출한 다음 비선형유체력 계수를 도출하였다. 순수 좌우동요와 순수 선수동요 시험 결과인 Figs. 9-10에서 Y1과 Y2는 각각 선수와 선미 수직 기둥에 설치된 Y방향 센서를 의미하며, 하첨자 in과 out은 각각 in-phase와 out-of-phase를 나타낸다.

Figs. 11-12의 정적타각시험 결과에서 $X_{\delta_{s\delta_{s1}}}'$ 와 $Y_{\delta_{s1}}'$, $N_{\delta_{s1}}'$ 유체력 계수는 각각 타각 30도와 선형구간인 15도 범위 데이터를 이용하여 도출하였다. 수면에서 상대적으로 멀리 떨어진 1번 함미타에 비해 수면에 걸쳐져 있는 4번타의 타각에 따른 X힘의 좌우 비대칭 정도가 상대적으로 크게 나타났다. 그리고 Table 3에 정리된 4번타의 $X_{\delta_{s\delta_{s1}}}'$ 와 $Y_{\delta_{s1}}'$, $N_{\delta_{s1}}'$ 계수들의 절댓값은 1번 타 값들의 각각 70%, 82%, 84% 수준으로 감소되었다. 이는 4번 타의 끝단(tip) 일부분이 수면 위로 노출된 영향으로 보여진다.

Table 3 Results of captive model test

Resistance test			
X_{uu}'		-3.5007E-03	
Self-propulsion test (1.328 m/s)			
Propeller revolution		5.32 rps	
Static drift test			
Y_v'	-8.7566E-02	N_v'	-1.8321E-02
$Y_{ v }'$	-2.2755E-02	$N_{ v }'$	4.4859E-03
Pure sway test			
Y_v'	-5.0103E-02	N_v'	-2.1275E-03
Pure yaw test			
Y_r'	1.4064E-02	N_r'	-1.1703E-02
$Y_{r r }'$	2.3273E-02	$N_{r r }'$	-2.0135E-03
Y_r'	-5.3580E-03	N_r'	-2.7175E-03
Static stern fin test			
$X_{\delta_{s1}\delta_{s1}}' (= X_{\delta_{s2}\delta_{s2}}')$		-2.462E-03	
$Y_{\delta_{s1}}' (= Y_{\delta_{s2}}')$		5.055E-03	
$N_{\delta_{s1}}' (= N_{\delta_{s2}}')$		-2.072E-03	
$X_{\delta_{s1}\delta_{s1}}' (= X_{\delta_{s1}\delta_{s3}}')$		-1.719E-03	
$Y_{\delta_{s1}}' (= Y_{\delta_{s3}}')$		-4.163E-03	
$N_{\delta_{s1}}' (= N_{\delta_{s3}}')$		1.733E-03	

구속모형시험을 통해서 도출한 유체력 계수를 Table 3에 정리하였다. 수상 조건에 대한 구속모형시험을 통해 도출된 조종 유체력 미계수를 이용하여 함미타 4개 모두 후단부(trailing edge)가 우현 30도가 되는 선회 시뮬레이션을 수행하였고, 결과를 Fig. 13과 Table 4에 나타내었다. 추후 해당 조건에 대한 자유항주 모형시험이 수행되면, 본 연구 결과와의 비교 검토가 수행될 예정이다.

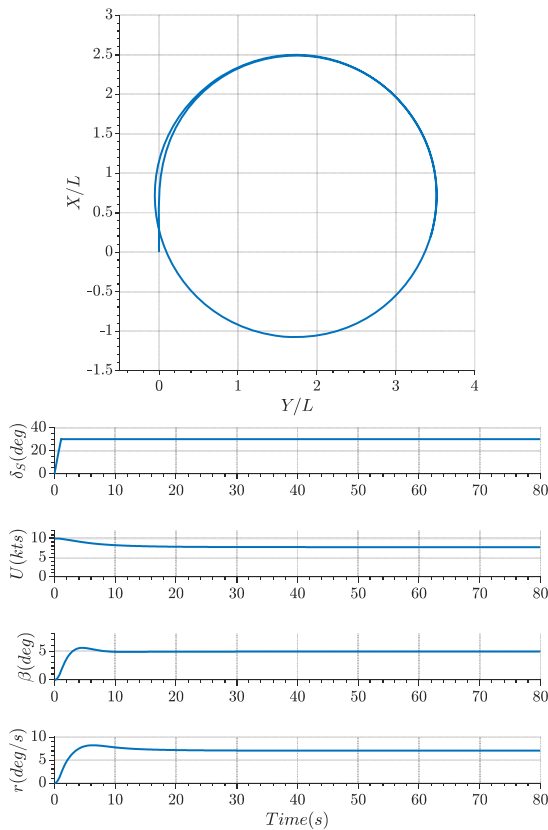


Fig. 13 Turning simulation result (starboard, $\delta_S = 30$ deg.)

Table 4 Turning simulation result (starboard, $\delta_S = 30$ deg.)

	Unit	Value
Advance	L	2.48
Tactical diameter	L	3.51
Final speed/initial speed	-	0.77
Final drift angle, β	deg.	4.9
Final yaw rate, r	deg./s	7.0

6. 수평면 동적안정성 및 제어 유효성

제어기가 고정된 상태에서 직진 중에 미소 교란을 받을 때, 원래의 직진 평형상태로 돌아오는지를 판단할 수 있는 직진안정성을 분석하였다. 수평면 상의 직진안정성 판별식은 식 (7)과 같이 표현된다(Goodman, 1979). G_h 가 0보다 클 경우 직진안정성이 있으며, 일반적인 적정값 범위는 0.2 ~ 0.4에 해당된다(Overpelt et al., 2015). Table 3의 선형 유체력 계수를 이용하여 수상 심도에서의 G_h 를 계산한 결과는 0.84로 나타나, 직진안정성을 갖는 것으로 분석되었다.

$$G_h = 1 - \frac{N'_v(Y'_r - m')}{Y'_v(N'_r - m'x'_G)} \quad (7)$$

X형 함미타의 수평면 운동에서의 제어 유효성은 식 (8)과 같이 표현된다(Bohlmann, 2001). δ_r 은 십자형 함미타에서의 방향타각을 의미하며, Y'_{δ_r} , N'_{δ_r} 는 X형 함미타 부호를 고려하여 식 (9)와 같이 계산된다.

$$E_{sway} = \frac{Y'_{\delta_r}}{\frac{L}{10^3}(m' - Y'_v)}, \quad E_{yaw} = \frac{N'_{\delta_r}}{\frac{L^2}{10^3}(N'_r - I'_{zz})} \quad (8)$$

$$Y'_{\delta_r} = Y'_{\delta_{s1}} + Y'_{\delta_{s2}} - Y'_{\delta_{s3}} - Y'_{\delta_{s4}} \quad (9)$$

$$N'_{\delta_r} = N'_{\delta_{s1}} + N'_{\delta_{s2}} - N'_{\delta_{s3}} - N'_{\delta_{s4}}$$

Table 5 Results of control effectiveness analysis

Coefficients	Value	Remark
Y'_{δ_r}	1.843E-02	
N'_{δ_r}	-7.609E-03	
E_{sway}	3.58	3.0 ~ 5.0
E_{yaw}	0.38	0.2 ~ 0.6

Table 5는 제어판 유체력 계수와 제어 유효성 해석결과를 나타낸다. 결과적으로 제어판 유효성이 적정값 범위(Overpelt et al., 2015) 내에 있음을 알 수 있다.

7. 중립타각 분석

Fig. 14는 사향각에 따른 X형 함미타의 중립타각 분석 결과를 나타낸다. 타직압력(rudder normal force)이 0이 되는 타각을 계산하여 중립타각을 도출하였고, 부호는 각각의 함미타각 부호와 동일하다. 선체 하부에 위치한 1번, 2번 함미타는 중립타각이 사향각에 비례하는 경향을 보였다. 이는 해당 위치에서 선체 정류영향이 크지 않음을 의미한다. 사향각 0도 조건에서 중립타각의 부호를 살펴보면, 1번과 2번 함미타의 후단부가 모두 연직상방 및 선체 바깥 방향을 향함을 알 수 있다. 이에 따라, 수상 조건에서 직진하는 경우에는 하부 함미타 위치에서 약간의 상승 및 선체 바깥 방향 유동이 나타남을 유추할 수 있다.

한편, 상부 함미타의 중립타각은 사향각 ± 12 도 범위에서 3번타는 $-4 \sim -11$ 도, 4번타는 $7 \sim 13$ 도 범위 내에서 부호의 변화가 나타나지 않았다. 즉, 상부 함미타는 하부타와 달리 사향각에 따라 중립타각이 큰 변화를 보이지 않으며, 이는 선체 정류영향이 크게 나타나기 때문이라고 볼 수 있다. 상부 함미타의 중립타각 부호를 통해 볼 때, 타 후단부가 모두 연직상방 또는 선체 중앙부로 향하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라, 수상 조건에서 사향각 ± 12 도 범위 내에서는 X형 함미타의 상부 방향 타 위치에서 유동이 안쪽으로 유입되는 현상이 나타남을 유추해볼 수 있다. Fig. 15는 사향 상태에서의 X형 함미타 주위 유동을 보여준다. X형 함미타 상부 위치에서 유동이 안쪽으로 유

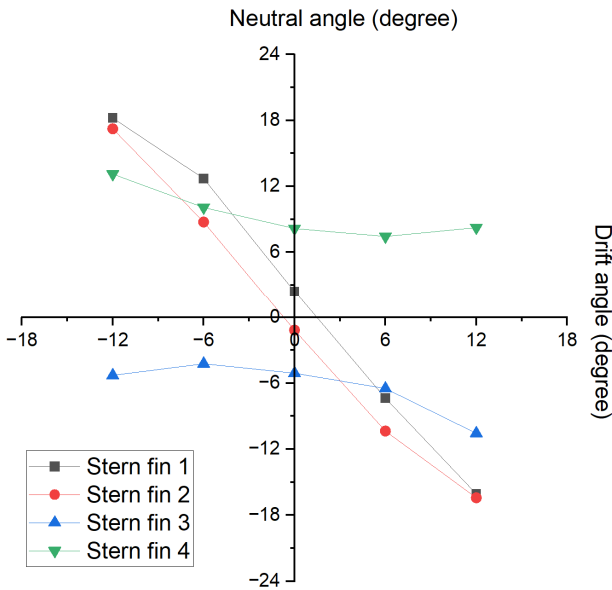


Fig. 14 Neutral stern fin angle

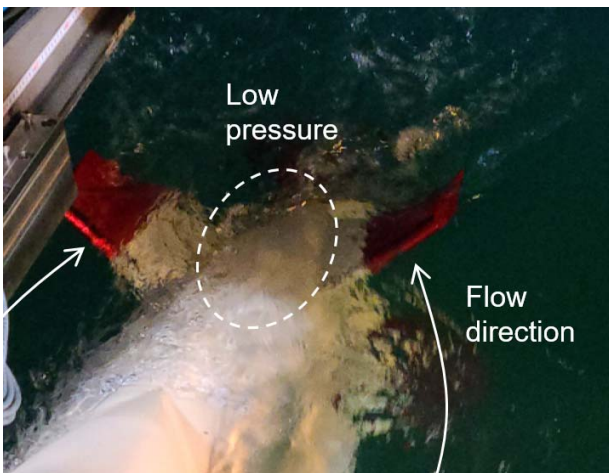


Fig. 15 Snapshot of static drift & stern fin test

입되는 현상이 육안으로 관찰되었으며, 그 원인은 해당 위치에서 압력이 낮아지기 때문이라고 추정된다. 추후 유선가시화 시험이나 CFD 해석을 통한 압력장 해석을 통해 보다 정밀한 분석이 가능하다고 사료된다.

사향각 0도 조건에서 중립타각은 좌현 함미타 (1번, 4번)가 우현 함미타 (2번, 3번)보다 다소 크게 나타났다. 이는 프로펠러 회전방향의 영향이라고 보여진다. 함미에서 바라볼 때, 프로펠러는 시계방향으로 회전한다. 좌현 함미타의 중립타각 방향은 프로펠러 회전방향과 일치하지만, 우현의 경우에는 반대가 된다. 이러한 영향으로 직진 상태에서의 좌현 함미타의 중립타각이 우현보다 다소 증가될 수 있다고 사료된다.

수상 조건에서는 X형 함미타의 상부와 하부에 중립타각이 다른 특성을 보이기 때문에, 정밀한 조종운동 시뮬레이션을 위해서는 이러한 현상을 고려한 조종운동 수학모델 개선이 필요하다고 사료된다. 그리고, 함미타 각에 따른 선체력 변화의 기울기는 좌현과 우현이 대칭일 것으로 예상하여 좌현 함미타에 대

한 성능 시험만 수행되었다. 그러나 프로펠러 회전에 의해 좌현과 우현의 중립타각에 차이가 발생하였기 때문에, 추후에는 함미타 양현에 대한 성능 시험을 통해 좌우 대칭성에 대한 검증이 필요하다고 사료된다.

8. 결론

본 연구에서는 X형 함미타가 적용된 BB2 잠수함 선형에 대해 수상 조건에서의 조종유체력 계수를 도출하기 위해 1/15 축척비 모형선에 대한 PMM 시험을 수행하였다. 주요 연구 결과는 아래와 같이 요약될 수 있다.

- 실선 10노트에 해당하는 모형선 1.328 m/s 조건에서의 모형선 자항점은 5.32 rps로 도출됨.
- 모형선 자항점에서 조종시험을 수행하여 조종유체력 계수를 도출함.
- 조종시험을 통해 도출한 유체력 계수를 이용하여 함미타 우현 30도 선회 시뮬레이션을 수행함. 그리고 수상 조건에서도 충분한 직진안정성과 제어 유효성을 확보하고 있음을 확인함.
- X형 함미타의 중립타각 분석을 위해서 사향상태에서의 함미타 시험을 수행함. 하부타에는 선체 정류효과가 나타나지 않았으나, 상부타에는 선체 정류효과가 나타남. 이에 따라 수상 조건에 대한 정밀한 조종운동 시뮬레이션을 위해서는 중립타각을 고려한 조종운동 수학모델 개선이 필요하다고 사료됨.

추후에 수상, 스노클 및 수중 상태에 대한 자유항주시험이 수행될 예정이며, 구속모형시험 결과와의 비교 및 조종운동 수학모델 개선 연구가 수행될 예정이다.

후기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “수중운동체 운항능 통합 추정 기술개발(3/5) (PES4250)”에 의해 수행되었습니다.

References

- Carrica, P.M., Kim, Y. and Martin, J.E., 2019. Near-surface self propulsion of a generic submarine in calm water and waves. *Ocean Engineering*, 183, pp.87-105.
- Conway, A.S.T., Valentinis, F. and Seil, G. 2018. Characterisation of suction effects on a submarine body operating near the free surface. *In 21st Australasian fluid mechanics conference*, Adelaide, Australia, Vol. 766.

Feldman, J., 1979. *DTNSRDC revised standard submarine equations of motion*, Report DTNSRDC/SPD-0393-09.

Feldman, J., 1987. *Straightline and rotating arm captive-model experiments to investigate the stability and control characteristics of submarine and other submerged vehicles*, Report DTRC/SHD-0393-20.

Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967. *Standard equation of motion for submarine simulation*. NSRDC-Report SR 00901 01, Task 0102.

Goodman, A., 1979. *Description and operation of sub planar motion mechanism system*, Hydronautics Technical Manual.

Griffin, M., 2002. *Numerical prediction of the maneuvering characteristics of submarines operating near the free surface*, Ph.D. Thesis, MIT.

Ha, J., Seo, J., Park, G., Park, J., Rhee, S.H., Yoo, J. and Park S., 2021. Experimental study on ventilation and shaft excitation force of a propeller in partially submerged condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 58(1), pp.40-48.

Howaldtswerke-Deutsche Werft AG (HDW), 2001. *Manoeuvrability of submarines - estimation of linear and non-linear hydrodynamic coefficients (Part 1)*, Kiel, Howaldtswerke-Deutsche Werft (HDW) Design Training Center.

Kim, Y., 2021. *Development and validation of hydrodynamic model for near free surface maneuvers of BB2 Joubert generic submarine*, Doctoral dissertation, The University of Iowa.

Kim, Y.G., Kim, D.J., Yun, K., Lee, Y.Y. and Jeong, S.W., 2021. Prediction of maneuverability of submarine by captive model test. *Proceedings of the Annual Autumn Conference of the Society of Naval Architects of Korea*.

Kim, S.Y., Yang, H.J., Kim, J.W., Hong, S.W., Kang, J.S. and Jun, T.B., 2000. A description of KRISO rotating arm system. *Journal of Ship and Ocean Engineering*, 29, pp.155-160.

Kim, Y.G., Yun, K.H., Kim, S.Y. and Kim, D.J., 2012. Captive model test of submerged body using CPMC. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 49(4), pp.296-303.

Lewandowski, E., 1991. *Tests of a submarine model in coning motion*. Davidson Laboratory Technical Report 2660.

Miller, D., 1991. *Submarines of the world*, ISBN 0-86101-562-2.

Overpelt, B., Nienhuis, B. and Anderson, B., 2015. Free running manoeuvring model tests on a modern generic SSK class submarine (BB2). *In Pacific International Maritime Conference* pp.1-14.

Park, J.Y., Kim, N., Rhee, K.P., Yoon, H.K. and Kim, C., 2015. Study on coning motion test for submerged body. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), pp.436-444.

Rhee, K.P., Yoon, H.K., Sung, Y.J., Kim, S.H. and Kang, J.N., 2000. An experimental study on hydrodynamic coefficients of submerged body using planar motion mechanism and coning motion device. *International Workshop on Ship Maneuverability*, pp.1-20.

Torunski, B., 2018. *Computational analysis of the free surface effects on a BB2 submarine undergoing horizontal maneuvers*. Doctoral dissertation, University of New Brunswick.

Watt, G.D., 2007. *Modelling and simulating unsteady six degrees-of-freedom submarine rising maneuvers*. DRDC Atlantic TR 2007-008.

Yeo, D.J. and Rhee, K.P., 2006. Design of sensitivity-maximizing input for submergibles' manoeuvring coefficients using genetic algorithm technique. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 43(2), pp.156-163.

