



자유항주모형시험을 통한 수중운동체의 수면 근처에서의 심도제어 및 조종성능 추정

윤근항[†] · 조성록 · 이영준 · 박정홍
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

Estimation of Manoeuvrability and Depth Control for an Underwater Vehicle near Free Surface by Free-Running Model Tests

Kunhang Yun[†] · Sungrok Cho · Yeongjun Lee · Jeonghong Park
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.

This paper addresses one of the methods to estimate the maneuverability of underwater vehicles, specifically the free-running model test. An underwater vehicle snorkeling near the surface is affected by environmental factors such as waves and free-surface effects, which influence the vehicle's depth keeping ability and manoeuvring performance. Therefore, precise dynamic analysis on the vehicle near the surface is strongly required. To predict maneuverability, new free-running systems for underwater vehicles, applicable to 1-ton-class models, have been developed, and a model testing procedure for underwater vehicles was established using the systems and BB2 model. Based on the established procedure, manoeuvre tests, including depth changing and keeping performance tests using a practical depth control algorithm, horizontal turning tests, and zigzag tests, were conducted. The manoeuvre test results are presented with detailed data and pictures. The testing method and benchmark data obtained from this study will be used for the design and manoeuvre performance evaluation of various underwater vehicles in the future.

Keywords : BB2 Submarine(BB2 잠수함), Free running model test(자유항주모형시험), Manoeuvre(조종), Depth control(심도제어), Snorkel(스노클)

1. 서론

잠수함, 자율 무인 잠수정 등으로 대표되는 수중운동체는 해양 방위 및 심해탐사와 같은 연구 목적 등으로 다양하게 활용되고 있으며, 바다 속에서의 안전하고 효율적인 운항을 위하여 유체역학적으로 우수한 성능 설계를 요구받고 있다. 특히 잠수함과 같은 수중운동체는 수중에서뿐만 아니라 수면 근처에서의 운항 특성에 대한 정밀한 성능해석이 요구된다. 이와 관련하여 잠망경 심도 혹은 스노클 항해 시 파도 및 수면 효과 등으로 인한 함의 유체성능 영향 해석과 (Kwon et al., 2022a; Kim et al., 2024) 함의 심도 유지를 위한 제어기 개발 등이 (Park et al., 2015, 2022) 최근까지 활발히 연구되고 있다.

한편, 수중운동체의 유체성능해석은 구속모형시험을 통한 수학적 모델 구성 및 이를 이용한 시뮬레이션을 활용하는 전통적인 실험적 접근방법과 최근의 전산유체해석 기법을 적용한 유동 해석 연구로 진행되어 왔다 (Park et al., 2017; Carrica et al., 2019; Cho et

al., 2020; Kim et al., 2024). 조종성능 추정을 위한 또 다른 실험방법인 자유항주모형시험은 수상선 대비 수중운동체에는 아직 활발히 적용되지 못하고 있다. 운용성이 제한된 수중환경과 부족한 기반 연구시설 등으로 인하여 주로 외국의 기관 Maritime Research Institute Netherlands (MARIN, 2025), QinetiQ (2025) 등에 의해 관련 연구가 진행되었다. 다만, 최근 국방과학연구소에서 잠수함의 과도기동 해석을 위한 관련 연구를 진행한 사례가 보고되고 있다 (Lee et al., 2023).

이러한 배경에서 선박해양플랜트연구소는 기존에 수행해 오던 수중운동체의 유체역학적 성능평가 기술을 (Kim et al., 2012) 확장할 수 있는 신규 평가기술을 확보하기 위하여, 수중운동체의 구속모형 시험 및 통합시뮬레이션, 전산유체역학해석, 자유항주모형 시험을 수행할 수 있는 독자적인 운항성능 해석기술과 체계를 새롭게 구축하고 있다. 특히 연구소가 보유한 자율 무인 잠수정 개발 경험과 수중 항법 관련 기술 (Lee et al., 2017)을 활용하여 수중운동체에 적용

가능한 자유항주모형시험 기술과 그 절차를 개발하고 있다. 본 논문에서는 상기의 연구 중 수중운동체의 자유항주 조종모형시험 기법 및 절차에 관하여 다룬다. 특히 BB2 선형의 수상조건 조종모형시험 (Cho et al., 2024) 이후, 수면 근처에서의 심도 변경 및 유지 시험, 스노클조건에서의 수평면 조종모형시험 절차와 그 시험 결과를 분석하였고 이를 참고용 그림과 함께 수록하였다.

2. 조종모형시험 조건 및 배경

2.1 BB2 모형선 및 시험조건

수중운동체의 자유항주모형시험 기술개발을 위해 MARIN에서 공개한 BB2 선형을 활용하였다 (Overpelt et al., 2015). 모형선 및 시스템의 재활용성을 고려한 모형선의 축척비는 1/150이다. 제작된 모형선의 상세 제원, 자유항주시스템 개발 요구사항 및 사양 등은 이전에 수행된 연구 (Kwon et al., 2022b; Cho et al., 2023)를 참고하면 되고, 본 연구를 위한 개략적인 모형선 및 시스템의 형상은 Fig. 1과 같다.

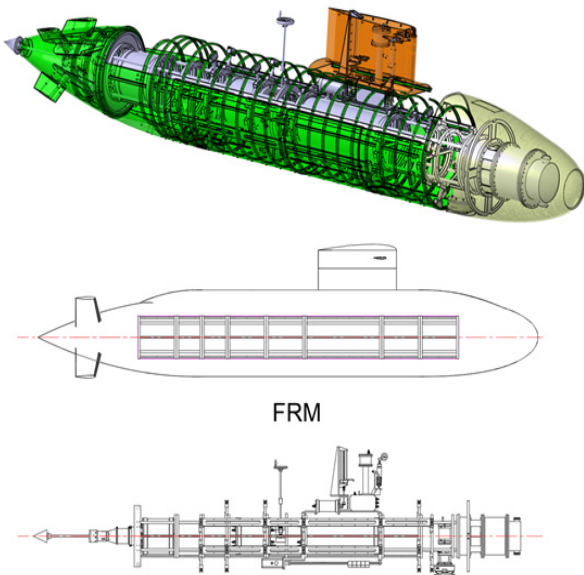


Fig. 1 Design of BB2 model for free-running model tests

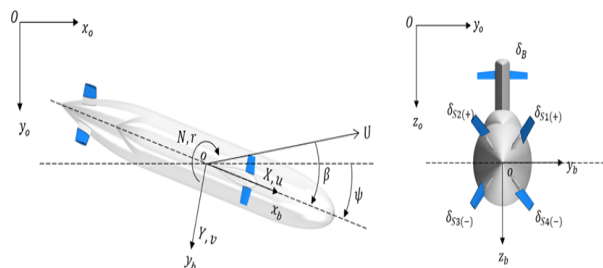


Fig. 2 Coordinate systems for underwater vehicles

Table 1 Depth control test scenarios near free surface

Test item	Speed (knot)	Target depth (m)
Depth control	10	0.7, 1.3, 1.9, 3.1

Table 2 Manoeuvre test scenarios for snorkel condition

Test item	Speed (knot)	Depth (m)	Rudder angles (°)
Turn	10	1.0	±30, ±20, ±10, ±5
Zigzag			±20/20, ±10/10

Fig. 2는 자유항주모형시험에 사용된 수중운동체의 좌표계를 나타낸 그림이다. 선미타의 양의 방향은 수중운동체를 우현으로 선회시키는 힘을 발생시키는 방향으로 정의하였다. 4개의 개별 선미타 동작을 수직면, 수평면 방향으로 표현한 대표 타각은 각각 식 (1), (2)와 같다. 세일부에 설치된 선수타의 양의 방향은 수중운동체를 상승시키는 힘을 발생시키는 방향으로 정의하였다.

$$Rudder = \frac{(\delta_{s1} + \delta_{s3} + \delta_{s2} + \delta_{s4})}{4} \quad (1)$$

$$Elevator = \frac{(-\delta_{s1} - \delta_{s3} + \delta_{s2} + \delta_{s4})}{4} \quad (2)$$

본 논문에서 다루는 자유항주모형시험 항목은 수면 근처에서의 심도제어시험과 스노클조건에서의 수평면 조종시험으로 구성되며, 그 상세 내용은 각각 Table 1, 2와 같다. 모형선의 시험속도는 Froude 수 상사에 따라 실선기준 10노트에 대응되는 속도이며, 시험 중 프로펠러 회전속도는 고정되었다. 스노클조건 심도는 약 1.0m이다.

2.2 시험준비 및 시험절차

수중상태의 BB2 모형선 시험준비는 선행연구 (Cho et al., 2024)와 동일한 방식으로 진행되었다. 수중상태에 해당하는 BB2 선형의 모형선 기준 무게-부력중심, 질량관성모멘트, 타각속도 정보와 경사시험 등을 통하여 확인된 모형선의 최종 계측값은 Table 3과 같다. 수중에서의 모형선 초기값은 양성부력 약 +1~2kg, 종동요각 약 +5도, 심도 약 0.7m이다.

수중운동체의 자유항주 조종모형시험 절차는 Fig. 3과 같다. 시험속도에 도달하기 위한 가속구간에서의 모형선은 초기 심도에서 수평면 선수동요각을 유지하면서 속도가 증가된다. 속도가 증가하여 수직면 타력이 증가하면 1차 기본 심도제어를 통해 목표 심도로 심도

Table 3 Design criteria for submerged condition

	GBv (m)	Ixx (B)	Izz (L)	$\dot{\delta}_s$ [°/s]
Design	0.0267	0.35	0.25	27.5
Measure	0.0239	0.37	0.25	14.6

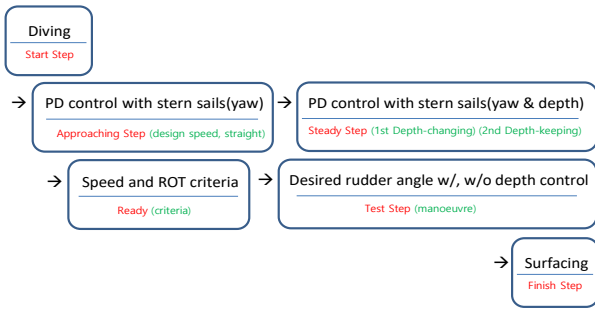


Fig. 3 Procedure of snorkel tests



Fig. 4 BB2 model in snorkel-ready condition



Fig. 5 Model tests pictures



Fig. 6 Surfacing after depth control tests

변경을 하게 되고, 이후 2차 상세 심도제어를 통하여 심도를 정확히 수렴 및 유지하도록 한다. 선수동요각 제어는 심도 변경 중에도 계속 유지된다. 정속 및 직진 수렴상태에 도달하면, 원하는 대표 선미 수직타각을 사용하는 수평면 선회시험, 지그재그시험 등이 수행된다. 조종시험 중 심도 유지 기능은 적용 여부를 설정할 수 있다. 심도제어 혹은 조종시험 수행이 완료되면 특정 대표 선미수평타각을 사용하여 모형을 수면 위로 부상시키고, 시험이 자동 종료된다.

Fig. 4는 BB2 모형선의 수중상태 사진이고, Fig. 5는 육지에서

수행된 심도제어 및 조종모형시험 중의 사진이다. 모형시험은 안전상의 이유로 부득이하게 세일부에 가벼운 안전줄이 연결된 상태에서 수행되었고, 수면 근처 시험 중 안전줄은 수면 위로 느슨하게 유지되었다. 세일부 상단에는 안전줄을 연결하기 위한 부가물과 일부 안테나 등이 노출되어 있다. Fig. 6은 정해진 절차에 따라 심도제어 모형시험 종료 이후 부상 중인 모형선의 모습이다.

2.3 심도제어 알고리즘 및 중립운항상태

수중운동체의 수중상태 모형시험 수행을 위한 실용적인 심도제어 알고리즘을 개발하였다. 식 (3)과 같이 목표 심도값과 현재 심도값 차이를 이용하여 종동요각(pitch angle) 명령을 계산하고 이를 추종하기 위한 종동요각 제어로 구성된 알고리즘이다. 이는 수평면의 경유점 제어 방식과 유사하다. 단, 명령 종동요각은 심도오차 및 오차 변화율을 고려하여 계산하며, 명령 종동요각을 추종하기 위한 종동요각 제어는 PD 제어를 적용하였다. Fig. 7은 개발된 심도제어 알고리즘에 대한 개념도이다.

BB2 선형의 경우 X타로 설계되어 있기 때문에, 수직면 종동요각 제어에서 도출된 대표 선미수평타 명령값과 수평면 선수동요각 제어에서 도출된 대표 선미수직타 명령값을 식 (1)과 (2)에 따라 각각의 타에 동일한 크기로 분리 적용하여 타각을 제어하였다. 이를 통하여 조종시험 중 심도제어 기능이 적용된 경우에도 조종시험 항목별 대표 타각은 시험 중 대부분 유지되었다.

모형선 심도제어 알고리즘이 적용된 상태에서 모형선이 직진 운항하게 되면, 해당 심도에서 특정 종동요각 및 선미수평타각으로 수렴하는 운항상태에 도달하게 된다. 이 상태는 수직면 평면에서 선체에 작용하는 상하방향 힘과 종동요모멘트가 0인 중립운항상태와 유사한 단계로, Fig. 7에서 설명하는 목표 심도 근처의 마지막 수렴 단계이다.

수중운동체의 자유항주모형시험을 제한된 영역에서 효율적으로 수행하기 위해서는 심도제어 알고리즘이 모형선이 중립운항상태에 빠르게 도달할 수 있도록 작동해야 한다. Fig. 8은 본시험 수행 전, 이와 같은 목적을 달성하기 위해 수행된 선박해양플랜트연구소 내 예인수조 모형시험의 모습이며, 이를 통하여 적절한 제어 이득 값을 사전에 결정하였다.

$$Elev_{COM} = P_{gain_p} \times (\theta_{desired} - \theta) + D_{gain_p} (\dot{\theta}_{desired} - \dot{\theta}) \quad (3)$$

$$\theta_{desired} = P_{gain_D} \times (Z_{desired} - Z) + D_{gain_D} (\dot{Z}_{desired} - \dot{Z})$$

$$\theta_{desired} \leq \theta_{Max}, \quad \dot{\theta}_{desired} = 0, \quad \dot{Z}_{desired} = 0$$

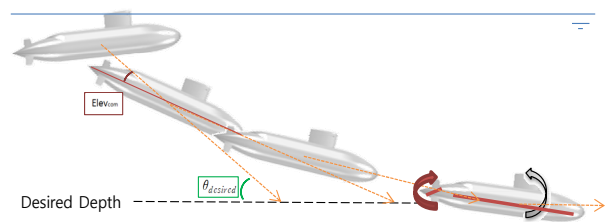


Fig. 7 Depth control algorithm for underwater vehicles

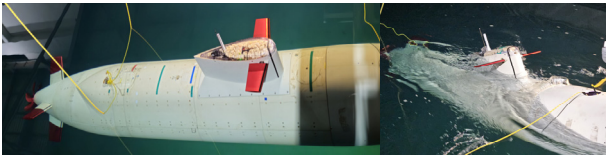


Fig. 8 BB2 model in towing tank

3. 조종모형시험 결과

3.1 심도 변경 및 유지 시험 결과

Table 4는 수면 근처 및 수중조건에서 수행된 심도 변경 및 유지 시험의 상세 시험 항목이다. Fig. 9는 Fig. 3의 절차를 바탕으로 구성된 심도제어시험의 구간 설명 그림이다. BB2 모형선은 초기 심도에서 시험속도에 도달하는 S구간(Start)을 거친 후, 심도제어를 통하여 두 구간(A, B)에서 심도 변경 및 유지를 수행한 후 부상한다. 목표 심도는 단계별로 최대 3.1m까지 설정하였고, 수중에서 상하 양방향으로 심도 변경 시험이 수행될 수 있도록 구성하였다. 부상 F구간(Finish)은 고정된 대표 선미수평타각을 사용하여 수중운동체가 충분히 부상할 때까지 운용되었다.

Table 5는 선미타각만을 사용한 심도제어시험을 구간별로 분석한 결과이다. 수면에서 가장 가까운 목표 심도 1.3m 결과의 경우 평균 심도오차는 약 -0.05m, 종동요각은 -2.76도, 대표 선미수평타각은 -0.74도로 계속되었다. 여기서 평균 종동요각 및 대표 선미수평타각은 앞서 설명한 선체에 작용하는 힘과 모멘트가 0에 수렴한 중립운항에 가까운 상태라 표현할 수 있다. 다시 말하면, 음의 방향의 종동요각과 대표 선미수평타각에 의해 발생하는 힘과 모멘트가 선체 및 세일부 등에 의해 발생하는 힘과 모멘트를 상쇄시키는 것을 의미한다.

목표 심도가 깊어질수록 심도제어 시 심도오차와 종동요각, 대표 선미수평타각의 크기가 조금씩 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 수면 근처에서의 수직면 심도에 따른 선체력의 변화와 관계가 깊지만, 심도 약 1.7m 이후 물속으로 들어간 안전줄에 의한 영향이 포함된 것으로 판단된다.

Table 4 Depth control test scenario details

Test No.	Target depth/elevator			
	S (m)	A (m)	B (m)	F (°)
DC1	0.7	0.7	1.3	20
DC2		1.3	0.7	
DC3		1.3	1.9	
DC4		1.9	1.3	
DC5		1.9	3.1	
DC6		3.1	1.9	

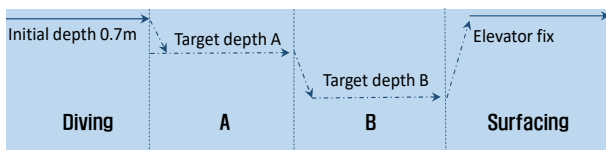


Fig. 9 Step of depth control test

Table 5 Results of depth control tests

Test No.	Target depth (m)	Depth [error] (m)	Pitch (°)	Elevator (°)
DC1-B	1.3	1.24 [-0.06]	-2.75	-0.78
DC2-A	1.3	1.26 [-0.04]	-2.62	-0.61
DC3-A	1.3	1.29 [-0.01]	-2.60	-0.75
DC3-B	1.9	1.78 [-0.12]	-2.97	-1.89
DC4-A	1.9	1.72 [-0.18]	-3.51	-2.17
DC4-B	1.3	1.22 [-0.08]	-3.07	-0.81
DC5-A	1.9	1.72 [-0.18]	-3.48	-2.30
DC5-B	3.1	2.90 [-0.20]	-3.28	-3.25
DC6-A	3.1	2.88 [-0.22]	-3.36	-3.89
DC6-B	1.9	1.73 [-0.17]	-3.67	-2.34
DC7-A	3.1	2.82 [-0.28]	-3.77	-3.04

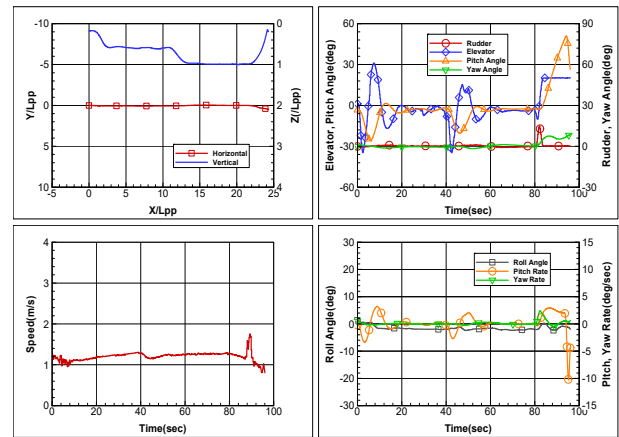


Fig. 10 Surfacing test after depth control test

Fig. 10은 목표 심도 약 5m에서의 심도제어 이후 20도의 대표 선미수평타각으로 부상한 시험 결과이다. 3.1m, 5m로 목표 심도가 두 구간에서 깊어짐에 따라 전진방향 유체력(저항성분) 변화에 따른 속도 증가가 구간별로 관찰된다. 또한 최대 30도 내외의 대표 선미수평타각을 사용하여 종동요각을 동반한 심도 변경 중일 때 속도 감소도 동시에 관찰된다. BB2 모형선의 경우, 짧은 부상구간임에도 불구하고 20도의 대표 선미수평타각을 사용하였을 때, 최대 종동요각이 50도 가까이 계속되었다.

3.2 선회, 지그재그 시험 결과

수면 근처의 심도제어시험을 통하여 검증된 심도제어 알고리즘을 활용하여, 스노클조건에서의 조종모형시험을 수행하였다. 스노클 항해임에도 불구하고, 모형시험의 경우 타각의 사용량은 대각도를 고려하였다. 스노클조건에서의 조종모형시험 역시 선박해양플랜트 연구소 예인수조에서 사전시험이 진행된 이후 옥외에서 본시험이 진행되었다. 사전시험 시 약 5도 내외의 지그재그시험을 통하여 심도제어 알고리즘이 적용, 미적용된 경우의 심도변화 결과를 서로

Table 6 Manoeuvre tests at snorkel depth

Test No.	A, B (m)	Manoeuvre (°)
M1	1.0	Turn ±30 (-30 w/o DC)
M2		Turn ±20 (-20 w/o DC)
M3		Turn ±10
M4		Turn ±5
M5		Zigzag ±20/20
M6		Zigzag ±10/10

Table 7 Turning indices at snorkel depth

Index	PORT/STBD mean values			
	30	20	10	5
Turn manoeuvre (°)	30	20	10	5
Advance (L)	2.42	2.86	4.05	6.09
Time to reach Ad (s)	11.9	13.4	18.9	28.9
Tactical diameter (L)	2.91	3.40	5.71	9.22
Time to reach TD (s)	23.6	25.3	35.4	54.2
Max. yaw rate (°/s)	10.3	8.7	5.7	3.8
Max. roll angle (°)	13.0	12.1	9.0	5.5

비교하였고, 좌우현 5도 타각 적용 시 초기 변침 단계에서 BB2 모형선에 부상하는 힘이 발생함을 사전 확인하였다(Yun et al., 2024).

Table 6은 스노클조건에서 수행된 수중운동체의 조종모형시험 상세 시험 항목이다. 시작 및 종료 단계인 S, F구간은 심도제어시험과 동일한 절차대로 진행되었고, 조종시험 시작 전 A, B구간은 1.0m 목표 심도로 동일하게 설정되었다. 일부 선회시험은 수중운동체의 순수한 동적특성 확인을 위하여 선회 중 심도 유지 기능을 적용하지 않고 수행하였다. 모형선의 시험속도인 약 1.3m/s는 실선기준 10노트에 대응되는 속도이다.

Table 7은 스노클조건에서의 BB2 모형선의 심도 유지 중 좌우현 선회시험 평균 상세 결과이다. 선회시험의 경우 1회전에 대하여 분석한 결과로, 궤적 등에 대한 조류 영향 보정은 적용되지 않았다.

선회 타각에 따른 수평면 선회 특성을 살펴보면, 타각이 커질수록 전진거리 및 전술선회직경이 작아지고, 최대 선수동요각속도 및 횡동요각이 커지는 일반적인 선회경향을 확인할 수 있다. 스노클조건에서의 10도 및 20도 선회결과는 수상조건 대비 전진거리 및 전술선회직경이 약 60~70% 정도로 감소되었다. 이는 수상조건 대비 4개의 개별 선미터가 모두 수중에서 타력이 발생함을 고려할 때 타당한 결과라 판단된다.

선회 시 최대 횡동요각은 내방경사로 발생하며, 수상조건과는 다르게 선회 중 지속되는 것이 확인되었다. 이는 30도, 20도, 10도 좌우현 선회시험에 대한 상세 궤적 그림인 Figs. 11~16에서 확인할 수 있다. 20도 이상의 타각을 사용한 선회시험의 경우 선회 초기에 모형선의 심도가 깊어지는 경향을 확인할 수 있고, 목표 심도를 유지 하기 위한 대표 선미수평타각의 움직임 확인 할 수 있다. 또한 선회 타각이 작을수록 심도제어에 사용된 대표 선미수평타각 및 유지 심도의 변화량이 작은 것을 볼 수 있고, 이는 심도변화를 일으키는 선체 및 타의 유체력 변화가 선회 시 작게 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

선회지수라는 조종성능 측면에서 심도제어의 적용, 미적용 결과를 서로 비교해서 보면, Table 8과 같이 20도 이상의 선회시험에서는 그 결과 차이가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 전진거리, 전술선회직경 및 두 지수까지 도달하는 시간이 유사하다. 다만, 심도제어 기능이 미적용되었을 때 최대 횡동요각이 조금 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Table 9는 스노클조건에서의 BB2 모형선의 심도 유지 중 좌우현 지그재그시험 평균 상세 결과이다. 지그재그 타각이 커질수록 1, 2차 오버슈트각이 커지는 일반적인 변침 특성을 확인할 수 있다.

20/20, 10/10 좌우현 지그재그시험에 대한 상세 궤적 그림은 Figs. 17~20과 같다. 선회 결과와 동일하게 지그재그 변침 시 선수동요각속도와 동일한 부호의 횡동요 내방경사가 발생하는 것을 재확인할 수 있다.

Table 8 Turning indices comparison(depth control)

Index	w/o DC		w/ DC	
	-30	-20	-30	-20
Turn manoeuvre(°)	-30	-20	-30	-20
Advance (L)	2.42	2.93	2.44	2.87
Time to reach Ad (s)	11.4	13.2	11.9	13.5
Tactical diameter (L)	2.75	3.57	2.97	3.54
Time to reach TD (s)	23.1	26.1	23.7	25.5
Max. yaw rate (°/s)	10.5	8.8	10.3	8.7
Max. roll angle (°)	15.2	15.7	13.8	12.8

Table 9 Zigzag indices at snorkel depth

Index	STBD/PORT mean value	
	20/20	10/10
Zigzag manoeuvre (°)	20/20	10/10
First OA (°)	17.33	7.97
Time to reach first OA (s)	8.4	7.9
Second OA (°)	13.84	9.89
Time to reach second OA (s)	21.4	19.4

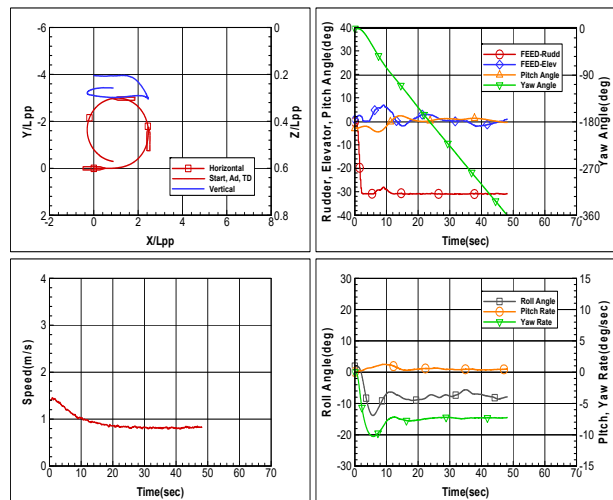


Fig. 11 PORT -30 turning test with depth control

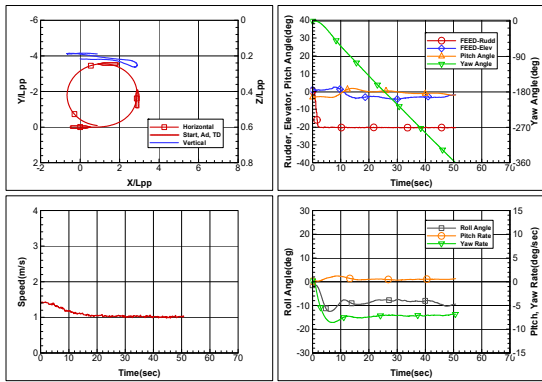


Fig. 12 PORT -20 turning test with depth control

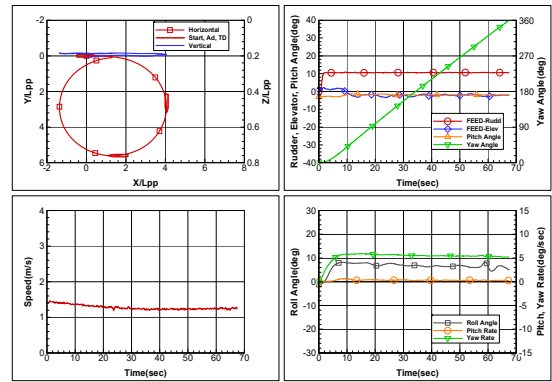


Fig. 16 STBD 10 turning test with depth control

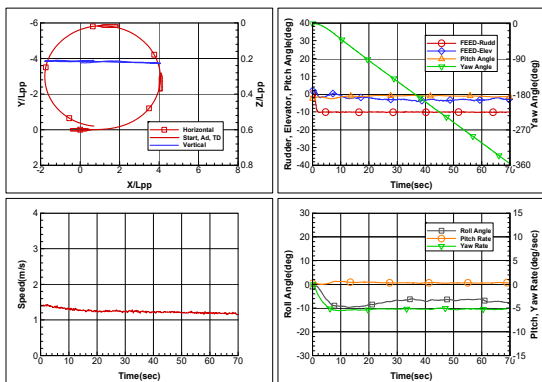


Fig. 13 PORT -10 turning test with depth control

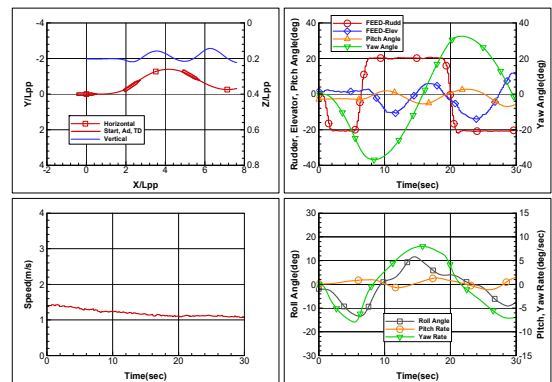


Fig. 17 PORT -20/20 Zigzag test with depth control

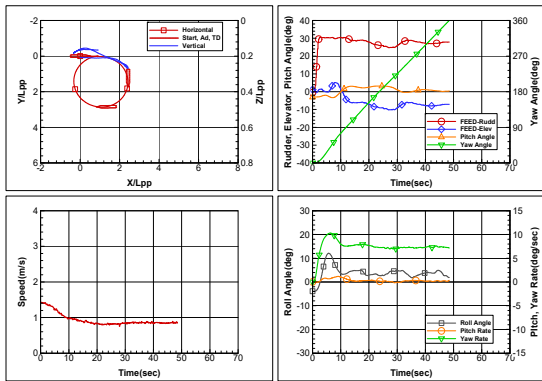


Fig. 14 STBD 30 turning test with depth control

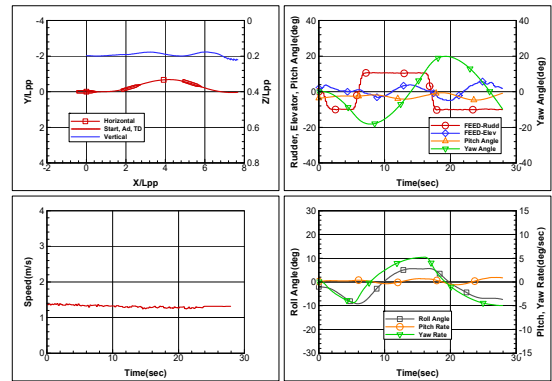


Fig. 18 PORT -10/10 Zigzag test with depth control

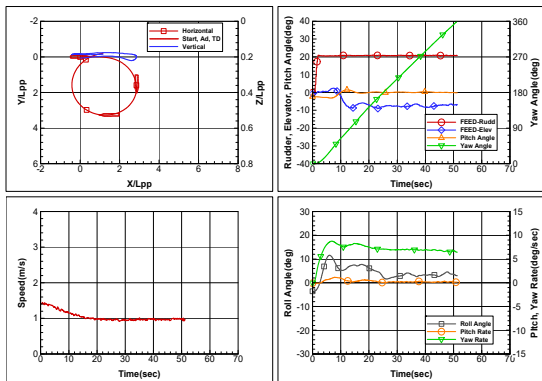


Fig. 15 STBD 20 turning test with depth control

또한 지그재그 타각이 작을수록 심도제어에 사용된 대표 선미 수평타각 및 유지 심도의 변화량이 작은 것도 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결론

수중운동체의 조종성능을 직접적으로 추정하기 위한 방법으로 자유항주모형시험 기법을 개발하였다. 개발된 수중운동체용 자유항주모형시험 시스템과 절차를 활용하여, 공개된 선형인 BB2 선형을 대상으로 실선대용 10노트 속도의 스노클조건에서 조종모형시험을 수행하였다. 이를 위하여 수면 근처에서의 심도제어 기법을 개발하여 그 성능을 검증하였다.

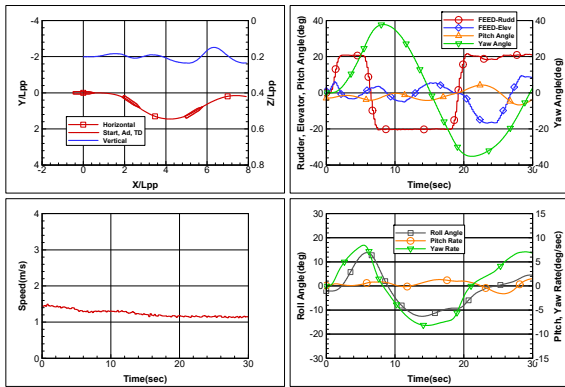


Fig. 19 STBD 20/20 Zigzag test with depth control

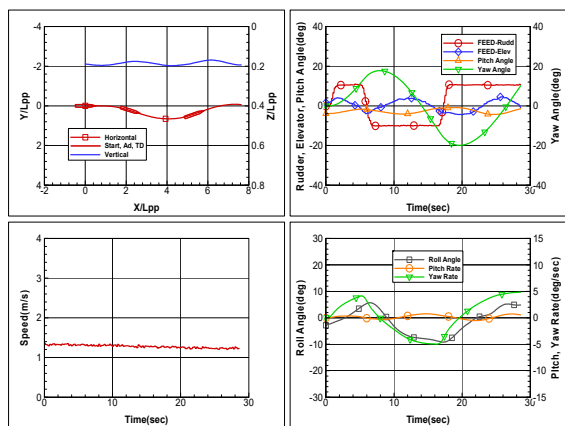


Fig. 20 STBD 10/10 Zigzag test with depth control

스노클조건에서 수행된 심도제어시험은 평균 심도오차 0.05m 정도의 우수한 성능을 보여주며, 적용된 심도제어 기법은 모형시험 수행을 위한 실용적인 알고리즘으로 판단된다. 스노클조건에서의 선회시험 및 지그재그시험 수행 결과, 심도제어 적용 여부가 선회지수에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였고, 심도제어가 적용된 상태에서 다양한 타각에 대한 선회 특성과 지그재그 변침 특성을 확인하였다.

자유항주모형시험을 통해 획득된 BB2 선형의 스노클조건 조종 시험 결과는 수중운동체의 벤치마크용 데이터로 활용될 계획이다.

향후 연구 사항으로는 선수타 단독 및 선수타와 선미타가 복합적으로 사용된 조종모형시험이 필요하며, 특히 스노클조건에서는 해상에서의 실험 운항 상황을 고려하여, 규칙파/불규칙파 등 파랑 중에서의 심도제어 및 조종성능 변화에 대한 연구가 더 필요하다. 본 연구 이후, 수중조건에 대한 조종모형시험 결과에 대한 후속 연구 논문이 계획되어 있으며, 수상/스노클/수중 조건에 대한 전산유체해석 및 구속모형시험 시뮬레이션 비교 결과도 제시될 예정이다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요연구사업 “수중운동체 운항성능 통합 추정 기술개발(5/5)

[PES5070]”, “소형모듈원전(SMR) 추진 선박-해양플랜트 개념설계 연구(2/5)[PES5490]”의 연구 결과 중 일부이며, 본 논문의 실험 및 해석자료는 향후 선박해양 플랜트연구소 홈페이지를 통하여 공개될 예정입니다. 자유항주모형 시험에 사용된 BB2 선형은 네덜란드 MARIN에서 제공한 것임을 밝힙니다.

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.

Cho, Y.J., Seok, W., Cheon, K.H. and Rhee, S.H., 2020. Maneuvering simulation of an X-plane submarine using computational fluid dynamics, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp.843-855.

Cho, S., Yun, K., Lee, Y., Park, J. and Choi, J., 2023. A study on the free running model test method for BB2 submarine. *International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry*, Istanbul, Turkiye, 24-26 October 2023.

Cho, S., Yun, K., Lee, Y. and Park, J., 2024. Free running model tests for estimating the maneuverability of underwater vehicles under surface condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 61(6), pp.508-516.

Kim, D.H., Kim, J., Baek, H.M., Choi, Y.M., Shin, J.H., Lee, J., Shin, S.C., Shin, Y.H., Chae, E.J., Kim, E.S. and Kim, Y., 2024. Experimental investigation on a generic submarine hydrodynamic model considering the interaction effects of hull motion states and control planes. *Ocean Engineering*, 298, 116878.

Kim, D.J., Kwon, C.S., Lee, Y.Y., Kim, Y.G. and Yun, K., 2024. Practical 6-DoF manoeuvring simulation of a BB2 submarine near the free surface. *Ocean Engineering*, 312(3), 119334.

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 Architects of Korea*, 49(4), pp.296-303.

Kwon, C.S., Kim, D.J., Yun, K. and Kim, Y.G., 2022a. A captive model test on hydrodynamic force and neutral level flight of BB2 submarine in straight operation at near free surface with different depths. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(5), pp.287-294.

Kwon, C.S., Kim, D.J., Lee, Y.Y., Kim, Y.G., Yun, K. and Cho, S., 2022b. Prediction of maneuverability of a submarine at surface condition by captive model test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(6), pp.423-431.

- Lee, J., Kim, S., Shin, J. and Ahn, J., 2023. Submarine free running model development and basic performance analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 60(4), pp.256–265.
- Lee, Y., Choi, J., Ko, N.Y., Kim, T. and Choi, H.T., 2017. Experimental result of real-time sonar-based SLAM for underwater robot. *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, 54(3), pp.524–534.
- Overpelt, B., Nienhuis, B. and Anderson, B., 2015. Free running manoeuvring model tests on a modern generic SSK class submarine (BB2). *Pacific International Maritime Conference*, Sydney, Australia, 6 October 2015.
- Park, J.Y., Kim, N. and Shin, Y.K., 2017. A study on the safety operational envelope of a submarine in jamming. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(4), pp.301–311.
- Park, J.Y., You, Y., Jeon, M. and Yoon, H.K., 2022. Design of guidance and control system for X-plane submarine. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 59(5), pp.306–313.
- Park, J.Y., Kim, N., Yoon, H.K., Kim, S.Y. and Cho, H., 2015. Depth controller design for submerged body moving near free surface based on adaptive control. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(3), pp.270–282.
- Yun, K., Cho, S., Lee, Y., Park, J. and Yeo, D.J., 2024. Development of free running model test system for underwater vehicles. *21st Asian Conference on Maritime System and Safety Research*, Kaohsiung, Taiwan, 27–28 June 2024.
- Maritime Research Institute Netherlands (MARIN), Available at: <https://www.marin.nl/en/markets/defence/naval-subsurface-vessel-hydrodynamic-design-services> [Accessed 16 Jan 2025].
- QinetiQ, Available at: <https://www.qinetiq.com/en/what-we-do/test-and-evaluation/underwater-test-and-evaluation> [Accessed 16 Jan 2025].

