



자유수면 근처에서 직진하는 BB2 잠수함의 심도별 유체력과 중립운항에 대한 구속모형시험 연구

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

A Captive Model Test on Hydrodynamic Force and Neutral Level Flight of BB2 Submarine in Straight Operation at Near Free Surface with Different Depths

Chang-Seop Kwon[†]·Dong-Jin Kim·Kunhang Yun·Yeon-Gyu Kim
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 study, the force and moment acting on a Joubert BB2 submarine model at depths near the free surface were measured through a captive model test with the scale ratio of 1/15. Based on the experiment, the pitch moment and heave force due to the "Tail suction effect", including the change in surge force with depth near the free surface, were quantitatively analyzed. The change of force and moment according to the relative position of the sail and the free surface was reviewed with the free surface waves generated for each depths. As a result, the angle of attack of the hull to counteract the pitch moment induced by the tail suction effect was derived. The effect of the hydrostatic moment component according to the angle of attack on the equilibrium of pitch moment was also taken into account. The control plane performance tests for the X-type rudder and sail plane were conducted in snorkel and surface depth conditions to figure out the control plane angles for the neutral level flight of the submarine at near free surface. The results of this study are expected to be used as a reference data for the neutral level flight of the submarine at near free surface operation in the free running model test as well as numerical studies.

Keywords : Neutral level flight(중립운항), Near free surface(수면 근처), Tail suction(선미 흡입), BB2 submarine(BB2 잠수함)

1. 서론

잠수함은 은밀성을 기반으로 현대 해상 방어에서 중요한 전략적 역할을 담당하고 있다. 잠수함은 수중에서 운용될 때, 선체 상부의 세일부에 작용하는 저항의 영향으로 선수가 연직 상방으로 들어 올려지는 선미 트림이 발생하고, 선체가 상승하려는 힘을 받아 심도 변화가 발생할 수 있다. 심도를 유지하며 똑바로 나아가는 중립운항(neutral level flight) 상태 (Sohn et al. 2006)를 유지하기 위해서는 Fig. 1과 같이 선체 받음각(angle of attack)을 조절하거나 함미타, 세일 수평타(sail plane) 또는 함수 수평타 등의 제어판(control plane)을 이용하는 방법, 그리고 트림 탱크(trim tank) 및 보상 탱크(compensate tank)를 이용하는 방법들의 다양한 조합이 적용될 수 있다. 잠수함은 수중에서의 운용도 중요하지만, 실제로는 수중뿐만 아니라 스노클,

수상 항해와 같이 자유수면 근처에서의 다양한 심도에서 운용된다. 특히 스노클 항해와 같이 자유수면 근처에서 운항할 때에는 자유수면과 선체 상부 사이의 간격이 좁아지면서 유속이 빨라지고 압력이 낮아져 선미부가 자유수면으로 당겨지는 선미 흡입(tail suction) 현상이 나타난다 (Toliver 1996; Carrica et al. 2019). 즉 수면 근처에서는 함의 운용을 위한 환경조건이 복잡해지고, 스노클 항해 중 심도유지를 위해서는 이를 고려하여 중립운항 조건을 분석하는 것이 매우 중요하다.

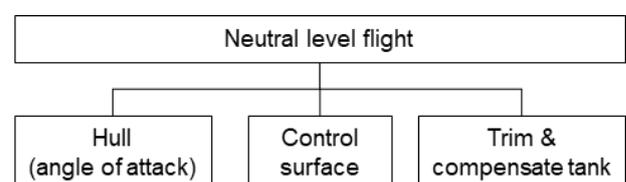


Fig. 1 Methods for neutral level flight

잠수함의 자유수면 근처 심도에서의 유체력 변화에 대해서는 CFD를 활용한 연구가 다수 수행되어 왔다 (Griffin, 2002; Zhang and Zhang, 2014; Conway et al., 2018; Vasileva and Kyulevcheliev, 2018; Kim, 2021). Torunski (2018)는 RANS CFD 코드인 ReFRESCO를 활용하여 BB2 잠수함 선형에 대해 심도에 따른 직진, 사향 상태에서의 선체력을 분석하였고, 이를 통해 수중 조건 대비하여 자유수면 근처에서 선체력이 증가함을 보였다. Carrica et al. (2019)은 BB2 잠수함을 대상으로 RANS CFD 코드를 활용하여 수치 자유항주 시뮬레이션을 수행하였고, 자유수면 근처에서의 심도별 영향을 분석하였다. 이처럼 잠수함의 자유수면 근처 운용 조건에 대해 다수의 CFD 연구가 수행되어 왔으나, 수치해석적 연구 결과를 뒷받침할 만한 실험 기반 연구 자료는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 형상이 공개되고 X형 함미타가 적용된 BB2 잠수함 선형을 이용하여 구속모형시험을 통해 자유수면 근처에서 심도별 수중체에 작용하는 힘을 계속하였다. 이를 바탕으로 BB2 잠수함의 수면 근처에서의 심도별 선체 길이 방향 힘의 변화, 선미 흡입 영향을 정량적으로 분석하고 종동요 모멘트를 상쇄시키기 위한 받음각을 도출하였다. 또한 제어판 성능 시험을 수행하여 종립 운항을 위한 제어판 운용 방안을 도출하였다. 이는 추후의 자유항주모형시험 연구를 위해 필요한 트림 및 보상 탱크 용량 산정, 그리고 제어판 운용 여유 등을 분석하는 기반 자료로 활용될 계획이다.

2. 구속모형시험

대상 잠수함 선형은 Fig. 2와 같이 Joubert BB2 이며, 모형 축척비는 1/15에 해당된다. 대상 잠수함의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 좌표계는 Fig. 2과 같이 선수 방향이 X축, 연직 하방이 Z축을 가리키는 우수직교좌표계가 사용되었다. 원점 O는 구속모형시험에서의 힘과 모멘트 계측 중심점이다.

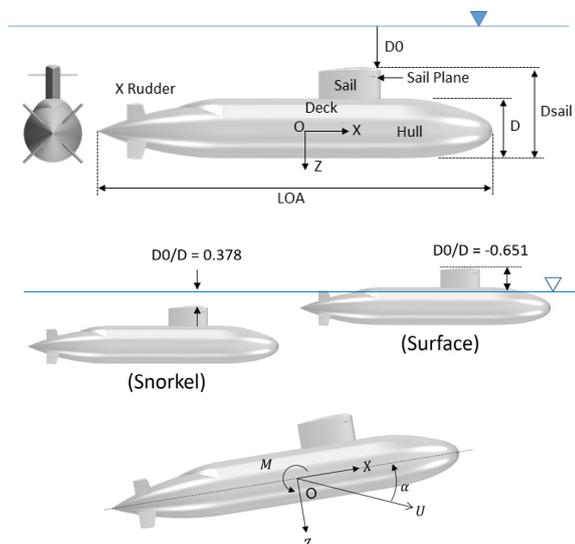


Fig. 2 BB2 submarine and coordinate system

모형시험은 Fig. 3와 같이 선박해양플랜트연구소의 선형시험 수조(Towing tank)에서 수행되었다. 선형시험수조의 길이, 폭, 수심은 200 x 16 x 7 m 이다. 수평면운동장치(Horizontal Planar Motion Mechanism, HPMM)를 이용하여 유선형 단면을 갖는 두 개의 수직 기둥(스트럿) 하단에 모형선을 고정하였다. 스트럿과 모형선 사이에는 Fig. 3의 아래 그림과 같이 6개의 단방향 힘 분력계와 1개의 모멘트 분력계를 설치하였다. 선수와 선미 스트럿 하단에 X, Y, Z축 방향으로 단방향 힘 분력계들을 각각 한 개씩 조합하여 설치함으로써 3축 힘을 계속하였고, 스트럿 사이의 간격 1.4 m 를 고려하여 선수동요와 종동요 모멘트를 계산하였다. 그리고 선미 스트럿에 설치한 모멘트 분력계를 이용하여 횡동요 모멘트를 측정하였다. HPMM 장비의 높이를 조절하여 심도를 변경하였고, 레이저 거리 측정기를 이용하여 수직 변위를 측정하였다.

Table 1 Principle dimensions of BB2 model

Item	Unit	Ship	Model
Scale	-	1	1/15
LOA	m	70.2	4.68
B	m	9.6	0.64
D	m	10.6	0.707
Dsail	m	16.2	1.08
Displacement	m ³	4365.2	1.293
(x_O, y_O, z_O) from nose, shaft	m	(33.63, 0, 0)	(2.242, 0, 0)
(x_G, y_G, z_G) from nose, shaft	m	(32.29, 0, 0.1)	(2.153, 0, 0.007)
(x_B, y_B, z_B) from nose, shaft	m	(32.29, 0, 0.5)	(2.153, 0, 0.033)

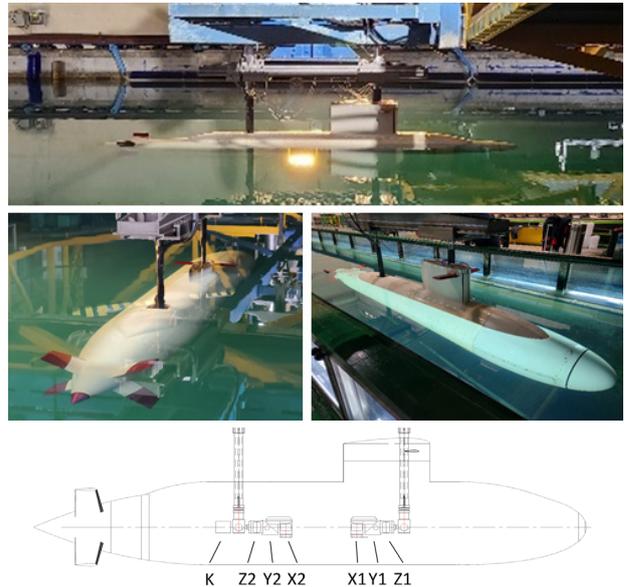


Fig. 3 Captive model test set-up

잠수함의 심도는 Fig. 2와 같이 수면에서부터 세일 상단까지의 거리인 D0로 정의된다. D0는 세일이 수면 아래에 있을 때 양수이고 세일이 수면 위로 드러나면 음수가 된다. 그리고 세일 상부가 수면에 닿을 때 D0는 0이 된다. 모형시험에서 고려된 심도는

Table 2 Submerged depths

Angle of attack (deg)		0	3.7	
D0/D	Surface	-0.651	-0.630	
	Depth change	After rise	-0.492	-0.505
		Rising	-0.368	-0.364
			-0.226	-0.222
	Before rise	-0.085	-0.081	
		0.057	0.061	
	Snorkel	0.198	0.241	
		0.378	N/A	

Figs. 2-3과 같이 스노클과 수상 조건 (Carrica et al. 2019)을 포함하여 모형 기준으로 약 0.1 m 간격이 고려되었다. 시험에서 고려된 심도 조건은 Table 2에 나타내었다. 심도는 D0/D와 같이 무차원화하여 표현하였다. 심도는 세일과 수면의 상대 위치를 바탕으로 세 구간으로 구분하였다. 세일 상단이 수면 밖으로 노출되기 전까지의 심도 구간을 부상 전(before rise) 구간으로, 세일 상단이 드러난 이후부터 세일부가 드러나는 구간을 부상(rising) 구간으로, 그리고 세일이 모두 드러나는 구간을 부상 후(after rise) 구간으로 구분하였다. 시험은 기본적으로 받음각 0도 조건에서 수행되었으며, 종동요 모멘트를 상세할 수 있는 받음각 분석을 위해서 받음각 3.7도 조건을 추가 고려하였다. 받음각은 Fig. 2 하단 그림과 같이 정의된다. 시험 속도는 실선 기준 10노트이며, Froude 수 상사에 따른 모형선 속도는 1.328 m/s에 해당된다.

3. 선체 시험 결과

자유수면 근처에서 심도에 따라 예측한 선체 길이 방향 힘(X), 상하 방향 힘(Z)과 종동요 모멘트(M)를 무차원화하여 Figs. 4-6에 나타내었다. 그래프에 표시된 값은 정지 상태에서의 예측값인 정유체력(Hydrostatic) 성분을 제외한 동유체력(Hydrodynamic) 성분에 해당된다. 기존의 CFD 결과 (Torunski 2018; Carrica et al. 2019)는 받음각 0도 조건에서 수행된 것이며, 현재의 받음각 0도 실험 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 심도에 따른 선체 길이 방향 힘의 변화를 나타낸다. 세일 상단이 수면 밖으로 노출되기 전인 부상 전까지는 함체가 상승함에 따라 선체 길이 방향 힘은 점차 증가되었다. 세일 상단이 수면 밖으로 드러나는 부상 구간에서는 반대로 선체 길이 방향 힘이 감소하였다. 세일이 대부분 노출되는 부상 이후 구간에서는 함체가 상승함에 따라 다시 선체 길이 방향 힘이 증가되었다. Fig. 7은 심도별 잠수함 위치와 수면파 형상을 나타낸다. 좌측 사진들은 받음각 0도 조건을, 우측 사진들은 받음각 3.7도 조건을 나타낸다. 심도에 따른 조파 현상을 비교해보면 Fig. 7에서 (a)로 표시된 부분과 같이 세일 상단이 수면 위로 약간 드러난 부상 구간에서 세일부에 의한 조파 현상이 매우 강하게 나타남을 알 수 있다. 세일이 대부분 노출된 이후부터는 함체가 상승하면서 세일부에 의한 조파 현상은 감소되나 Fig. 7에 (b)

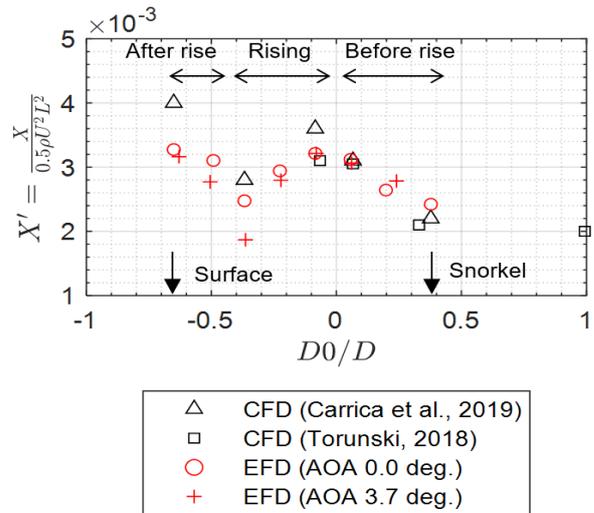


Fig. 4 Non-dimensional surge force with different depth

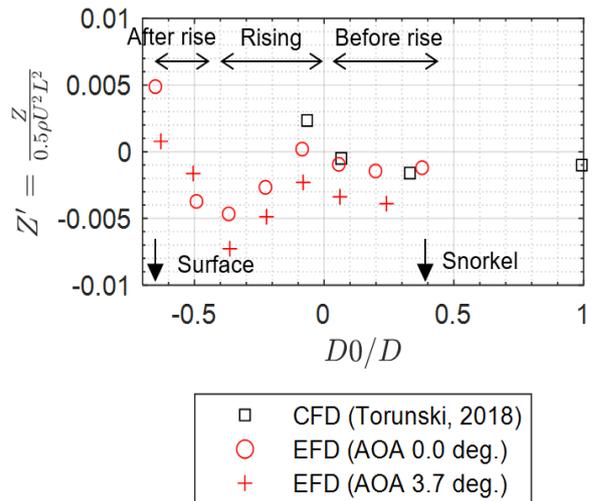


Fig. 5 Non-dimensional heave force with different depth

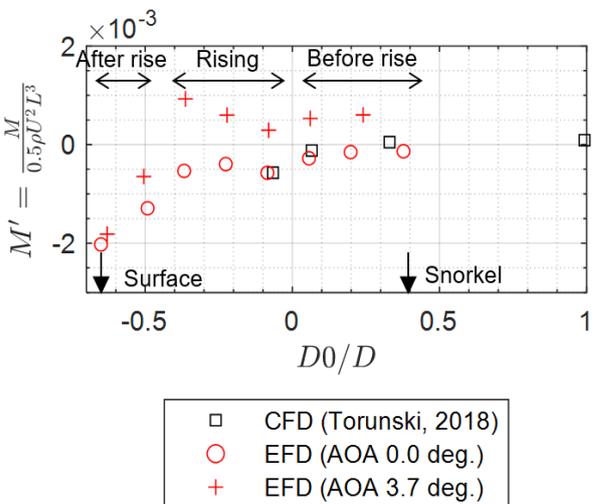


Fig. 6 Non-dimensional pitch moment with different depth

로 표시한 부분과 같이 선체 선수부에 의한 조파 현상이 관찰되었다. 이러한 현상은 받음각 3.7도 조건에서도 동일하게 나타났다. 심도에 따른 수면파를 관찰한 결과에 따르면, 부상 조건에서 함체가 상승하면서 선체 길이 방향 힘이 감소하는 원인 중 하나는 세일부에 발생하는 조파 현상의 감소로 추정된다. 그리고 부상 이후 조건에서 선체 길이 방향 힘이 다시 증가하는 원인 중 하나는 선수부에 의한 조파 현상이라고 보여진다. 심도별 선체 길이 방향 힘의 변화 원인에 대해서는 추후 보다 심도있는 연구가 필요하다고 사료된다.

Fig. 5는 심도별 상하 방향 힘의 변화를 보여준다. 받음각 0도 조건의 결과를 살펴보면, 스노클 심도에서 상하 방향 힘이 음수로 나타나 상승하려는 힘이 작용함을 알 수 있다. 부상 전 심도 영역에서는 함체가 상승할수록 상승력이 감소하였고, 부상 구간에서는 상승력이 증가하였다. 특히 $D0/D$ 가 -0.368 인 조건에서 상승력이 가장 강하게 나타났다. 수상 조건에서는 경향이 반대로 바뀌어 상하 방향 힘이 양수로 나타나 하강력이 발생하였다. 수상 조건에서는 Figs. 2-3에서 볼 수 있듯이 선체 상부의 갑판부(Deck)가 수면 위로 드러나 더 이상 선체 상부와 수면 사이의 흡입 현상이 발생하지 않고, 수상선에서 자연스럽게 나

타나는 침하(sinkage) 현상과 같이 선체 하부의 압력 저하 현상이 주된 영향을 미치지 때문이라고 보여진다. 한편, 받음각 3.7도 조건에서는 양력 발생의 영향으로 전체적으로 상승력이 더해지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 심도별 종동요 모멘트 변화를 보여준다. 받음각 0도 조건의 결과를 살펴보면, 함체가 상승할수록 종동요 모멘트 양의 방향으로 증가되는 현상이 나타났다. 부상 및 부상 이후 구간에서는 선미 흡입 현상뿐 만 아니라 수면 교란에 의한 함체 및 함미타의 받음각 변화 등의 영향이 발생할 수 있으며, 이에 대해서는 CFD 해석을 통한 압력 분포 분석 연구가 필요하다고 사료된다. 받음각 3.7도 조건에서는 양력 발생의 영향으로 종동요 모멘트가 양수로 나타났다. 그러나 수상 조건 근처에서는 받음각 3.7도에서도 종동요 모멘트가 여전히 음수로 나타나 양의 모멘트를 발생시키기에 받음각이 부족한 것으로 나타났다.

받음각 0도와 3.7도 조건에서 측정된 종동요 모멘트를 이용하여 종동요 모멘트가 0이 되는 받음각을 도출할 수 있다. 다만, 구속 모형 시험에서 초기화 이후 측정된 종동요 모멘트에는 앞서 설명한 비와 같이 동유체력 성분만 포함되므로, 실제 운항 상태에서 발생하는 받음각 0에 따른 정유체력 변화 성분을 함께

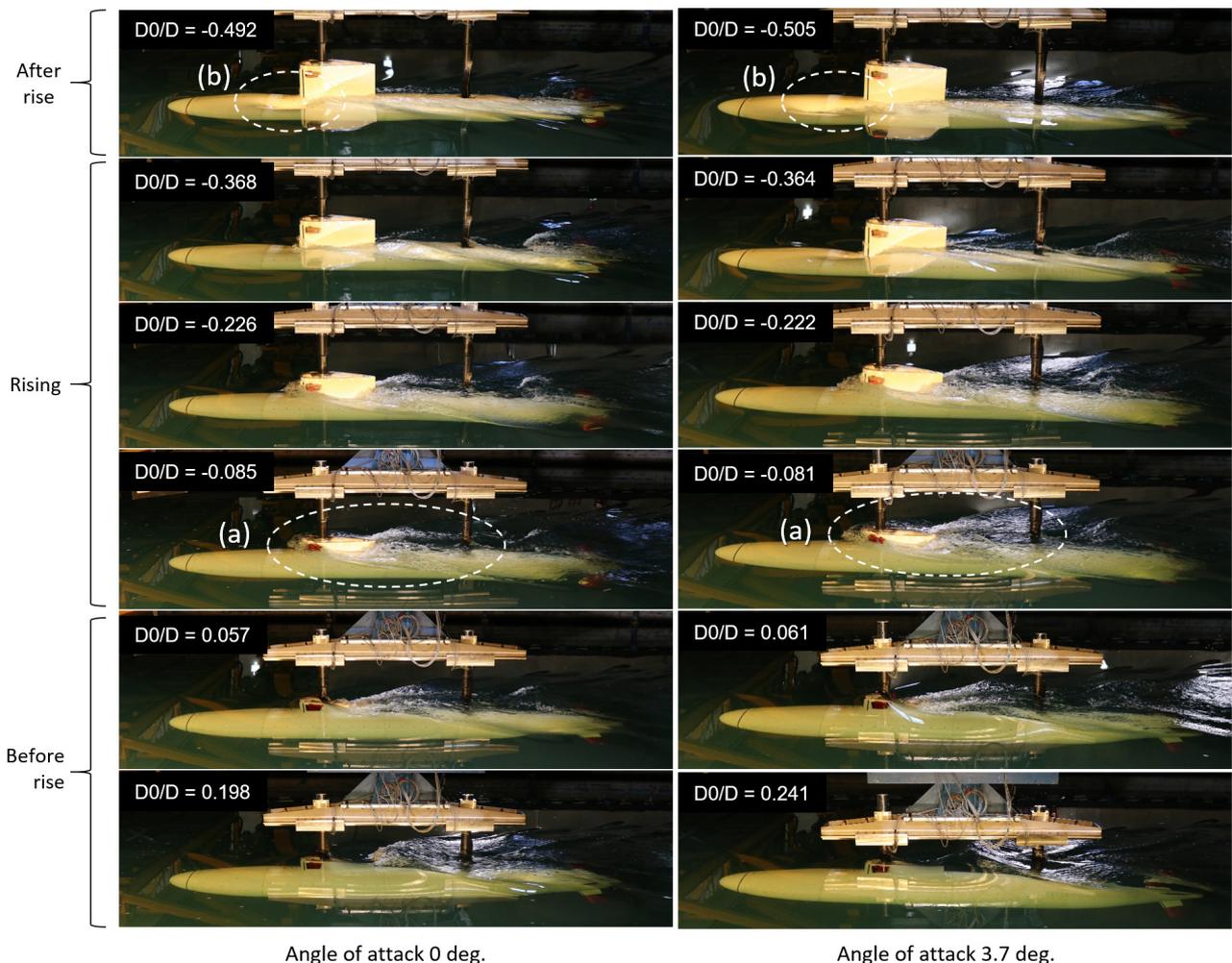


Fig. 7 Snapshots with different submerged depths

$$M_{HD}'(\theta) + M_{HS}'(\theta) = 0 \quad (1)$$

M_{HD}' : Nondimensional hydrodynamic moment
 M_{HS}' : Nondimensional hydrostatic moment

$$M_{HD}'(\theta) = a\theta + b$$

$$M_{HS}'(\theta) = -(z_G' W' - z_B' B') \sin\theta$$

$$\theta : \text{angle of attack (rad)}, z_G' = \frac{z_G}{L}, z_B' = \frac{z_B}{L}$$

$$W' : \text{Nondimensional weight (N)}$$

$$W' = \frac{W}{\frac{1}{2}\rho g L^3} = \frac{\rho g \nabla}{\frac{1}{2}\rho g L^3} = \frac{\nabla}{\frac{1}{2}L^3}$$

∇ : Displacement volume (m^3)
 B' : Nondimensional buoyancy (N)

$$B' = \frac{B}{\frac{1}{2}\rho g L^3}$$

$$\theta(\text{rad}) = \frac{b}{(z_G' - z_B') W' - a} \quad (2)$$

Table 3 Angle of attack to counteract the pitch moment

D0 _{avg} /D	a	b	θ (deg.)	
			Hydrostatic	
			w/o	w/
-0.366	0.02261	-0.00053	1.35	1.23
-0.224	0.01538	-0.00039	1.47	1.29
-0.083	0.01339	-0.00057	2.45	2.11
0.059	0.01253	-0.00028	1.27	1.08
0.219	0.01167	-0.00015	0.75	0.63

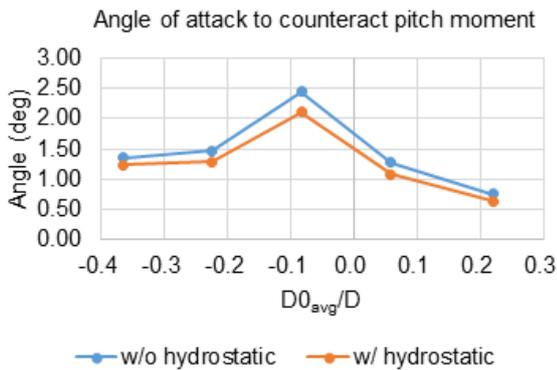


Fig. 8 Angle of attack to counteract the pitch moment

고려해주어야 한다. 식 (1)은 등속으로 직진하는 잠수함에 대해 종동요 모멘트가 평형이 되는 받음각 계산을 위한 식을 나타낸다. 종동요 모멘트의 동유체력 성분인 $M_{HD}(\theta)$ 는 받음각 0도와 3.7도에서 계측한 자료를 활용하여 1차식으로 가정하였다. 종량 W 와 부력 B 가 평형을 이루어 크기가 동일하고, 받음각이 미소하다고 가정하면, 종동요 모멘트가 평형이 되는 받음각은 식 (2)와 같이 표현된다. 식 (2)를 이용하여 받음각 3.7도에서 양의 종동요 모멘트가 발생된 심도 구간에 대해 도출된 종동요 모멘트 평형 조건의 받음각 계산 결과를 Table 3과 Fig. 8에 나타

내었다. D0_{avg}는 받음각 0도와 3.7도에서의 D0 평균값을 의미한다. 그리고 a, b는 식 (2)의 계수를, w/, w/o는 정유체력 포함 유/무를 의미한다. 세일이 노출되는 D0_{avg} 음수 구간에서는 노출되는 세일부 만큼 부력 중심과 무게 중심 위치가 변화된다. 본 연구에서는 노출된 세일부에 의한 부력과 무게중심 위치 변화까지는 고려하지 못하여, 이에 대해서는 추후 보다 정밀한 검토가 필요하다. 종동요 모멘트 평형을 위해 도출된 받음각은 정유체력을 고려하지 않았을 때 0.75 ~ 2.45도 범위, 정유체력을 고려했을 때 0.63 ~ 2.11도 범위로 분석되었다. 무게 중심과 부력 중심의 차이에서 기인하는 정유체력은 받음각이 있는 조건에서 복원 모멘트로 작용하기 때문에, 정유체력을 고려한 경우에 종동요 모멘트 평형을 위한 받음각이 다소 줄어드는 것을 알 수 있다. 실제 운항 조건에서는 정유체력이 작용하기 때문에 정유체력을 고려했을 때의 받음각 정보를 활용하는 것이 바람직하다.

종립운항을 위해서는 종동요 모멘트뿐만 아니라 심도 유지를 위해 상하 방향 힘의 평형도 고려되어야 한다. 자유수면 근처 심도에서 종동요 모멘트 평형을 위한 받음각 상태에서는 상하 방향 힘인 상승력이 발생하므로 받음각 조절만으로는 종립운항을 유지하는 데 한계가 있다. 종동요 모멘트와 상하 방향 힘의 평형을 위해서는 선체 받음각뿐만 아니라 제어판(Control plane)을 이용하거나 트림, 보상 탱크를 활용하는 다양한 방법이 있을 수 있다. 본 연구에서는 제어판을 이용한 종립운항에 대해 추가 검토를 수행하였다.

4. 제어판 시험 결과

스노클과 수상 조건에서 X형 함미타와 세일 수평타의 성능 시험을 수행하였다. X형 함미타와 세일 수평타의 제어판 각도는 Fig. 9의 좌측 그림과 같이 정의하였다. X형 함미타의 경우, 타에서 선체 바깥 방향을 향하는 축이 회전축이 된다. 세일 수평타는 좌현에서 우현으로 향하는 방향이 회전축이 된다. X형 함미타는 좌우 대칭이므로 좌현 하단의 1번타와 좌현 상단의 4번타에 대한 성능 시험이 수행되었다. 그리고 세일 수평타는 좌현과 우현이 동시에 같은 각도로 변화되었다. 제어판 각도는 -25도에서 25도 범위에 대해 5도 간격으로 변화되었다. Fig. 9와 10은 각각 수상과 스노클 조건에서 제어판 각도별 상하 방향 힘과 종동요 모멘트 계측 결과를 나타낸다. 선형 구간인 15도 구간에서의 기울기와 95% 신뢰구간을 각각 붉은색 실선과 점선으로 나타내었다. 수상 조건에서 좌현 상단의 4번타는 Fig. 9의 좌측 그림과 같이 타 일부가 수면 밖으로 노출되기 때문에 타에 의한 힘과 모멘트의 선형성이 다른 조건에 비해 저하되는 것으로 나타났다. 참고로, 수상 조건에서는 세일 수평타가 수면 밖으로 완전히 노출되어 시험이 수행되지 않았다. 수상, 스노클 심도에서의 세일 수평타와 X형 함미타의 상하 방향 힘과 종동요 모멘트에 대한 유체력 미계수값은 Table 4에 나타내었다. X형 함미타 2번과 3번의 유체력 미계수값은 각각 1번과 4번타 계측 결과의 대칭으로 가정하였다.

잠수함의 6자유도 조종운동 방정식 (Gertler and Hagen, 1967; Yeo and Rhee, 2006; Kim et al., 2012)에서 잠수함이 등속으로 직진하는 평형 상태를 가정하면 상하 방향과 종동요 방향 방정식은 식 (3)과 같이 표현된다. Z_0 와 M_0 는 받음각 0도 상태에서 선체에 작용하는 무차원화된 상하 방향 힘과 종동요 모멘트를 의미한다. X형 함미타의 경우, 4개의 방향타가 식 (4)와 같이 동일한 크기와 방향으로 움직인다고 가정하면 식 (3)은

식 (5), (6)과 같이 세일 수평타와 X형 함미타 중 1번 방향타 각에 대한 행렬식으로 표현된다. 식 (6)에 Fig. 5와 6의 받음각 0도 조건에 대한 상하 방향 힘(Z_0)와 종동요 모멘트값(M_0)을 입력하고, Table 4의 스노클, 수상 조건에서의 제어판 유체력 미계수를 활용하여 종립운항을 위한 세일 수평타와 X형 함미타의 제어판 각도를 도출한 결과를 Table 5와 Fig. 11에 나타내었다. 스노클 조건 경우에는 함미타와 세일 수평타를 모두 사용할 수 있어

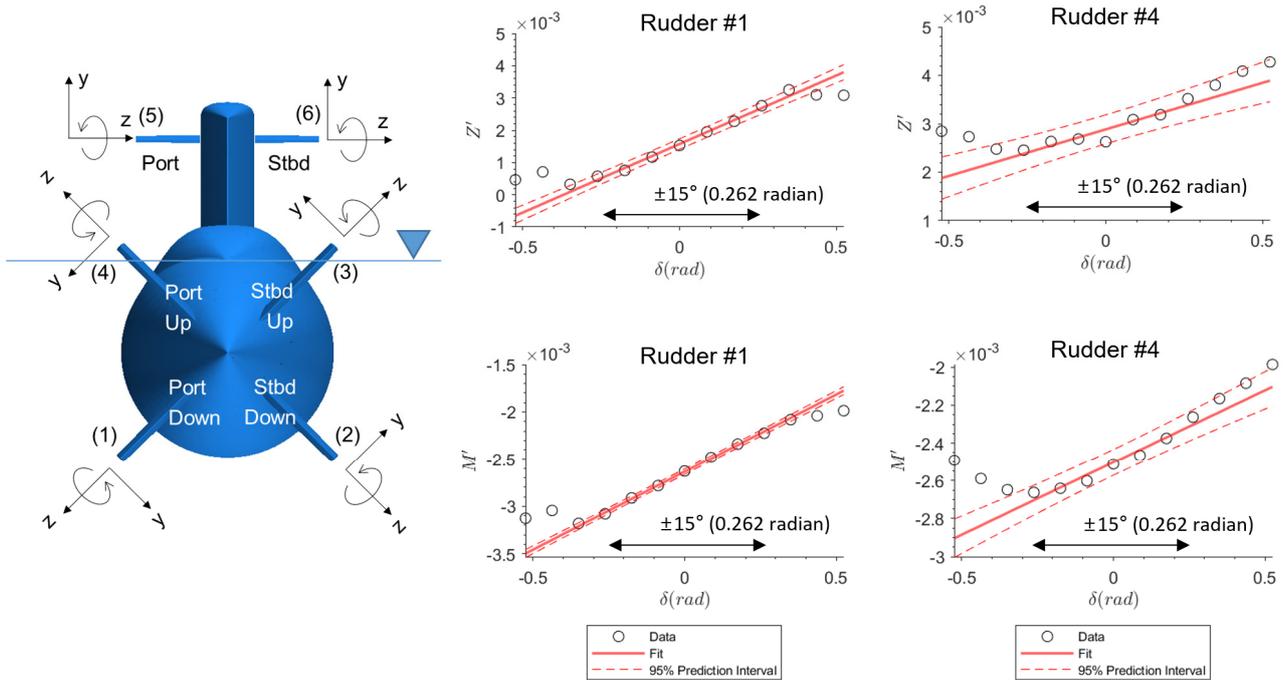


Fig. 9 Control plane test result - surface depth

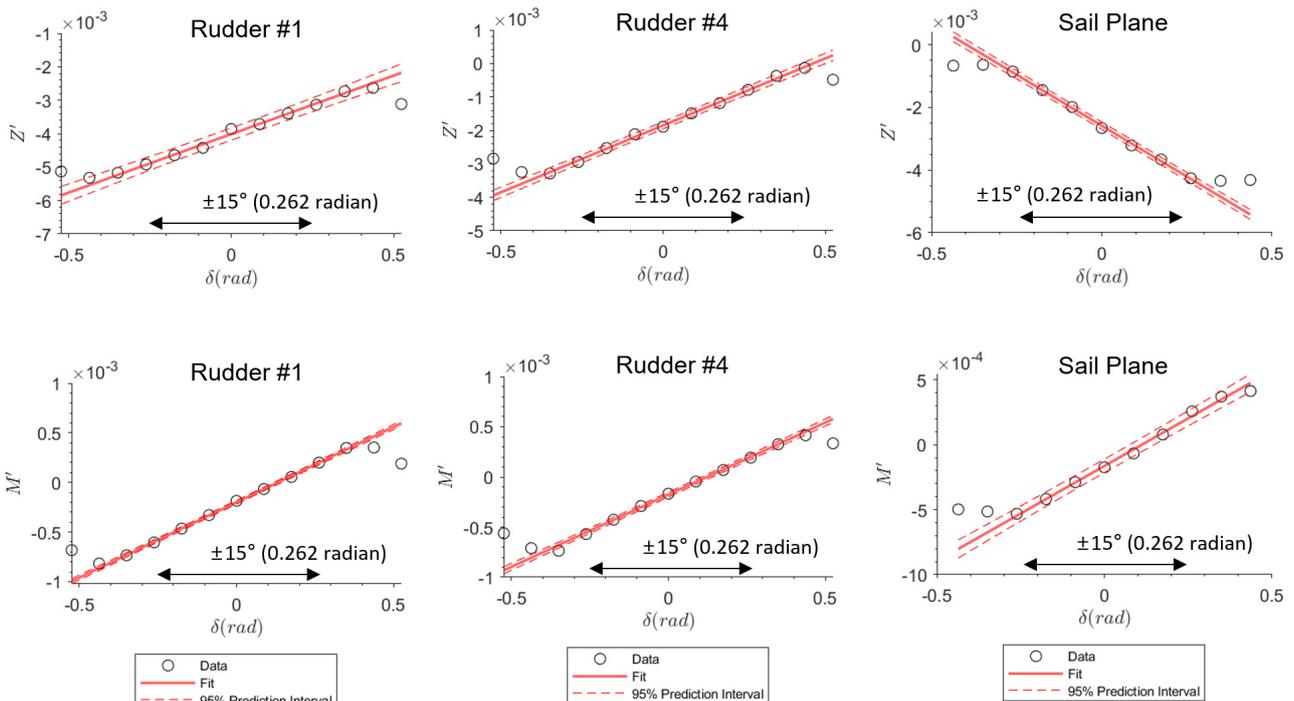


Fig. 10 Control plane test result - snorkel depth

Table 4 Control plane test result

	Snorkel	Surface
Z'_{δ_s}	-6.49E-03	0.00E+00
Z'_{δ_1}	3.50E-03	4.25E-03
Z'_{δ_2}	-3.50E-03	-4.25E-03
Z'_{δ_3}	-4.00E-03	-1.92E-03
Z'_{δ_4}	4.00E-03	1.92E-03
M'_{δ_s}	1.47E-03	0.00E+00
M'_{δ_1}	1.52E-03	1.64E-03
M'_{δ_2}	-1.52E-03	-1.64E-03
M'_{δ_3}	-1.44E-03	-7.65E-04
M'_{δ_4}	1.44E-03	7.65E-04

$$Z'_0 + Z'_{\delta_s} \delta_s + Z'_{\delta_1} \delta_1 + Z'_{\delta_2} \delta_2 + Z'_{\delta_3} \delta_3 + Z'_{\delta_4} \delta_4 = 0 \quad (3)$$

$$M'_0 + M'_{\delta_s} \delta_s + M'_{\delta_1} \delta_1 + M'_{\delta_2} \delta_2 + M'_{\delta_3} \delta_3 + M'_{\delta_4} \delta_4 = 0$$

δ_s : sail plane angle (rad)

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$: X-type rudder angle (rad)

$$\delta_4 = \delta_1, \delta_2 = -\delta_1, \delta_3 = -\delta_1 \quad (4)$$

$$Z'_0 + Z'_{\delta_s} \delta_s + Z'_{\delta_1} \delta_1 - Z'_{\delta_2} \delta_1 - Z'_{\delta_3} \delta_1 + Z'_{\delta_4} \delta_1 = 0 \quad (5)$$

$$M'_0 + M'_{\delta_s} \delta_s + M'_{\delta_1} \delta_1 - M'_{\delta_2} \delta_1 - M'_{\delta_3} \delta_1 + M'_{\delta_4} \delta_1 = 0$$

$$\begin{bmatrix} Z'_{\delta_s} & (Z'_{\delta_1} - Z'_{\delta_2} - Z'_{\delta_3} + Z'_{\delta_4}) \\ M'_{\delta_s} & (M'_{\delta_1} - M'_{\delta_2} - M'_{\delta_3} + M'_{\delta_4}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z'_0 \\ -M'_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Table 5 Control plane angles for neutral level flight

	D0/D	Sail plane angle (deg)	Rudder #1 angle (deg)
Surface (M' only)	-0.651	Exposed	32.0
	-0.492		20.4
	-0.368		8.4
	-0.226		6.2
	-0.085		9.0
Snorkel (Z', M')	0.057	-1.8	4.0
	0.198	-7.9	3.9
	0.378	-6.4	3.3

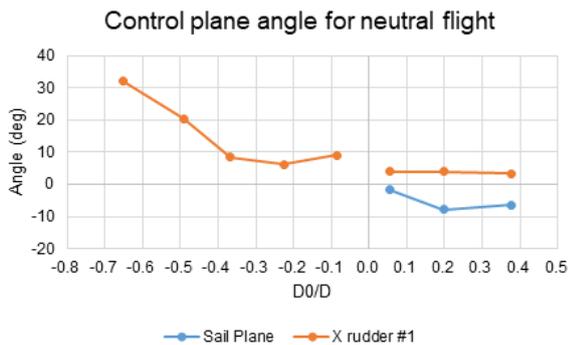


Fig. 11 Control plane angles for neutral level flight

상하 방향 힘과 중동요 모멘트를 동시에 상쇄시키는 중립운항 조건을 찾을 수 있다. 그러나 수상 조건의 경우에는 세일 수평타가 수면 상부로 노출되기 때문에 함미타만 사용 가능하다. 이에 따라 받음각 0도 조건에서 중동요 모멘트만 상쇄시키는 함미타 각을 도출하였다. 세일 상단이 노출되기 전인 D0/D 양수 구간에 대해서는 스노클 조건에서 구한 제어판 유체력 미계수값을 사용하였고, 세일 상단이 노출되는 D0/D 음수 구간에는 수상 조건에서 구한 제어판 유체력 미계수값을 사용하였다. 세일 상단이 노출되기 전 심도에서는 3.3 ~ 4도의 함미타 각 (Trailing edge가 위로 향함)를 사용하여 선미 흡입에 의한 중동요 모멘트를 상쇄시키고, -1.8 ~ -7.9도의 세일 수평타 각 (Trailing edge가 위로 향함)을 사용하여 수면으로 상승하려는 힘을 상쇄시킬 수 있는 것으로 분석되었다. 그리고 세일이 노출되는 구간에서는 Fig. 6과 같이 중동요 모멘트가 음으로 상당히 증가되기 때문에, 이를 상쇄하기 위해서 9 ~ 32도의 함미타 각 (Trailing edge가 위로 향함) 사용이 필요한 것으로 나타났다. 즉, 수상 조건에 가까울수록 중동요 모멘트 상쇄를 위한 함미타 사용량이 증가되기 때문에, 수면과 근접한 조건에서는 제어판만으로 자세, 심도 제어가 어렵고, 받음각 조절 또는 트림 및 보상 탱크 고려가 필요하다고 보여진다.

5. 결론

본 연구에서는 형상이 공개된 BB2 잠수함 선형에 대해 구속 모형시험을 통해 자유수면 근처에서 심도별 선체 길이 방향 힘 변화와 선미 흡입에 의한 상하 방향 힘과 중동요 모멘트 변화를 정량적으로 분석하였다. 그리고 중동요 모멘트 평형을 위한 받음각 조건을 도출하였다. 또한, 제어판 성능 시험을 수행하여 받음각 0도에서의 중립운항을 위한 제어판 운용 방안을 검토하였다. 주요 연구 결과는 아래와 같이 요약될 수 있다.

- 세일 상단이 수면 밖으로 노출되는 조건에서 세일에 의한 조파 현상이 매우 강하게 나타났고 선체 길이 방향 힘도 크게 나타남.
- 스노클에서 수상 심도까지 함체가 상승할수록 중동요 모멘트가 음의 방향(선미가 위로 향하는 방향)으로 증가됨. 특히, 세일이 수면 위로 드러나는 심도 구간에서 선미 흡입에 의한 상승력이 크게 나타남.
- 수면 근처 운항 심도에서의 중동요 모멘트 상쇄를 위해서는 0.6 ~ 2.1도의 받음각이 요구됨.
- 세일 상단이 수면 밖으로 노출되기 전 심도에서는 3 ~ 4도의 함미타와 -1.8 ~ -7.9도의 세일 수평타를 사용하여 중립운항이 가능한 것으로 분석되었고, 세일 상단이 노출되는 심도에서는 9 ~ 32도의 함미타를 사용하여야 중동요 모멘트 상쇄가 가능한 것으로 분석됨.

본 연구 결과는 잠수함의 수면 근처 운항 조건에 대한 수치 해석 연구 결과의 검증 데이터 및 자유항주모형시험에서의 수

면 근처에서의 중립운항을 위한 기반 자료로 활용될 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 해양수산부 재원으로 선박해양플랜트연구소의 주요 사업인 “수중운동체 운항성능 통합 추정 기술개발(3/5) (PES4250)”에 의해 수행되었습니다(1525012981).

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.
- Gertler, M. and Hagen, G.R., 1967. *Standard equation of motion for submarine simulation*. NSRDC-Report SR 00901 01, Task 0102.
- Griffin, M., 2002. *Numerical prediction of the maneuvering characteristics of submarines operating near the free surface*, Ph.D. Thesis, MIT.
- 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.
- 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.
- Sohn, K., Lee, S. and Ha, S., 2006. Mathematical model for dynamics of manta-type unmanned underwater vehicle with six degrees of freedom and characteristics of manoeuvrability response. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.399–413.
- Tolliver, J.V., 1996. *Studies on submarine control for periscope depth operations*, Naval Postgraduate School Monterey CA.
- Torunski, B., 2018. Computational analysis of the free surface effects on a BB2 submarine undergoing horizontal maneuvers, Doctoral dissertation, University of New Brunswick.
- Vasileva, A., and Kyulevcheliev, S., 2018. Numerical investigation of the free surface effects on underwater vehicle resistance, *In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Marine Sciences and Technologies*, Varna, Bulgaria (pp. 10–12).
- 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.
- Zhang, N. and Zhang, S.L., 2014. Numerical simulation of hull/propeller interaction of submarine in submergence and near surface conditions. *Journal of Hydrodynamics*, 26, pp.50–56.

