Journal of the KNST

2025; Vol.8, No.3; pp.481-487

ISSN: 2635-4926 https://doi.org/10.31818/JKNST.2025.9.8.3.481

Check for updates

Received: 2025/07/21
Revised: 2025/08/02
Accepted: 2025/09/13
Published: 2025/09/30

*Corresponding Author:
Sungkyun Lee
Maritime R&D Center, LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5179-7761
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: sungkyun.lee2@lignex1.com

M&S 기법을 활용한 전방 프로펠러형 수중발사체의 초기거동 예측

Estimation of Initial Behavior of Underwater Vehicles with Ahead Propeller by Using M&S Technique

이성균[1*], 김창환[1], 고진용[1], 김현승[2]

[1]LIG넥스원 해양연구소 수석연구원
[2]LIG넥스원 해양연구소 선임연구원

Sungkyun Lee[1*], Changhwan Kim[1], Jinyong Go[1], Hyunseung Kim[2]

[1]Chief research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1
[2]Research engineer, Maritime R&D Center, LIG Nex1

Abstract

본 논문은 전방에 프로펠러를 장착한 수중발사체의 초기거동을 M&S(modeling & simulation) 기법을 활용하여 추정하였다. 수중발사체의 항력계수를 포함한 동체에 대한 유체력계수를 추정하였으며, 발사체의 추력에 대한 모델링을 수행하여 발사체의 동역학 모델을 구성하였다. 개발된 모델을 활용하여 발사체의 무게중심 위치와 발사속도의 변화가 초기거동에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문은 유사한 형상을 가지는 수중발사체의 초기거동 예측을 통해 수중발사체 설계 및 성능 예측에 기여할 수 있다.

In this paper, the initial behavior of an underwater vehicle with ahead propeller was estimated by using modeling and simulation (M&S) technique. For the simulation of the vehicle dynamics, the hydrodynamic coefficients of the body, including the drag, were estimated. And the thrust generated by vehicle were also modeled to construct its dynamic model. Using the developed model, the effects of variations in the center of gravity and launch velocity on the initial behavior were analyzed. This study can contribute to the design and performance prediction of underwater vehicle with similar configurations.

Keywords

초기거동(Initial Behavior),
전방 프로펠러(Ahead Propeller),
수중발사체(Underwater Vehicle),
모델링&시뮬레이션(Modeling & Simulation),

1. 서론

수중에서 발사되는 수중운동체는 다양한 해양 임무를 수행하기 위해 개발되며, 특히 발사 이후의 초기거동은 발사체의 안정성과 운용 시작환경을 결정짓는 핵심 요소로 평가된다. 초기거동은 짧은 시간 내에 급격한 속도 및 자세 변화가 발생하는 복잡한 유체역학적 상호작용에 놓이게 되며 발사체의 질량 분포, 형상에 따른 항력, 발사 속도에 따라 크게 영향을 받는다. 이러한 초기거동의 특성은 발사체 설계 및 운용 계획의 수립에 있어 반드시 고려되어야 하며, 정성적인 예측 및 해석을 위한 체계적인 분석도구가 필요하다.

다양한 수중발사체의 종류 중 전방 프로펠러 형태는 발사 이후의 임무 수행에 집중하여 채택된 형태이지만 발사 직후의 고속 유동 및 급격한 압력 변화의 환경에서는 발사에 부적합하다. 따라서 다른 형태의 수중발사체 대비 초기거동의 정밀한 분석과 예측의 필요성은 더욱 강조된다. 후방 추진형 발사체의 발사 이후 초기거동 및 주행 과정에 대한 많은 자료가 축적되어 있기 때문에, 수중발사체에 대한 기존의 연구들은 주로 후방 프로펠러 형태를 기반으로 한 궤적 해석이나 유체력 모델링에 집중되어 있다[1]. 반면, 전방 프로펠러형 수중발사체에 관한 연구는 항력에 대한 수치해석이나 모형시험을 통한 유체력 계수의 도출 등 연구 초기 단계에 해당

© 2025 Korea Society for Naval Science & Technology

되는 경우가 많으며 전체적인 발사체의 거동과 궤적 확인에 대한 연구는 미흡한 실정이다[2,3].

본 논문에서는 M&S(modeling & simulation) 기법을 활용하여, 전방에 프로펠러를 장착한 수중발사체의 초기거동을 분석하였다. 수중 환경에서 발사체에 작용하는 항력 및 유체력 계수를 추정하고 추진력에 대한 모델링을 포함하여 전체적인 동역학 모델을 구성하였다. 또한, 발사체의 무게중심 위치와 항력계수, 그리고 발사속도와 같은 변수들이 초기거동 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

본 논문은 초기 설계단계에서 전방 프로펠러형 수중발사체의 형상 및 질량분포에 따른 거동 예측 기반을 제공하며, 보다 안정적이고 임무에 적합한 수중발사체 개발을 위한 기술적 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 수중발사체 운동방정식 구성

수중발사체의 초기거동을 기술하기 위해 지구고정 좌표계(O-XYZ)와 수중발사체의 물체 고정좌표계(O-xyz)를 Fig. 1과 같이 설정하였다. 수중발사체의 전진 방향을 x축의 (+), 아래쪽 방향을 z축의 (+) 방향으로 정의한다. 여기서 θ는 수중운동체의 pitch에 해당하는 오일러 각도를, u/w는 수중운동체의 전진/상하 방향 속도를, q는 pitch 방향 각속도를 의미한다.

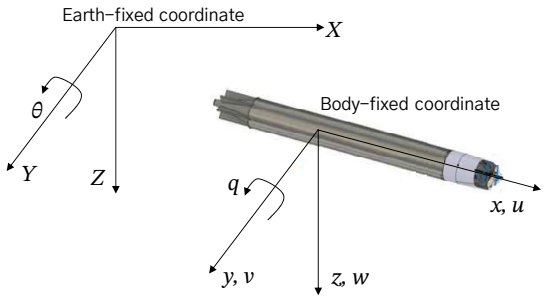


Fig. 1. Definition of coordinate

본 논문에서는 수중발사체의 전진(x), 상하(z), 종동요(pitch, θ) 방향의 초기거동을 분석하였다. 운동방정식은 뉴턴-오일러 방정식의 기본 형식인 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{1}$$

$$\vec{F} = [X_F, Z_F, M_F] \tag{2}$$

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{yy} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\vec{a} = [\ddot{x}, \ddot{z}, \ddot{\theta}] \tag{4}$$

여기서, F는 운동체에 작용하는 외력 벡터를, M은 질량 및 관성모멘트가 포함된 질량 행렬을, 그리고 a는 선형 및 각가속도를 의미한다.

식 (3)의 질량 행렬에는 운동체의 질량과 관성모멘트가 포함되며, m은 수중발사체의 질량을, I_{yy}는 종동요 방향 관성모멘트를 의미한다. 운동체의 대칭성을 고려하여 비대각 성분 중 하나인 이차관성항(product of inertia)은 포함하지 않았다. 이는 대부분의 수중운동체가 좌우/상하 대칭구조를 가지며, 해당 대칭 조건 하에서는 이차관성항이 0으로 간주될 수 있기 때문이다.

식 (4)의 x, z, θ는 각각 전진, 상하, 종동요 방향 가속도 성분이며, 각 방향 변위를 시간에 대해 2차 미분한 값을 의미한다.

식 (2)로 표현된 외력항은 수중발사체에 작용하는 유체력과 프로펠러에 의한 추력을 포함하며, 식 (5)와 같이 외력 요소로 구분 지을 수 있다.

$$X_F = X_H + X_S + X_{Prop} \tag{5a}$$

$$Z_F = Z_H + Z_S \tag{5b}$$

$$M_F = M_H \tag{5c}$$

여기서, 하첨자 H는 발사체의 운동에 의해 발생하는 동유체력(hydrodynamic force)을 의미하며, 하첨자 S는 정지된 상태에서 발사체의 무게와 부력으로부터 기인하는 정유체력(hydrostatic force)을 의미한다. 또한, 하첨자 $Prop$은 프로펠러가 작동함에 따라 발생하는 추력(propulsive force)을 의미한다. 각 항은 발사체에 외력으로 작용하여 전체 초기거동에 영향을 미치게 된다.

식 (6) – 식 (8)은 수중발사체의 전진, 상하, 종동요 방향에 작용하는 각각의 외력 항목들을 보다 구체적으로 기술한 것이다. 상단에 막대 기호(–)가 표시된 항들은 무차원화된(non-dimensionalized) 값임을 나타낸다. 무차원화는 서로 다른 물리량을 비교할 수 있도록 정규화함으로써 해석의 일반성을 확보하기 위해 수행하였다.

$$X_H = \frac{1}{2}\rho L^3 \overline{X_{\dot{u}}}\dot{u} + \frac{1}{2}\rho L^2 \overline{X_{u|u|}} u|u| \tag{6a}$$

$$X_S = -(W-B)\sin\theta \tag{6b}$$

$$X_{Prop} = K_T \rho d^4 n^2 \tag{6c}$$

$$Z_H = \frac{1}{2}\rho L^3 \overline{Z_{\dot{w}}}\dot{w} + \frac{1}{2}\rho L^2 V \overline{Z_w} w \tag{7a}$$

$$Z_S = (W-B)\cos\theta \tag{7b}$$

$$M_H = \frac{1}{2}\rho L^5 \overline{M_{\dot{q}}}\dot{q} + \frac{1}{2}\rho L^4 V \overline{M_q} q \tag{8}$$

여기서, 외력을 표현하기 위해 사용된 물리 변수들은 다음과 같다. 우선, ρ는 수중 유체의 밀도, L은 발사체의 길이, V는 발사체의 합속력($\sqrt{u^2+w^2}$)을 의미한다. W는 발사체의 중력에 의한 무게를 의미하며, 이에 대응하는 부력을 B로 나타냈다. 추진력 관련 변수로는 프로펠러의 직경을 나타내는 d와 초당 프로펠러 회전수를 나타내는 n을 활용하였다.

식 (6) – 식 (8)에서 활용되는 변수들은 발사체에 작용하는 외력과 관련된 변수들로 수중발사체의 초기거동에 큰 영향을 준다. 무게와 부력과 같은 정유체력 변수, 그리고 유체 밀도와 같은 환경 변수, 프로펠러 직경 및 회전수와 같은 추진력 변수들은 대부분 설계 단계에서 결정되거나 운용 조건으로부터 정의될 수 있다. 그러나 동유체력 계수는 발사체 형상과 운용 환경에 따라 달라지는 값으로 별도의 정밀한 추정이 필요하다.

3. 수중발사체 동유체력 계수 추정

식 (5)의 항력관련 계수 $\overline{X_{u|u|}}$를 제외한 나머지 동유체력 계수들은 경험식을 통해 추정하였다[4-6]. 수중발사체의 동유체력 계수는 크게 장착물을 제외한 순수 몸체에 의한 성분과 날개에 대한 성분으로 구분된다. 몸체 부분에서는 몸체 길이(L), 배수용적(∇), 동체직경(D), 단면 2차 모멘트(I_y^{∇}), 부피중심이 동유체력 계수 추정에 활용된다. 날개 부분에서는 스팬(b), 코드 길이(c), 날개 면적(A_{fin}) 및 면적 중심, 양력계수(C_L), 그리고 후퇴각(sweep angle, Λ)과 같은 기하학적 요소들이 계수 추정에 활용된다.

식 (9)는 수중발사체의 가속도 관련 동유체력 계수들에 대한 경험식, 식 (10)은 속도 관련 동유체력 계수들에 대한 경험식이다.

$$\overline{X_{\dot{u}}} = -k_1 \frac{2\nabla}{L^3} \tag{9a}$$

$$\overline{Z_{\dot{w}}} = -k_2 \frac{2\nabla}{L^3} - k_{fin}\pi \frac{c^2 b}{L^3} \tag{9b}$$

$$\overline{M_{\dot{q}}} = -k_b \frac{2I_y^{\nabla}}{L^5} - k_{fin}\pi \frac{c^2 b}{L^3}\left(\frac{x_{ne}-x_{nb}}{L}\right) \tag{9c}$$

$$\overline{Z_w} = -0.234\left(\frac{2\nabla}{L^3}\right)^{0.79} - \frac{2bc}{L^2}A_{fin}C_L \tag{10a}$$

$$\overline{M_q} = -0.045\left(\frac{2\nabla}{L^3}\right) - \frac{2bc}{L^2}A_{fin}C_L\left(\frac{x_{ne}-x_{nb}}{L}\right)^2 \tag{10b}$$

여기서, x_{nb}는 동체 부피 중심과 동체 앞단까지의 길이 방향 거리를, x_{ne}는 날개 면적 중심과 동체 앞단까지의 길이 방향 거리를 의미한다.

식 (9)와 식 (10)에서 활용되는 동체 관련 계수와 날개 관련 계수들은, 동체의 길이(L) 및 직경(D)과 날개의 스팬(b) 및 코드 길이(c)를 통해 식 (11) – 식 (13)과 같이 산출된다.

$$k_1 = \frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \tag{11a}$$

$$k_2 = \frac{\beta_0}{2-\beta_0} \tag{11b}$$

$$k_b = \frac{e^4(\beta_0-\alpha_0)}{(2-e^2)\{2e^2-(2-e^2)(\beta_0-\alpha_0)\}} \tag{11c}$$

$$\alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3}\left\{\frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right)-e\right\} \tag{12a}$$

$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3}\ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \tag{12b}$$

$$e = \sqrt{1-\left(\frac{D}{L}\right)^2} \tag{12c}$$

$$k_{fin} = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{c}{b}}} \tag{13}$$

전방 프로펠러형 수중발사체는 일반적인 유선형 또는 유사 어뢰형 수중운동체와는 다른 독특한 형상을 가진다. 전방에 위치한 프로펠러 구조로 인해 동체 형상 및 유동 특성이 크게 달라지게 되며, 이러한 형상적 특성은 동유체력 중에서도 특히 항력(drag)의 발생 양상에 큰 영향을 미치게 된다. 기존의 항력

계수 추정에 널리 사용되는 경험식들은 대부분 일반적인 유선형 형상을 기반으로 도출된 것으로, 전방 프로펠러 구조를 갖는 대상체에는 직접 적용하기에 한계가 존재한다. Fig. 2는 후방 프로펠러형과 전방 프로펠러형 수중운동체를 보여준다.

(a) Aft propeller type (Gavia AUV)

(b) Ahead propeller type

Fig. 2. Configuration of underwater vehicles

본 논문에서는 전방 프로펠러형 수중발사체의 형상을 추정하기 위해, 다양한 수중운동체 형상에 대한 기존의 항력계수 자료를 수집/분석하였다. 일반적인 후방 프로펠러형 수중체에 대해 실험적/수치해석적 방법으로 도출된 항력계수를 참고하였으며[1], 유선형/구체형/실린더(cylinder)형과 같은 다양한 형상에 따른 항력계수 자료를 활용하였다[7]. 각 형상에 대한 항력계수는 Table 1과 같다.

Table 1. Drag coefficient according to geometry

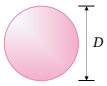
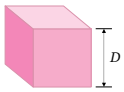
Geometry		Drag coefficient (C_D)
Hydro-foil (2D)		0.04
Sphere		0.5
Cube		1.05
Gavia AUV (aft propeller)		0.37
Infinite cylinder		1.2

Table 1의 항력계수 역시 해수 밀도와 길이로 무차원화된 값이다. 유선형 날개형상과 후방 프로펠러형의 항력은 전방 프로펠러형 수중발사체에 비해 과하게 작은 값일 가능성이 높다. 전방 프로펠러형은 동체 전방의 프로펠러로 인해 유입 유동이 급격히 교란되고, 이로 인한 압력 변화로 인해 유선형에 비해 항력이 커지기 때문이다. 항력 최소화를 위한 이상적 구조인 유선형 형상에 비해, 전방 프로펠러는 구체(sphere), 정육면체(cube), 실린더(cylinder) 형상의 항력과 더욱 유사할 것이다. 본 논문에서는 이 중에서 형상의 유사성이 가장 큰 실린더의 항력을 기준으로 수중발사체의 항력을 추정하였다.

무한한 길이를 갖는 실린더의 무차원화된 항력계수(C_D) 값은 1.2로, 이는 세장비(aspect ratio, L/D)의 변화에 따라 감소하는 경향을 보인다. 세장비에 따른 항력 감소율을 반영하기 위해 본 연구에서는 기존 문헌의 보정계수(κ)를 활용하였다. 세장비별 보정계수는 Table 2에 정리되어 있으며, 식 (14)와 같이 보정계수를 활용하여 대상 실린더에 대한 항력계수를 산출할 수 있다[7]. 대상 수중발사체의 세장비(L/D)는 10에 해당하였고, 이에 보정계수를 활용한 항력은 0.82이다. 이를 최종 항력계수($1 - \overline{X_{u|u|}}$)로 선정하고, 이후 분석 과정을 수행하였다.

Table 2. Drag reduction factor for cylinder

L/D	κ
2	0.58
5	0.62
10	0.68
20	0.74
40	0.82

$$C_D = \kappa \cdot C_{D\infty} \quad (C_{D\infty} = 1.2) \tag{14}$$

항력계수와 경험식을 통해 도출한 동유체력 계수를 Table 3에 종합하였으며, 본 동유체력 계수를 반영하여 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

Table 3. Hydrodynamic coefifcients for vehicle

Coefficients	Value
$\overline{X_{\dot{u}}}$	−0.0013
$\overline{X_{u\|u\|}}$	−0.8200
$\overline{Z_{\dot{w}}}$	−0.0138
$\overline{Z_{w}}$	−0.0485
$\overline{M_{\dot{q}}}$	−0.0011
$\overline{M_{q}}$	−0.0103

4. 분석조건에 따른 시뮬레이션 결과

운동방정식과 산출된 유체력 등을 활용하여 M&S 분석도구를 개발하였고, 이를 통해 전방에 프로펠러를 장착한 수중발사체의 초기거동을 분석하였다. 특히, 발사체의 무게중심 위치와 항력계수, 그리고 초기 발사속도를 분석 변수로 선정하고 이 변수들의 변화가 발사체 초기거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

발사체의 경우, 제한된 용적 내에 필요 부품을 배치하면서 초기거동에 유리한 무게중심까지 구현하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 무게중심의 범위에 따라 초기거동을 살펴보는 것은 발사체의 초기 설계 단계에서 필수적인 과정이다. 항력 역시, 형상의 유사성을 감안하여 추정은 가능했지만 고속 발사 상황과 유동의 복잡성으로 인해 실제 발사체에 작용하는 항력을 정확하게 알아내는 것은 불가능하다. 이에 항력 변화에 따른 초기거동의 변화를 살펴보는 것이 필요하다. 수중에서 발사되는 발사체의 초기속도인 발사속도 역시 정확한 추정은 어려운 일이다. 발사체를 탑재한 플랫폼에서 속도를 설정하여 발사되는 것이 아니라 공압/유압과 같은 압력을 설정하여 발사되기 때문이다.

이러한 이유로 Table 4와 같이 분석 변수의 범위를 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. Table 4에서 무게중심(center of gravity)은 발사체 최후방을 기준으로, 전체 길이 대비 무게중심이 위치한 비율을 나타낸 것이다. 예를 들어 무게중심 40 %는, 대상체 최후방에서 전체 길이의 40 % 만큼 전방 방향으로 떨어진 위치에 무게중심이 있음을 의미한다.

Table 4. Simulation conditions

Parameters	Value
Center of gravity (%)	34, 40, 46
Drag coefficient	0.66, 0.82, 0.98
Lauching velocity (m/s)	12, 16, 20

분석 기준값인 무게중심(CG) 40 %, 항력계수(C_D) 0.82, 그리고 발사속도(VL) 16 m/s일 때의 분석 결과는 Fig. 3와 같다. Fig. 3의 시뮬레이션 결과를 통해 발사 직후 발사체의 초기거동 특성을 분석할 수 있다. 먼저, 발사 직후 항력의 영향으로 인해 발사체의 속도는 급속히 감소하며 약 2초 경과 시 속도가 0에 가까워짐을 알 수 있다. 발사 후 2초가 지나면 발사체는 플랫폼으로부터 약 6 m 이격된 거리에서 자세가 연직면을 향하게 되며 침강하는 거동을 보인다. 이러한 침강 과정에서 자세 안정화가 이루어지며, 발사 후 약 6초가 되면 전방 프로펠러에 의한 자체 추력에 의해 발사체가 상승하는 과정이 확인되었다.

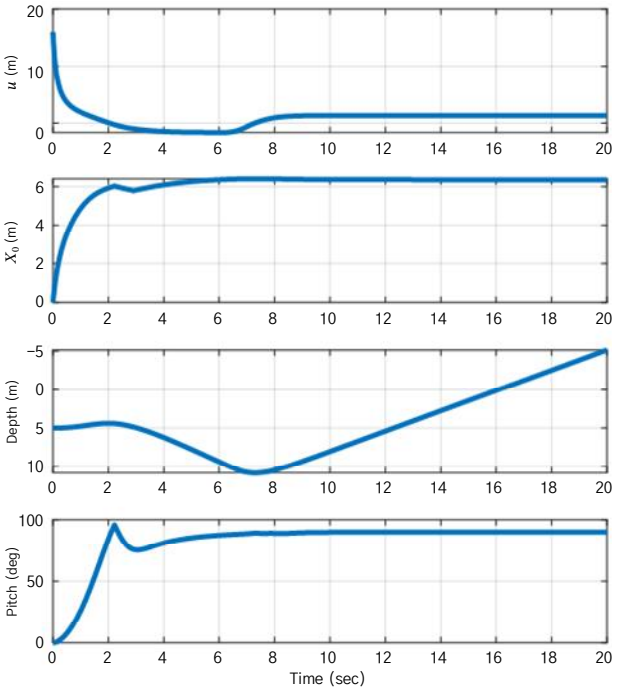


Fig. 3. Simulation results(CG: 40 %, C_D: 0.82, V_L: 16 m/s)

Fig. 4는 발사체의 자세를 포함한 궤적을 보여준다. Fig. 3를 통해 확인한 발사 직후의 속도 감쇠와, 침강 과정에서의 자세 안정화, 그리고 자체 추력에 의한 재상승의 과정을 Fig. 4의 궤적을 통해서도 일관되게 확인할 수 있다.

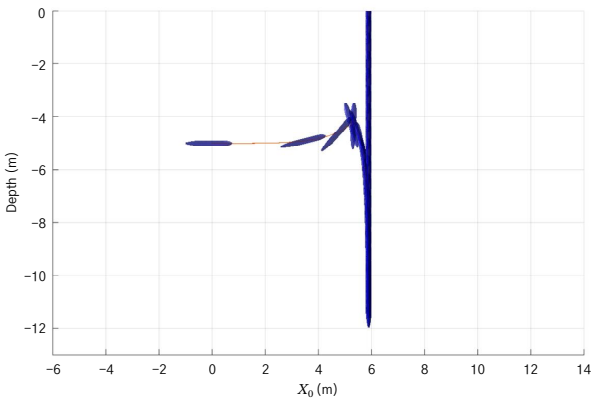


Fig. 4. Vehicle trajectory(CG: 40 %, C_D: 0.82, V_L: 16 m/s)

Fig. 5는 발사체의 무게중심에 따른 발사체 초기거동의 시뮬레이션 결과이다. 무게중심이 동체 후방에 위치할수록 발사체는 빠르게 연직면 방향으로 자세가 변화하는 경향을 보인다. 이러한 자세 변화로 인해 발사체 측면에 유입 유동이 발생하며, 그 결과 횡저항(cross-flow drag)이 추가로 발생하게 된다. 이로 인해 발사체에 작용하는 전체 저항이 증가하고, 발사 플랫폼으로부터의 이격거리 또한 감소하는 것을 확인하였다.

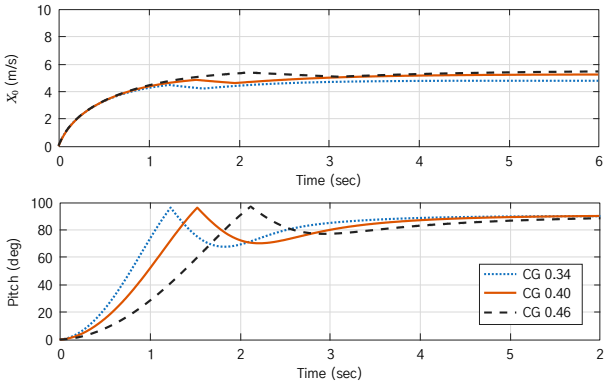
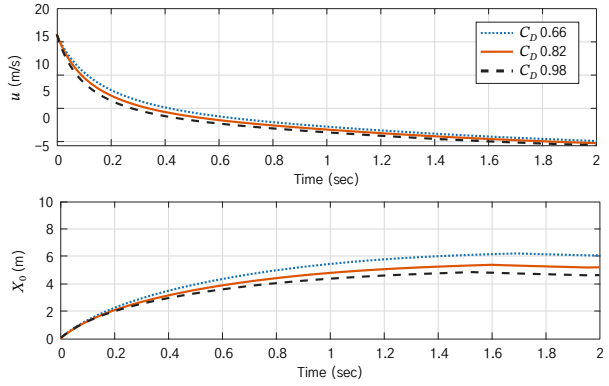
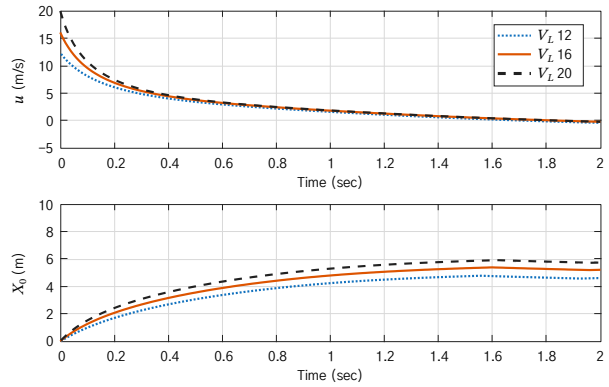


Fig. 5. Simulation results with respect to CG



(a) Variation of drag coefficient



(b) Variation of launching velocity

Fig. 6. Simulation results with respect to C_D and V_L

Fig. 6는 발사체의 항력 및 발사속도의 변화가 초기거동에 미치는 영향을 분석한 결과이다. 항력계수가 감소할수록, 그리고 발사속도가 증가할수록 발사 플랫폼으로부터의 이격거리가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 항력에 의한 속도 감쇠가 줄어들고, 초기 운동에너지의 증가로 인해 발사체가 보다 멀리 이동하게 됨을 의미한다. 각 조건별 이격거리의 수치는 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Separation distance(X_0) from launching platform (Unit: %)

C_D			V_L (m/s)		
0.66	0.82	0.98	12	16	20
88.1	100	116.2	86.5	100	110

5. 결론

본 논문에서는 전방에 프로펠러를 장착한 수중발사체의 초기거동을 분석하기 위해 M&S 기법을 활용하였다. 수중 발사체의 유체력 모델을 구축하기 위해 항력을 포함한 동유체력계수를 추정하고, 발사체 형상 및 주요 설계 변수들을 반영한 동역학 모델을 구성하였다. 특히, 전방 프로펠러 구조의 특성을 고려하여 항력계수를 보정하였으며, 이를 기반으로 발사체 초기거동에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션을 통해 발사체의 초기속도 감쇠, 침강 과정에서의 자세 안정화, 그리고 자체 추력에 의한 재상승과 같은 초기거동의 전이과정들을 확인하였다. 또한 무게중심 위치, 항력계수, 발사속도의 변화가 초기거동에 미치는 영향을 분석하였다. 무게중심이 후방에 위치할수록 연직 자세를 빨리 취하게 되었으며, 이는 횡저항 증가를 유도하여 발사 플랫폼과의 이격거리도 짧아지는 영향을 주었다. 항력 계수가 낮고 초기 발사속도가 높을수록 발사체의 감속이 완화되고 전진 거리가 증가하여 발사 플랫폼과의 이격이 커지는 것을 확인하였다.

이러한 결과는 초기거동 특성이 무게중심의 위치 및 항력 특성, 초기 발사 조건에 따라 민감하게 변화함을 의미하며, 전방 프로펠러형 수중발사체의 설계 및 운용에 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] B. Helgason, L. Leifsson, I. Rikhardsson, H. Thorgilsson and S. Koziel, “Low-speed Modeling and Simulation of Torpedo-shaped AUVs,” in Proceedings of the 9th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Vol. 2, pp. 333-338, 2012.
[2] H. D. Kim and H. J. Cho, “Numerical Study on Control Derivatives of a High-speed Underwater Vehicle,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25, No. 3, pp. 759-765, 2011.
[3] M. Shin, D. Kim, J. Hwang, Y. Kim, H. Baek, S. Kim, S. Park, Y. Choi, H. Park and E. Kim, “Estimation of Maneuverability of Underwater Vehicles with Ahead Propeller by the Vertical Planar Motion Mechanism Test,” Journal of Navigation and Port Research, Vol. 46, No. 3, pp. 168-178, 2022.
[4] J. L. Johnson, “The Static Stability Derivatives of a Series of Related Bodies of Revolution,” Technical Report, NASA, 1959.
[5] E. M. Dempsey, “Static Stability Characteristics of a Systematic Series of Stern Control Surfaces on a Body of Revolution,” DTNSRDC Report 77-0085, Naval Ship Research and Development Center, 1977.
[6] J. Jeong, J. Han, J. Ok, H. Kim, D. Kim, Y. Shin and S. Lee, “Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicle Using Rotating Arm Test,” The Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 30, No. 1, pp. 25-31, 2016.
[7] D. A. Potts, J. R. Binns, A. E. Potts and H. Marcollo, “The Effect of Aspect Ratio on the Drag of Bare Cylinders,” in Proceedings of the 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2019-96431, 2019.