

Effect of Free Surface Based on Submergence Depth of Underwater Vehicle

Taek-Geun Youn¹, Min-Jae Kim², Moon-Chan Kim³ and Jin-Gu Kang⁴

¹M.S. Graduate Student, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

²Senior Researcher, Agency for Defence Development, Changwon, Korea

³Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

⁴Ph.D. Graduate Student, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

잠수체의 잠수 깊이에 따른 자유수면 효과에 관한 연구

윤택근¹, 김민재², 김문찬³, 강진구⁴

¹부산대학교 조선해양공학과 연구원

²국방과학연구소 선임연구원

³부산대학교 조선해양공학과 교수

⁴부산대학교 조선해양공학과 연구원

KEY WORDS: Free surface effect 자유수면 효과, Fully submerged modes 완전 잠수 모드, Residual resistance coefficient 잉여저항계수, Computational fluid dynamics 전산 유체 역학, Fully submerged depth 완전 잠수 깊이, Froude number 프루드 수

ABSTRACT: This paper presents the minimum submergence depth of an underwater vehicle that can remove the effect of free surface on the resistance of the underwater vehicle. The total resistance of the underwater vehicle in fully submerged modes comprises only viscous pressure and friction resistances, and no wave resistance should be present, based on the free surface effect. In a model test performed in this study, the resistance is measured in the range of 2 to 10 kn (1.03-5.14 m/s) under depth conditions of 850 mm (2.6D) and 1250 mm (3.8D), respectively, and the residual resistance coefficients are compared. Subsequently, resistance analysis is performed via computational fluid dynamics (CFD) simulation to investigate the free surface effect based on various submergence depths. First, the numerical analysis results in the absence of free surface conditions and the model test results are compared to show the tendency of the resistance coefficients and the reliability of the CFD simulation results. Subsequently, numerical analysis results of submergence depth presented in a reference paper are compared with the model test results. These two sets of results confirm that the resistance increased due to the free surface effect as the high speed and depth approach the free surface. Therefore, to identify a fully submerged depth that is not affected by the free surface effect, case studies for various depths are conducted via numerical analysis, and a correlation for the fully submerged depth based on the Froude number of an underwater vehicle is derived.

1. 서 론

최근 국내외적으로 해양자원 탐사 및 개발, 수중작업, 해양 감시 및 정찰 등의 군사 목적, 해양 환경 감시 등 다양한 분야에서 잠수체 사용이 증대되고 있다. 특히 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 해양 국가로 해양자원 확보, 개발 및 활용이라는 측면에서 잠수체를 포함한 수중관련 기술의 연구 개발은 필수적인 과제이다(Choi and Kim., 2012).

본 연구에서는 잠수체의 Fully submerged modes(자유수면 효과가 없는 완전 잠수 모드, Unbounded condition)에서 저항에 관한 내용을 다루고자 한다. Fully submerged modes는 물의 자유수면 효과가 없는 상태이므로, 총 저항은 점성압력저항과 마찰저항만 가진다(Moonesun, 2009). 이러한 Fully submerged modes가 되기 위해서는 잠수체가 충분한 깊이에서 운항되어야 한다.

여러 가지 잠수체의 항력 및 양력 계수들은 실험 및 수치해석을 통해 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔고, 각 잠수체에 대한 Fully

Received 9 November 2021, revised 23 February 2022, accepted 31 March 2022

Corresponding author Min-Jae Kim: +82-55-540-6133, mjkim80@add.re.kr

© 2022, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

submerged condition의 표준 깊이는 여러 참고 논문마다 다르다.

Rawson and Tupper.(2001)는 주어진 배수량에 대해서 잠수체는 일반 상선보다 Wetted surface area가 더 크기 때문에 이것은 더 큰 마찰 저항을 야기하고, 따라서 비슷한 조건에서 잠수체는 조파저항이 없는 영역의 깊이에서 운항되어야 함을 보였다. 이에 대한 최소 깊이 조건은 $H=L/2$ 라고 정의하였다(L = Hull length).

Jackson(1982)는 잠수체의 전반적인 설계 과정에 대한 연구내용을 포함하고 있고, 이 논문에서 제시한 최소 깊이는 $H=3D$ 이다(D = Hull diameter).

Moonesun et al.(2013)는 대상 잠수체에 대한 모형시험을 ITTC(International towing tank conference)해석법의 여러 조건들을 바꿔가며 나온 결과 값에 대한 비교해석 및 CFD(Computational fluid dynamics)해석에 대한 연구를 진행하였고, 이 논문에서는 최소 깊이를 $H=5D$ 에서 수행하였다.

Javadi et al.(2015)는 AUV(Autonomous underwater vehicle)의 운동이 Bow shape에 따라 저항에 미치는 영향을 실험적으로 연구를 수행했다. 두 가지 다른 모양인 Tango와 Standard shape이 사용되었고, Froude Number 0.099~0.349까지의 다양한 범위에서 총 저항, 잉여 저항, 마찰 저항을 분석하였다. 그 결과 Froude Number 0.19~0.3에서 Standard shape의 잉여 저항이 Tango shape보다 더 큰 것을 보였다.

Mansoorzadeh and Javanmard.(2014)는 실험 및 CFD 방법을 사용하여 AUV의 항력 및 양력 계수에 대한 자유수면의 영향을 조사하기 위해 자유표면이 없는 Single phase flow simulation과 Two phase flow simulation 연구를 수행한 바 있다. 모델의 테스트 깊이 범위는 AUV 최대 직경의 0.87~5.22까지 다양했으며, 1.5m/s와 2.5m/s의 두 가지 속도에 대해 수행하였다.

Nematollahi et al.(2015)는 자유수면과 Symmetrical AUV의 상호작용을 수치적으로 조사하였다. 이 연구는 다양한 깊이의 다양한 Reynolds number에서 수행되었다. 이들은 고정된 Reynolds number의 경우 압력 항력뿐만 아니라 저항 계수도 Froude number가 감소하면 증가하고, H 가 $3D$ 이상이면 자유수면 효과는 무시될 수 있다고 보였다. 또한 낮은 잠수 깊이에서 Reynolds number가 증가하면 자유수면에서의 UWV(Underwater vehicle) 모션의 효과가 더 잘 인식됨을 확인하였다.

이러한 잠수 깊이에 대한 표준값은 선형과 선속, 즉 Froude number에 따라 달라질 수 있기에 일반적으로 제시하기는 어려운 것이 사실이나 잠수체의 선형이 비슷하다면 깊이를 Froude number의 함수로 표시할 수 있을 수 있으리라는 생각으로 연구하게 되었다. 물론 잠수체는 잠수정, 잠수함 등 여러 종류가 있으나 본 연구에서 다루고 있는 잠수정을 생각하면 선형 특성이 크게 다르지 않으리라 생각한다.

본 연구에서는 $L/D=5.8$ 을 가진 잠수체에 대해 Froude number별로 새로운 표준 깊이를 모형시험 및 CFD를 이용한 저항시험 결과를 통해 제시하고자 한다. 실험은 부산대학교 예인수조에서 진행하였다. EFD(Experimental fluid dynamics)와 CFD 해석 결과의 비교를 통해 CFD 해석의 신뢰성을 보여주었고, 자유수면 조건이 없을 때의 CFD 해석 결과와 자유수면 조건이 있을 때의 여러 깊이의 저항 결과를 비교하여 Froude number별로 자유수면 효과를 무시할 수 있는 표준 깊이를 제시하였다.

몰수체에 대한 모형시험의 경우 충분한 깊이에서 시험하는 것이 여러 가지 제약조건에 의해 어려운 경우가 많은데 본 연구의 결과를 활용한다면 잠수정의 경우 몰수 깊이의 기준에 대한 참고가 될 수 있다고 생각한다.

2. 저항시험

2.1 모형 잠수체 제원

본 연구는 대상 잠수체에 대한 축소 모형을 대상으로 수행하였으며, 모형시험 및 CFD 해석에 이용한 모형의 상세 제원 및 형상은 Table 1과 Fig. 1와 같다(Diameter = length of one side of a square).

Table 1 Principal dimensions of underwater vehicle

Item	Dimension
Length of vehicle (m)	1.938
Diameter of vehicle (m)	0.332
Surface area of vehicle (m ²)	2.229

2.2 모형시험 조건

모형시험은 대상 잠수체에 대한 축소 모형을 대상으로 부산대학교 예인 수조에서 실험을 수행하였다. 부산대 예인 수조는 길이 100m, 폭 8m, 깊이 3.5m이고, 예인 전차의 최대속도는 7m/s이다. 잠수체의 동체 길이와 직경의 비 $L/D=5.8$ 이다.

실험은 두 가지 깊이 조건에 대해 수행하였는데, 그 깊이는 850mm(2.6D)와 1250mm(3.8D)이다. 선속은 2~10kn(1.03~5.14m/s) 범위에서 1kn(0.514m/s) 간격으로 전 저항을 측정하였다. 부산대 예인 전차 및 모형시험의 실험 Set-up은 Fig. 2와 같다. 모형선 선수 부분의 0.05 Lpp(Length between perpendiculars) 위치에 난류 촉진 장치로 Sand paper를 부착하였다. 또한, 2개의 원형 실린더(Diameter of cylinder = 5cm)를 통해 예인전차와 모형선을 연결하였고, Load cell과 모형선의 연결부로 인한 자유수면의 교란을 방지하고자 PVC(Poly vinyl chloride) 투명판을 부착하였다.

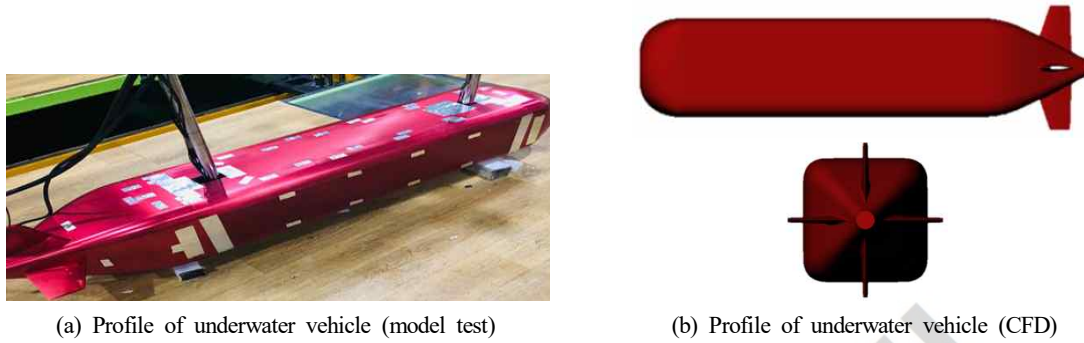


Fig. 1 Profile of underwater vehicle: (a) Model test and (b) CFD

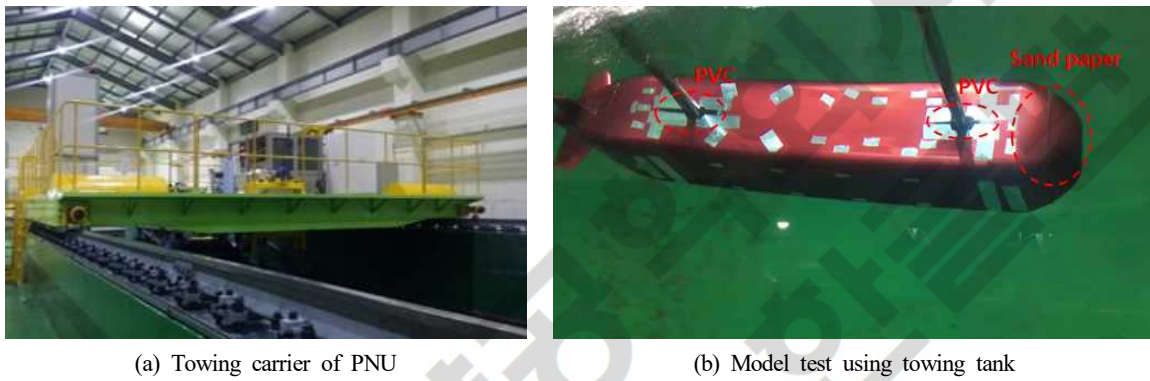


Fig. 2 PNU experimental set-up: (a) Towing carrier and (b) Model test

2.3 모형시험 결과

저항시험은 선속 2~10kn(1.03~5.14m/s) 범위에서 1kn(0.514m/s) 간격으로 수행하였고, 깊이 조건만 다르게 주어 두 차례 반복시험을 진행하였다. 첫 번째 시험은 850mm(2.6D) 깊이로, 두 번째 시험은 1,250mm(3.8D) 깊이에 대해 전 저항을 측정하였다. 그 결과는 Tables 2-3에 나타내었다(R_n 는 레이놀즈 수, C_R 은 잉여저항 계수, R_{TM} 은 모형선의 전저항).

Table 2 Resistance test results at shallow depth ($H=850$ mm, $2.6D$)

V_S (kn)	V_S (m/s)	V_M (m/s)	F_n	R_n (10^6)	C_R (10^{-3})	R_{TM} (N)
2	1.03	0.54	0.124	1.072	1.685	2.03
3	1.54	0.81	0.186	1.607	2.852	5.14
4	2.06	1.08	0.248	2.143	2.555	8.45
6	3.09	1.62	0.372	3.214	2.420	17.74
7	3.60	1.89	0.435	3.750	2.435	23.79
8	4.12	2.17	0.497	4.286	3.084	34.00
9	4.63	2.44	0.559	4.822	3.485	45.19
10	5.14	2.71	0.621	5.357	3.766	57.56

Table 3 Resistance test results at deep depth ($H=1250$ mm, $3.8D$)

V_S (kn)	V_S (m/s)	V_M (m/s)	F_n	R_n (10^6)	C_R (10^{-3})	R_{TM} (N)
2	1.03	0.54	0.124	1.072	2.311	2.26
3	1.54	0.81	0.186	1.607	1.402	4.14
4	2.06	1.08	0.248	2.143	1.750	7.50
6	3.09	1.62	0.372	3.214	1.633	15.63
7	3.60	1.89	0.435	3.750	1.526	20.42
8	4.12	2.17	0.497	4.286	1.696	27.09
9	4.63	2.44	0.559	4.822	1.740	34.08
10	5.14	2.71	0.621	5.357	1.823	42.21

850mm(2.6D)깊이에 대해 실험을 진행한 결과, 고속에서는 잉여저항 계수가 점점 증가하는 경향을 띠는 것을 통해 자유수면의 영향으로 인한 조파저항 발생을 원인으로 판단하였고, 이후 잠수체의 자유수면의 영향을 받지 않는 깊이를 제시한 참고문헌을 참고하여 1250mm(3.8D) 깊이로 재실험을 진행하였다.

1250mm(3.8D) 깊이 조건으로 재실험을 진행한 결과, 고속으로 갈수록 잉여저항 계수가 850mm(2.6D) 깊이 조건의 잉여저항 계수 보다 상대적으로 덜 증가하는 경향을 보였다. 두 깊이 조건에 대해 잉여저항 계수 값을 비교한 그래프는 Fig. 3과 같다.

이 두 결과를 통해 잠수체 모형시험의 경우 잠수 깊이에 따라 저항이 민감하게 작용될 수 있다는 것을 확인하였고, 이 원인은 자유수면의 영향에 의한 조파저항의 발생으로 판단하였다. 부산대학교 예인수조 장비 조건의 특성상 1,250mm 이상의 깊이에서 실험을 수행할 수 없기 때문에 이후 CFD 해석을 통해 자유수면 조건에 따른 저항의 차이에 대한 연구를 수행하였다.

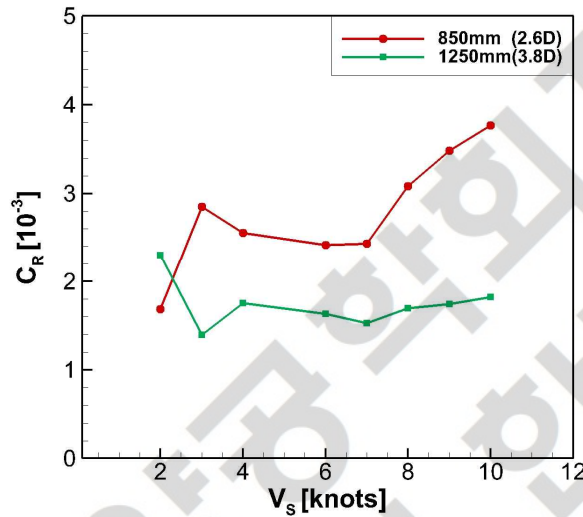


Fig. 3 Comparison of residual resistance coefficient between depths of 850 mm and 1,250 mm

3. 수치해석 및 상관관계 도출

3.1 수치해석 기법

본 연구에서는 STAR CCM+(Ver. 11.02)을 이용하여 수치해석을 진행하였다. CFD 해석에 적용된 좌표계는 유동 방향이 양(+)의 x축이고 잠수체의 우현이 양의 y축이며 중력의 반대방향이 양의 z축으로 하는 좌표계이다.

3차원 비정상 비압축성 난류유동의 지배방정식인 연속방정식과 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

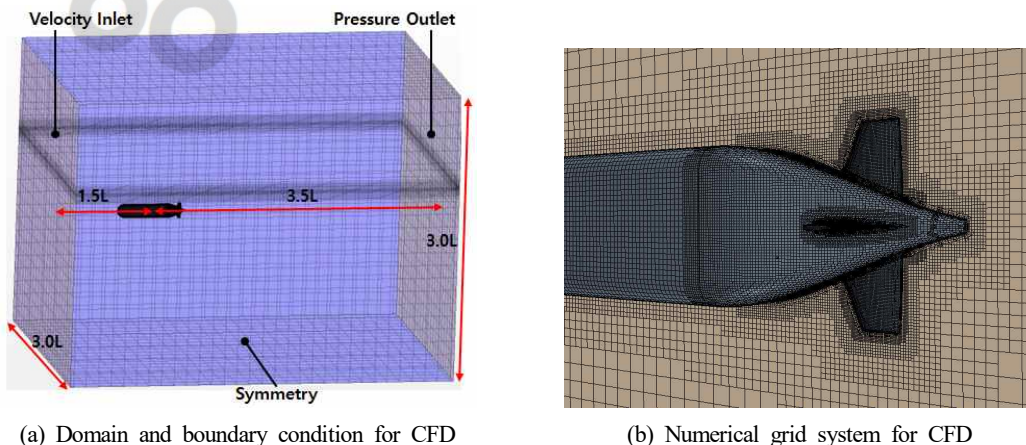


Fig. 4 Boundary condition and Grid system for CFD: (a) Domain and boundary condition; (b) Numerical grid system

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, t 는 시간, u_i 는 유속, p 는 압력, μ 는 유체 점성계수, g_i 는 중력 가속도이다. $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)항, F_i 는 단위 체적당 물체력을 나타낸다.

난류모형은 추가로 풀어야 할 난류관련 방정식의 숫자에 따라 Zero-equation, One-equation, Two-equation 모형 등으로 구분할 수 있다. 공학적으로 가장 많이 사용되는 대표적인 난류모형으로는 Realizable $k-\epsilon$ 모형을 들 수 있다. 본 연구에서는 역 압력구배에 의한 경계층 박리 유동에 향상된 성능을 보여주는 난류모델인 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하였다. 자유수면 해석에는 VOF(Volume of fluid) 기법을 사용하였다. VOF법은 격자 내 밀도가 서로 다른 두 유체의 체적 비율을 통해 두 유체의 경계인 자유수면의 위치를 추적하는 방법이다 (Jagadeesh and Murali, 2010).

본 연구에서 사용한 해석영역 및 경계조건은 Fig. 4에서 보는바와 같다. 경계조건으로 선수부의 Inlet과 Bottom, Top에는 Velocity inlet을 설정하였고 유동이 빠져나가는 Outlet에는 Pressure outlet으로 설정하였다. Domain의 크기는 L_{pp} 에 대해서 정의를 한 것이다.

잠수체 표면 및 공간격자의 생성은 Trimmed mesh와 Prism layer를 사용하였다. 또한 저항성능 수치해석에 고려된 격자수는 자유수면 없을 때는 약 99만 개, 자유수면이 있을 때는 약 103만 개다. 격자계는 Fig. 4에 나타내었고, 표면에 위치하는 격자점의 첫 번째 위치는 약 $y^+ = 50$ 에 해당하는 위치를 고려하였다. Prism layer(경계층격자) 같은 경우 잠수체 주변에서 전단력이 중요하게 작용하므로 6개의 층을 나눠 벽함수(Wall function)를 적용 하였다(Byeon et al., 2018).

3.2 수치해석 결과

3.2.1 자유수면이 없을 때의 저항 비교

다음은 $3.8D$ 깊이의 자유수면 조건에서 모형시험을 진행한 결과와 자유수면 조건을 넣지 않은 CFD 해석 결과를 비교하여 3, 6, 8, 10kn(1.54, 3.09, 4.12, 5.14 m/s)의 선속별 저항 계수 및 전 저항 차이를 Table 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 저속 3kn(1.54m/s)의 전 저항 차이가 -0.25%인 결과를 토대로 이후 다른 선속에 대해 같은 조건으로 CFD 해석을 진행하였다. 그 결과 고속으로 갈수록 저항계수 및 전 저항의 차이가 커지는 것을 확인하였다. 이것은 저속 3kn(1.54m/s) 실험의 경우 자유수면에 의한 조파저항의 발생이 거의 없기 때문에 자유수면을 넣지 않는 CFD 결과와 잘 일치하고, 고속으로 갈수록 조파저항의 영향이 매우 지배적인 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of resistance results between EFD and CFD simulations

V_S (kn)	V_S (m/s)	V_M (m/s)	F_n	R_{T_EFD} (N)	C_{T_EFD} (10^{-3})	C_{R_EFD} (10^{-33})	R_{T_CFD} (N ³)	C_{T_CFD} (10^{-33})	C_{R_CFD} (10^{-33})	$C_{T_Diff.}$ (%)
3	1.54	0.81	0.186	4.14	5.641	1.402	4.15	5.655	1.416	-0.25
6	3.09	1.62	0.373	15.63	5.325	1.633	14.49	4.923	1.231	7.55
8	4.12	2.17	0.497	27.09	5.191	1.696	24.29	4.655	1.159	10.33
10	5.14	2.71	0.621	42.21	5.177	1.823	36.41	4.465	1.112	13.75

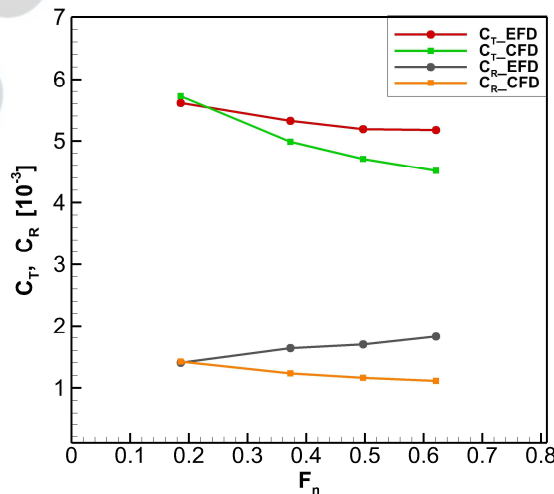


Fig. 5 Comparison of resistance coefficient between EFD and CFD simulations according to the Froude number

3.2.2 자유수면 조건이 있을 때의 저항 비교

위의 Table 4와 Fig. 5의 결과를 바탕으로 고속에서의 저항 계수의 차이는 자유수면의 영향으로 인한 조파저항 발생이 원인으로, 실험이 Fully submerged condition의 표준 깊이를 만족하지 않았다 판단하였고, 이후 설계 속도 10kn ($V_S = 5.14\text{m/s}$, $V_M = 2.71\text{m/s}$)에서 잠수 깊이를 조건을 달리 하여 CFD 저항해석을 진행하였다. 깊이 조건은 이전 연구에서 제시한 $H = 3D$, $H = 5D$ 와 부산대에서 모형시험을 진행한 깊이인 $H = 3.8D$, 자유수면 조건이 없을 때(non F.S.E.)(F.S.E.= free surface effect), 총 4가지 깊이 조건의 CFD 해석 결과와 EFD 값에 대한 비교해석을 수행하였다. 그 결과는 Table 5와 같다.

아래 Table 5의 CFD 결과를 통해 알 수 있는바와 같이 잠수 깊이를 깊게 할수록 전 저항의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 고속 10kn ($V_S = 5.14\text{m/s}$, $V_M = 2.71\text{m/s}$)에서는 잠수체의 잠수 깊이에 따라서 자유수면 효과에 큰 차이를 보인다는 것을 알 수 있었고, 이는 모형시험이 충분한 깊이 조건에서 진행이 되지 않은 것임을 나타내는 결과이다.

Table 5 Comparison of resistance obtained via EFD and CFD simulations based on depth variation at 10 kn ($V_M = 2.71\text{ m/s}$)

	H	R_T (N)	C_T (10^{-3})	C_R (10^{-3})	C_T Diff. (%)
EFD	3.8D	42.21	5.177	1.823	-
	3.0D	41.60	5.102	1.748	1.45
CFD	3.8D	40.45	4.961	1.607	4.17
	5.0D	37.24	4.567	1.213	11.78
	non F.S.E.	36.41	4.465	1.112	13.75

3.2.3 선속별 잠수 깊이에 대한 Case Study

위의 Tables 4-5에서의 모형시험과 CFD 해석 결과를 통해 잠수체의 잠수 깊이에 따라 자유수면 효과에 따른 전 저항의 차이가 크게 나고, 고속으로 갈수록 그 영향은 더 커짐을 확인하였다.

다음은 본 잠수체의 Fully submerged condition을 만족하는 표준 깊이를 각 선속별로 찾기 위해 선속과 잠수 깊이에 따른 상관관계에 대해 CFD 저항해석을 진행하고 결과를 비교분석하였다. 선속은 3, 6, 8, 10kn(1.54, 3.09, 4.12, 5.14 m/s) 4가지에 대해서 진행하였고, 자유수면 조건이 없을 때를 기준으로 자유수면 조건이 있을 때에 대한 여러 깊이 조건으로 Case Study를 진행하였다. 그에 대한 결과는 Table 6에 보였다[자유수면 조건이 있을 때(F.S.E.), 자유수면 조건이 없을 때(non F.S.E.)].

Table 6 Case study based on depth of submerged body

V_S (kn)	V_S (m/s)	V_M (m/s)	F_n	Case	Depth (H)	R_T (non F.S.E.)	R_T (F.S.E.)	Diff. (%)
3	1.54	0.81	0.186	1	1.5D	4.153	4.236	-1.999
				2	2.0D	4.153	4.201	-1.156
				3	2.5D	4.153	4.177	-0.578
6	3.09	1.62	0.373	1	2.0D	14.488	14.757	-1.857
				2	2.4D	14.488	14.635	-1.015
				3	3.5D	14.488	14.550	-0.428
8	4.12	2.17	0.497	1	4.0D	24.291	24.634	-1.412
				2	4.2D	24.291	24.546	-1.050
				3	5.0D	24.291	24.482	-0.786
10	5.14	2.71	0.621	1	5.5D	36.412	36.983	-1.568
				2	6.0D	36.412	36.778	-1.005
				3	6.5D	36.412	36.621	-0.574

Table 7 Standard depth of fully submerged condition by Froude Number F_n

V_S (kn)	V_S (m/s)	V_M (m/s)	F_n	Depth	R_{T_non} F.S.E. (N)	C_{T_non} F.S.E. (10^{-3})	C_{R_non} F.S.E. (10^{-3})	$R_{T_F.S.E.}$ (N)	$C_{T_F.S.E.}$ (10^{-3})	$C_{R_F.S.E.}$ (10^{-3})	$C_{T_Diff.}$ (%)
3	1.54	0.81	0.186	2.0D	4.15	5.655	1.416	4.20	5.723	1.485	-1.156
6	3.09	1.62	0.373	2.4D	14.45	4.923	1.231	14.64	4.987	1.294	-1.015
8	4.12	2.17	0.497	4.2D	24.29	4.655	1.159	24.55	4.704	1.208	-1.050
10	5.14	2.71	0.621	6.0D	36.41	4.465	1.112	36.78	4.511	1.157	-1.005

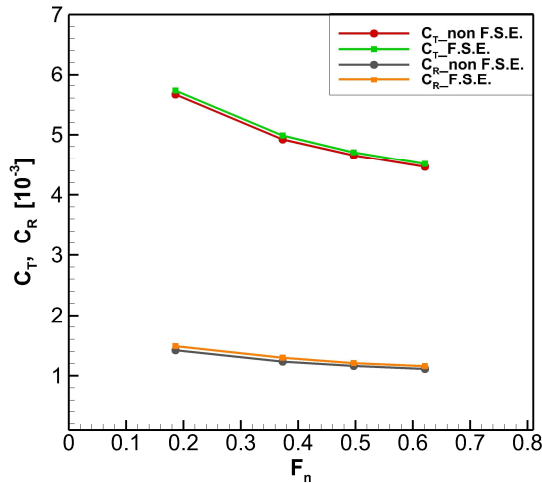


Fig. 6 Comparison resistance coefficient between non F.S.E. and F.S.E. cases based on Froude number F_n

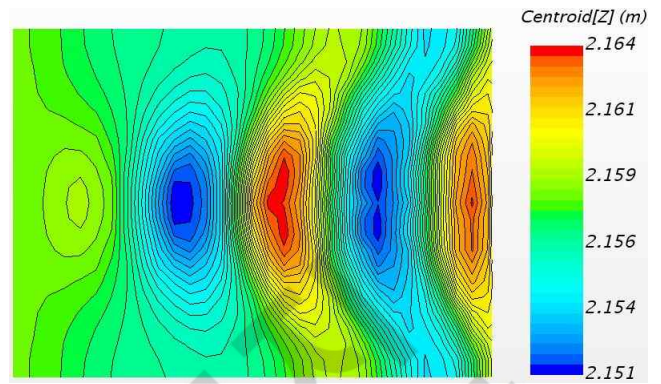


Fig. 7 Free surface of centroid (Z) about $V_s = 10$ kn, $H = 6.0D$ ($Z = 2.158$ m)

Table 6의 결과에서 각 선속 별로 자유수면 조건을 주었을 때와 자유수면 조건을 넣지 않았을 때의 CFD 저항해석 차이가 1% 이내로 작아지는 깊이를 본 잠수체의 Fully submerged condition의 표준 깊이로 설정하였다. 그 결과는 $V_s = 3\text{kn}(1.54\text{m/s})$ 에서 2.0D, $V_s = 6\text{kn}(3.09\text{m/s})$ 에서 2.4D, $V_s = 8\text{kn}(4.12\text{m/s})$ 에서 4.2D, $V_s = 10\text{kn}(5.14\text{m/s})$ 에서 6.0D로, Table 7에 나타내었고 Fig. 6에 Froude Number 별 EFD와 CFD의 저항계수 차이를 그래프로 나타내었다. 또한, $V_s = 10\text{kn}(5.14\text{m/s})$, $H = 6.0D$ 에 대한 Z방향 자유수면의 파형을 Fig. 7에 나타내었다(CFD 상에서 자유수면 Z 위치는 2.158m 이다.)

3.2.4 프루드 수(F_n)와 적정 잠수 깊이와의 상관관계

Table 7에서 선속별로 non F.S.E.와 F.S.E.의 결과 간의 저항 계수 차이가 1%인 깊이를 자유수면의 영향을 받지 않는 적정 잠수 깊이로 결정하였으며, 선속과 깊이를 각각 F_n 와 H/D 로 무차원화하여 둘 사이의 상관관계를 다음의 Fig. 8과 같이 그래프로 나타내었다. Fig. 8 그래프의 x축은 프루드 수(F_n), y축은 잠수 깊이와 Hull diameter의 비(H/D)로, 본 잠수체의 4가지 F_n 의 적정 잠수 깊이에 대한 결과를 추세선으로 나타내었다. 또한, 참고 논문 Moonsum et al.(2013)이 수행한 잠수체의 F_n 와 잠수 깊이($F_n = 0.4$, $H = 5.0D$)에서 확인한 결과, 본 연구를 통해 제시하는 요구 깊이 이상의 조건에서 실험을 수행하였음을 볼 수 있었다. 하지만, F_n 가 큰 조건(선속이 높거나 L 이 작은 잠수체)에 대해서는 더 깊은 깊이 조건이 요구 될 수 있다.

아래의 식은 F_n 와 H/D 에 대한 상관관계를 수식화한 결과이다($x = F_n$, $y = H/D$).

$$y = 24x^2 - 10x + 3 \quad (x = F_n, y = H/D) \tag{3}$$

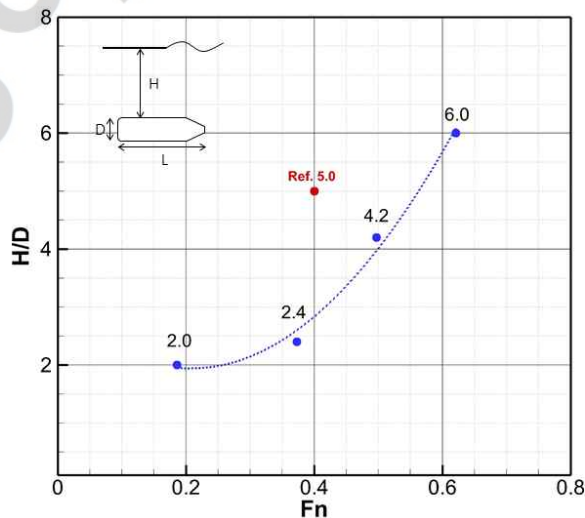


Fig. 8 Fully submerged depth based on Froude Number F_n

4. 결 론

본 연구에서는 잠수체의 잠수 깊이에 따른 자유수면 효과에 관한 주제로 연구를 진행하였다. 대상 잠수체의 전 저항 및 저항 계수들을 파악하기 위해 모형시험 및 CFD 해석을 수행하였다.

본 잠수체의 $L/D = 5.8$ 이며, 실험은 850mm(2.6D)와 1,250mm(3.8D) 깊이 조건으로 선속 2~10kn(1.03~5.14m/s) 범위에서 1kn(0.514m/s) 간격으로 두 차례 실험을 진행하였다. 그 결과 고속으로 갈수록 잉여저항 계수 측면에서 1,250mm(3.8D) 깊이 결과보다 850mm(2.6D) 깊이의 결과가 더 커지는 경향을 띄었다. 이것을 바탕으로 깊이의 차이에 의해 자유수면에 가까워 그 영향으로 조파저항이 발생하였을 수 있겠다고 판단하였고, 이후 깊이 조건에 따른 자유수면의 영향 차이에 대해 확인하기 위해 CFD 저항해석을 수행하였다. 먼저 CFD를 이용하여 자유수면 조건이 없을 때의 전 저항을 실험과 비교한 결과, 저속 3kn(1.54m/s)에서는 전 저항의 차이가 -0.25%로 작았지만, 고속 10kn(5.14m/s)에서는 13.75%로 점점 그 차이가 커짐을 확인하였고, 잉여저항계수 측면에서도 차이가 커지는 것을 볼 수 있었다. 이 오차의 요인으로는 실험 시 고속 구간에서 자유수면의 영향을 받지 않는 표준 깊이를 만족하지 않아서 생긴 것으로 판단하였고, 이후 설계 속도에서 잠수 깊이에 따른 전 저항의 차이를 확인하였다. 그 깊이는 참고 논문에서 제시한 깊이(3D, 5D)와 부산대 예인수조에서 실험한 깊이(3.8D), 자유수면 조건이 없을 때 4가지이고, 이 깊이 조건으로 나온 CFD 해석 결과와 EFD 결과를 비교하였다. 그 결과 자유수면으로부터 깊이가 커질수록 CFD상의 전 저항 값이 작아져 모형시험과의 오차는 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 위의 두 결과를 통해 모형시험이 충분한 깊이에서 진행이 되지 않아 자유수면의 영향에 의해 모형시험 값이 크게 측정이 되었고, 고속의 영역에서는 그 영향이 더 크다는 결론을 얻을 수 있었다.

실험에서의 자유수면의 영향이 없는 잠수 깊이를 찾기 위해 각 선속별로 자유수면의 여러 깊이 조건으로 CFD를 이용하여 Case study를 진행하였다. 자유수면이 없을 때 대비 1% 이내의 차이를 보이는 깊이를 적정 깊이로 결정하였으며 그 결과 $V_s = 3kn(=1.54m/s)$ 에서 2.0D, $V_s = 6kn(3.09m/s)$ 에서 2.4D, $V_s = 8kn(4.12m/s)$ 에서 4.2D, $V_s = 10kn(5.14m/s)$ 에서 6.0D를 본 잠수체의 자유수면의 영향이 없는 표준 깊이로 정의하였다. 또한 선속과 잠수 깊이를 F_n 와 H/D 로 무차원화하여 상관관계를 $y = 24x^2 - 10x + 3$ 로 수식화하였다.

이 연구를 통해 잠수 깊이 및 Froude number에 따라 자유수면의 영향에 의해 그 결과가 매우 상이하다는 것을 확인할 수 있었다. 잠수체의 형상에 따라 충분한 깊이 조건이 다소 달라질 수 있으나 본 연구에서 적용한 잠수정과 형상이 크게 차이나지 않는다면 본 연구 결과를 실험에 적용할 수 있으리라 생각한다. 추후에 여러 종류의 잠수체에 대해 자유수면의 영향이 없는 잠수 깊이에 대한 추가 연구를 수행할 경우 보다 신뢰성 있는 자료들이 갖추어질 수 있으리라 생각한다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Funding

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, H.S., & Kim, J.Y. (2012). Status and Prospect of R&D of Unmanned Submersible Vehicles (AUV). *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), 25–30.
- Moonesun, M. (2009). *Handbook of Naval Architecture Engineering*. Kanoon Pajohesh., Isfahan.
- Rawson, K.J., & Tupper, E.C. (2001). *Basic Ship Theory* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Jackson, H.A. (1982). *Submarine Design Notes*. Massachusetts Institute of Technology.
- Moonesun, M., Javadi, M., Charmdooz, P., & Mikhailovich, K.U. (2013). Evaluation of Submarine Model Test in Towing Tank and Comparison with CFD and Experimental Formulas for Fully Submerged Resistance. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 42(8), 1049–1056.
- Javadi, M., Manshadi, M.D., Kheradmand, S., & Moonesun, M. (2015). Experimental Investigation of the Effect of Bow Profiles on Resistance of an Underwater Vehicle in Free Surface Motion. *Journal of Marine Science and Application*, 14, 53–60. <https://doi.org/10.1007/s11804-015-1283-0>
- Mansoorzadeh, Sh., & Javanmard, E. (2014). An Investigation of Free Surface Effects on Drag and Lift Coefficients of an Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Using Computational and Experimental Fluid Dynamics Methods. *Journal of Fluids and Structures*, 51, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.09.001>
- Nematollahi, A., Dadvand, A., & Dawoodian, M. (2015). An Axisymmetric Underwater Vehicle-Freesurface Interaction: A Numerical Study. *Ocean Engineering*, 96, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.028>

Jagadeesh, P., & Murali, K. (2010). RANS Predictions of Free Surface Effects on Axisymmetric Underwater Body. *Journal of Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(2), 301-313. <https://doi.org/10.1080/19942060.2010.11015318>

Byeon, C.Y., Kim, J.I., Park, I.R., & Seol, H.S. (2018). Resistance and Self-propulsion Simulations for the DARPA Suboff Submarine by Using RANS Method. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 23(3), 36-46. <https://doi.org/10.6112/ksfce.2018.23.3.036>

Author ORCIDs

Author name	ORCID
Youn, Taek-Geun	0000-0003-0263-5651
Kim, Min-Jae	0000-0002-3885-3354
Kim, Moon-Chan	0000-0002-0452-6830
Kang, Jin-Gu	0000-0003-3215-6926

한국해양대학교
해양공학부의
학술정보센터