

CFD를 이용한 수중 예인체의 유체력 미계수 결정과 6자유도 운동해석

고광수¹·이은택¹·안형택^{1,†}·김성일²·천승용²·김정석³·이병희³
울산대학교 조선해양공학부¹
국방과학연구소 소나체계개발단²
(주)한화³

6DOF Simulation and Determination of Hydrodynamic Derivatives of Underwater Tow-Fish Using CFD

Gwangsoo Go¹·Euntaek Lee¹·Hyung Taek Ahn^{1,†}·Seongil Kim²·Seung Yong Chun²·Jung Suk Kim³·Byeong Hee Lee³
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea¹
Agency for Defense Development, SONAR System²
Hanwha Corporation³

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.

Techniques for determining hydrodynamic derivatives of underwater tow-fish using CFD(Computational Fluid Dynamics) are described in this paper. Main components of hydrodynamic derivatives are added mass, linear damping and non-linear damping coefficients. In this study, linear and non-linear damping coefficients for translational velocities are settled by CFD analysis. In order to analyze the underwater tow-fish, UlsanFOAM based on open-source CFD code, namely OpenFOAM, is employed. By simulating pitch and yaw angle variation of underwater tow-fish, 6DOF(Degree-of-Freedom) forces and moments are estimated at each attitudes. In order to determinate the hydrodynamic derivatives, curves(forces and moments vs attitude) for CFD results are fitted by least square methods. To demonstrate the applicability of the current approach, two different problems(impulsive side towing and straight towing) are simulated and all results are validated.

Keywords : Underwater tow-fish(수중 예인체), Hydrodynamic derivatives(유체력 미계수), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서론

최근 해저자원 개발 및 생산 활동에 따른 수중작업의 수요 증가로 인하여 다양한 형태의 수중 운동체 관련기술이 발전되고 있다. 또한, 해양에 존재하는 광물 자원의 탐사 및 채취 그리고 수중탐사 및 작업 등은 수중 운동체의 개발 필요성을 더욱 증가시키고 있다. 이에 따라 수중 운동체에 대한 연구가 활발하게 수행되고 있다(Jeong, 2015).

수중 운동체에 대한 일반화된 운동방정식은 The Society of Naval architects and Marine Engineers(SNAME) (1950)과 Fossen (1994)에 의해 정립되어 있기 때문에, 수중 운동체의 운동특성 해석에 있어서 가장 중요한 것은 수중 운동체에 작용하는

유체력을 결정하는 것이다. 국내에서도 수중 운동체에 작용하는 유체력에 대한 많은 연구가 활발히 수행되었다. 이중 대표적으로, Son, et al. (2006)은 Manta형 무인잠수정에 대한 유체력 미계수를 이론적 접근방법과 예인수조를 활용한 정적 사형시험으로 예측하였으며, Jeong, et al. (2016)은 강제선회시험으로 수중 운동체에 작용하는 유체력 미계수를 추정하였다.

본 연구에서는, 일차적으로 직접 추력을 발생하지 않고 수상선에 의해 예인되는 수중 예인체에 작용하는 유체력 미계수를 CFD 해석을 통하여 결정하고, 최종적으로 이를 이용하여 수중 예인체의 6자유도 운동을 예측하고자 한다. Ahn and Jung (2012)에 의해 CFD 해석으로 수중 운동체의 유체력 미계수중 일부를 예측한 연구사례가 존재하지만, 해석대상이 매우 단순한 형상이며 유체력 미계수를 예측하는 과정이 체계적으로 명시되어

있지 않다. 수중 예인체에 대한 대표적인 연구로는 해외에서 수행된 Sun, et al. (2011)가 있다. 국내에서는 Park and Kim (2015)에 의해 수중 예인체에 대한 연구가 진행된 바 있다. 본 논문에서는 수중예인체의 운동예측을 위하여 필요한 유체력 미계수 결정에, CFD해석을 활용하는 기법에 대한 새로운 방법론을 제시 하고자 한다.

본 연구에서 해석하고자 하는 수중 예인체는 Sun, et al. (2011)과 유사한 유선형 형상의 수중 예인체이다. 수중 예인체에 작용하는 동유체력은 유체에 의한 비선형 감쇠효과를 포함하는 2nd-order modulus 전개 (Fedyayevsky & Sobolev, 1963)로 모델링 하였다. 모델링된 동유체력을 구성하는 유체력 미계수는 크게 부가질량과 감쇠계수로 나누어진다. 부가질량은 Imlay (1961)과 Son, et al. (2006)을 활용하여 이론적으로 계산하였다. 회전 속도에 대한 감쇠계수는 Santhankumar, et al. (2009)에 의해 형상변화에 따른 민감도가 낮은 것으로 제시된 바 있어, Sun (2009)에 제시된 유사선형의 미계수 값을 차용했다. 병진속도에 대한 감쇠계수는 CFD 해석결과를 최소자승(least square)법으로 커브피팅(curve-fitting)하여 구하였다. CFD 해석은 오픈소스 CFD 해석 코드인 OpenFOAM (OpenCFD Ltd, 2004; Wikipedia, 2007)에 기반을 둔 UlsanFOAM (Kwon & Ahn, 2015; Kwon, 2016; Won & Ahn, 2015; Won, 2016)으로 수행 하였다. OpenFOAM을 활용한 타 연구사례로는 Park and Kang (2010), Park and Rhee (2012), Oh and Kim (2015) 등이 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 2절에서는 수중 예인체에 대한 6자유도 운동방정식이 정립된다. 3절에서는 수중 예인체의 CFD 해석결과가 제시되며, 4절에서는 이를 활용하여 유체력 미계수를 결정하는 과정이 자세히 기술된다. 5절에서는 결정된 유체력 미계수의 신뢰성이 정성적 그리고 정량적으로 검증된다. 마지막으로 6절에서는 본 연구에 대한 결론으로 마무리된다.

2. 6자유도 운동 정식화

2.1 3차원 좌표계

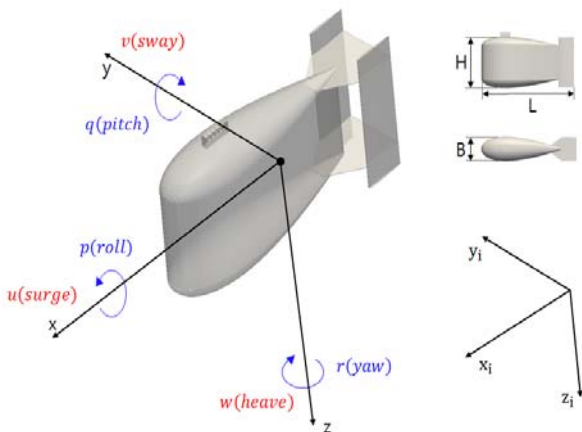


Fig. 1 Inertial and body-fixed coordinates system

Fig. 1은 수중 예인체의 운동을 표현하기 위해 사용되는 관성 좌표계(x, y, z)와 물체고정좌표계(x_i, y_i, z_i)를 나타낸다. 예인체의 움직임은 물체고정좌표계에서 계산한 후 관성좌표계로 변환하여, 나타낸다. 물체고정좌표계는 예인체의 선수가 +x 방향, 우현이 +y 방향 그리고 선저가 +z 방향이다. 물체고정좌표계의 중심은 예인체의 길이(L), 폭(B), 높이(H)의 중간에 위치한다.

2.2 좌표계 변환

관성좌표계에서 예인체의 위치 및 자세는 다음과 같은 벡터로 나타낸다.

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \quad (1)$$

$$\eta_1 = [x_i, y_i, z_i]^T, \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (2)$$

여기서 η_1 과 η_2 는 각각 관성좌표계에서의 위치와 오일러(Euler) 각을 의미한다. 물체고정좌표계에서 예인체의 속도는 다음과 같이 나타낸다.

$$\nu = [\nu_1^T, \nu_2^T]^T \quad (3)$$

$$\nu_1 = [u, v, w]^T, \nu_2 = [p, q, r]^T \quad (4)$$

여기서 ν_1 과 ν_2 는 각각 물체고정좌표계에서 병진속도와 각속도를 의미한다. 물체고정좌표계에서 계산된 예인체의 병진속도를 관성 좌표계로 변환하기 위해서 변환행렬 J_1 을 활용한다.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)\nu_1 \quad (5)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & s\theta s\psi c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (6)$$

where $s(\cdot) = \sin(\cdot)$, $c(\cdot) = \cos(\cdot)$

변환행렬 J_1 는 $z_i(\psi)$ 축, $y_i(\theta)$ 축 그리고 $x_i(\phi)$ 축 순서로 회전함에 따라 식 (6)과 같이 구성된다. 물체고정좌표계에서 계산된 예인체의 각속도를 관성좌표계로 변환하기 위해서 변환행렬 J_2 를 활용한다.

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)\nu_2 \quad (7)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

where $t(\cdot) = \tan(\cdot)$

변환행렬 \mathbf{J}_2 는 θ 값이 ± 90 도일 때 특이점(singularity)이 발생한다. 본 연구에서 고려하는 예인체는 후미 부분에 부착된 수평 꼬리날개에 의해 종동요(pitch)에 대한 복원성이 뛰어나다. 따라서 식 (8)에서 발생하는 특이점은 계산과정에서 큰 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

2.3 운동방정식

물체고정좌표계에서 일체의 가정이나 단순화를 고려하지 않은 가장 일반적인 6자유도 운동방정식은 다음과 같다.

$$m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) + z_g(pr + \dot{q})] = X \tag{9}$$

$$m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) + x_g(qp + \dot{r})] = Y \tag{10}$$

$$m[\dot{w} - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) + y_g(rq + \dot{p})] = Z \tag{11}$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)] = K \tag{12}$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] = M \tag{13}$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} + m[x_g(\dot{v} - wp + ur) - y_g(\dot{u} - vr + wq)] = N \tag{14}$$

식 (9)-(11)은 각각 xyz축에 대한 병진 운동방정식이고, 식 (12)-(14)는 각각 xyz축에 대한 회전 운동방정식이다. 여기서 m은 질량, I_{ij} 는 관성모멘트($I_{ij}=I_{ji}$) 그리고 x_g, y_g, z_g 는 무게중심좌표를 뜻한다. X, Y, Z, K, M, N은 본 논문의 주요 관심사인 유체력을 포함하는 모든 외력을 의미하여, 다음절에서 그 수학적 정식화에 대해서 자세히 기술된다.

식 (9)-(14)의 좌변은 예인체의 가속도에 의한 힘, 물체고정좌표계를 사용함에 따라 발생하는 코리올리(Coriolis) 힘 그리고 물체고정좌표계와 예인체의 무게중심이 동일하지 않기 때문에 발생하는 구심력으로 구성되어있다. 전술된 6자유도 운동방정식은 벡터 형식을 이용하면 다음과 같이 간략히 표현될 수 있다.

$$\mathbf{M}_{RB}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{RB} \tag{15}$$

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{xz} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) = \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m(y_gq + z_gr) & m(y_gp + w) & m(z_gp - v) \\ m(x_gq - w) & -m(z_gr + x_gp) & m(z_gq + u) \\ m(x_gr + v) & m(y_gr - u) & -m(x_gp + y_gq) \\ m(y_gq + z_gr) & -m(x_gq - w) & -m(x_gr + v) \\ -m(y_gp + w) & m(z_gr + x_gp) & -m(y_gr - u) \\ -m(z_gp - v) & -m(z_gq + u) & m(x_gp + y_gq) \\ 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_{zz}r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_{yy}q \\ I_{yz}q + I_{xz}p - I_{zz}r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_{xx}p \\ -I_{yz}r - I_{xy}p + I_{yy}q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_{xx}p & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = [X, Y, Z, K, M, N]^T \tag{18}$$

\mathbf{M}_{RB} 는 예인체의 관성행렬, \mathbf{C}_{RB} 는 코리올리와 구심력 행렬 그리고 $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ 는 외력벡터를 의미한다. 식 (15)에서 구해야하는 미지수는 예인체의 속도벡터인 \mathbf{v} 이다. \mathbf{C}_{RB} 는 \mathbf{v} 에 대한 행렬이기 때문에 본 연구에서 풀어야할 운동방정식은 비선형 미분방정식이다. 식 (15)를 통해 해석한 예인체의 속도는 물체고정좌표계에 대한 값이기 때문에 식 (5), (7)의 관계를 활용하여 다음과 같이 관성좌표계에서의 속도 값으로 변환시켜주어야 한다.

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \tag{19}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2 \end{bmatrix} \tag{20}$$

식 (15)의 $\boldsymbol{\tau}_{RB}$ 는 다음과 같이 분할하여 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau}_{RB} = \boldsymbol{\tau}_{HS} + \boldsymbol{\tau}_{HD} + \boldsymbol{\tau}_T \tag{21}$$

여기서 $\boldsymbol{\tau}_{HS}$ 는 정수력, $\boldsymbol{\tau}_{HD}$ 는 동유체력 그리고 $\boldsymbol{\tau}_T$ 는 예인력을 뜻한다. $\boldsymbol{\tau}_{HS}$ 는 예인체의 무게 W와 부력 B에 의해 다음과 같이 정의된다. 식 (22)에서 x_b, y_b, z_b 는 부력중심 좌표이다.

$$\tau_{HS} = \begin{Bmatrix} -(W-B)s\theta \\ (W-B)c\theta s\phi \\ (W-B)c\theta c\phi \\ (W_yg - By_b)c\theta c\phi - (Wz_g - Bz_b)c\theta s\phi \\ -(Wz_g - Bz_b)s\theta - (Wx_g - Bx_b)c\theta c\phi \\ (Wx_g - Bx_b)c\theta s\phi + (W_yg - By_b)s\theta \end{Bmatrix} \quad (22)$$

2.4 유체력 미계수

동유체력(τ_{HD})를 나타내는 가장 기본적인 방법은 다음과 같은 선형화된 모델을 활용하는 것이다. 선형화는 Taylor-series 전개에 기반을 두고 이루어진다.

$$\begin{aligned} X &= X_u u + X_v v + X_w w + X_p p + X_q q + X_r r \\ &\quad + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{\dot{v}} \dot{v} + X_{\dot{w}} \dot{w} + X_{\dot{p}} \dot{p} + X_{\dot{q}} \dot{q} + X_{\dot{r}} \dot{r} \\ &\quad \vdots \\ N &= N_u u + N_v v + N_w w + N_p p + N_q q + N_r r \\ &\quad + N_{\dot{u}} \dot{u} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{w}} \dot{w} + N_{\dot{p}} \dot{p} + N_{\dot{q}} \dot{q} + N_{\dot{r}} \dot{r} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 속도 성분에 곱해져 있는 항들을 감쇠계수, 가속도 성분에 곱해져 있는 항들을 부가질량이라고 정의하고 이를 총칭하여 유체력 미계수라고 한다. 식 (23)과 같은 방법은 유체력의 비선형성을 표현할 수 없기 때문에 비선형성을 고려할 수 있는 모델링 방법을 적용해야한다. 비선형화 모델링 기법 중 가장 많이 쓰이는 방법은 식 (24)와 같이 Taylor-series 전개의 홀수 항(1, 3차)을 활용하는 것 (Abkowitz, 1964)과 식 (25)와 같이 2nd-order modulus 전개 (Fedyavsky & Sobolev, 1963)를 사용하는 것이다.

$$\begin{aligned} X &= X_u \dot{u} + X_u u + X_{uuu} u^3 + X_v \dot{v} + X_v v + X_{vvv} v^3 + \dots \\ &\quad \vdots \\ N &= N_u \dot{u} + N_u u + N_{uuu} u^3 + N_v \dot{v} + N_v v + N_{vvv} v^3 + \dots \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} X &= X_u \dot{u} + X_u u + X_{u|u} |u| + X_v \dot{v} + X_v v + X_{v|v} |v| + \dots \\ &\quad \vdots \\ N &= N_u \dot{u} + N_u u + N_{u|u} |u| + N_v \dot{v} + N_v v + N_{v|v} |v| + \dots \end{aligned} \quad (25)$$

식 (24) 방법의 경우 속도 및 가속도 변화에 따른 힘의 변화를 미분가능(differentiable)한 함수 형태로 표현할 수 있지만, 온전히 수학적 모델링에 의존한 방법이기 때문에 각 항에 대응하는 물리적인 의미에 대한 기반이 약하다. 이와는 반대로 식 (25)의 경우 Modulus 항으로 인해 물리적인 현상을 보다 더 효과적으로 표현 가능한 것으로 알려져 있다 (Fossen, 1994). 본 연구에서는 식 (25)와 같은 2nd-order modulus 전개방법으로 다음과 같이 동유체력을 모델링 하였다.

$$\tau_{HD} = M_a \dot{\nu} + D_l \nu + D_n |\nu| \quad (26)$$

where $\nu|\nu| = [u|u|, v|v|, \dots, q|q|, r|r|]^T$

여기서 M_a 는 부가질량, D_l 은 선형 감쇠계수 그리고 D_n 은 비선형 감쇠계수를 뜻한다. M_a , D_l 그리고 D_n 은 6x6 행렬이기 때문에 τ_{HD} 를 모델링하기 위해서는 총 108개의 유체력 미계수가 결정되어야 한다.

$$M_a = \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$D_l = \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$D_n = \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{v|v} & X_{w|w} & X_{p|p} & X_{q|q} & X_{r|r} \\ Y_{u|u} & Y_{v|v} & Y_{w|w} & Y_{p|p} & Y_{q|q} & Y_{r|r} \\ Z_{u|u} & Z_{v|v} & Z_{w|w} & Z_{p|p} & Z_{q|q} & Z_{r|r} \\ K_{u|u} & K_{v|v} & K_{w|w} & K_{p|p} & K_{q|q} & K_{r|r} \\ M_{u|u} & M_{v|v} & M_{w|w} & M_{p|p} & M_{q|q} & M_{r|r} \\ N_{u|u} & N_{v|v} & N_{w|w} & N_{p|p} & N_{q|q} & N_{r|r} \end{bmatrix} \quad (29)$$

2.4.1 부가질량

예인체의 부가질량은 이론적으로 결정한다. 예인체는 몸체와 꼬리 날개로 구성되어있기 때문에 몸체와 꼬리날개에 대한 부가질량을 각각 구해야 한다. 몸체의 부가질량은 Strip 이론으로 구한다. 몸체의 단면을 Lewis form에 근사시켜서 2차원 부가질량을 구하고 길이방향에 대해 적분한다 (Son, et al., 2006). 꼬리 날개는 2개의 수평날개와 2개의 수직날개로 구성되어있다. 수평 날개는 z방향 부가질량(m_h), 수직날개는 y방향 부가질량(m_v)을 가지게 되며 다음과 같은 식으로 구할 수 있다 (Lewis, 1989).

$$m_h = \frac{2\pi\rho b_h A_h}{\sqrt{a_h^2 + 1}} \quad (30)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, b_h 는 수평날개의 길이(span), A_h 는 수평날개의 면적 그리고 a_h 는 수평날개의 종횡비(aspect ratio)를 뜻한다. m_v 도 식 (30)과 동일한 방법으로 구한다.

$$M_a^R = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (31)$$

예인체는 물체고정좌표계를 기준으로 상하, 좌우대칭이기 때 문 식 (27)은 식 (31)과 같이 축소된 형태로 나타난다. 각각의 항 은 다음과 같이 정의된다.

$$X_u = \int a_{11} dz \quad (32)$$

$$Y_v = \int a_{22} dx + \sum_{i=1}^2 (m_v)_i \quad (33)$$

$$Y_r = N_v = \int x_m a_{22} dx + \sum_{i=1}^2 (x_v m_v)_i \quad (34)$$

$$Z_w = \int a_{33} dx + \sum_{i=1}^2 (m_h)_i \quad (35)$$

$$Z_q = M_w = - \int x_m a_{33} dx - \sum_{i=1}^2 (x_h m_h)_i \quad (36)$$

$$K_p = \int a_{44} dx \quad (37)$$

$$M_q = \int x_m^2 a_{33} dx + \sum_{i=1}^2 (x_h^2 m_h)_i \quad (38)$$

$$N_r = \int x_m^2 a_{22} dx + \sum_{i=1}^2 (x_v^2 m_v)_i \quad (39)$$

a_{11} 은 몸체의 종단면에 대한 x방향 부가질량, a_{22} 는 몸체의 횡 단면에 대한 y방향 부가질량, a_{33} 는 몸체의 횡단면에 대한 z방향 부가질량 그리고 a_{44} 는 몸체의 횡단면에 대한 x축 부가관성모멘 트이다. x_m 은 횡단면까지의 거리를 뜻한다. x_h 와 x_v 는 각각 수평 날개와 수직날개 중심까지의 거리를 뜻한다.

2.4.2 감쇠계수

감쇠계수는 CFD 해석뿐만 아니라, 유사 선형에 대한 정보를 활용하여 결정한다. Sun (2009)에 의해 유사 선형 형상의 몸체에 대한 주요 감쇠계수는 다음과 같다고 제시되었다.

$$D_i^R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 & 0 & Y_r \\ 0 & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & K_p & 0 & K_p & 0 & K_r \\ 0 & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$D_n^R = \begin{bmatrix} X_{u|u|} & X_{v|v|} & X_{w|w|} & 0 & X_{q|q|} & X_{r|r|} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{r|r|} \\ 0 & 0 & Z_{w|w|} & 0 & Z_{q|q|} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{w|w|} & 0 & 0 & M_{r|r|} \\ 0 & N_{v|v|} & 0 & 0 & 0 & N_{r|r|} \end{bmatrix} \quad (41)$$

이 중 병진속도에 대한 선형 및 비선형 감쇠계수는 CFD 해석 결과를 통해 결정한다. 이에 대한 자세한 내용은 4절에서 다루어 진다. 회전속도에 대한 감쇠계수의 결정을 위해서는 일반적으로 회전 팔(rotating arm) 시험과 같은 수조실험이 필요하나, 관련 시험에 필요한 시간과 비용을 고려하여 유사선형의 사례로 판단 되는 Sun (2009)에 제시된 유체력 미계수 값을 차용했다. 결과 적으로 본 연구에서 동유체력은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{HD} = M_a^R \nu + D_i^R \nu + D_n^R \nu \quad (42)$$

3. CFD 해석

CFD 해석을 위한 도구로는 오픈소스 CFD 코드인 OpenFOAM (OpenCFD Ltd, 2004; Wikipedia, 2007)을 예인체 주위 유동해 석에 적합하게 단순화시킨 UlsanFOAM (Kwon & Ahn, 2015; Kwon, 2016; Won & Ahn, 2015; Won, 2016)을 활용 하였다. OpenFOAM은 2004년에 최초 개발자인 Weller가 OpenFOAM이 라는 이름으로 소스코드와 프로그램을 무료로 공개하면서 급속 히 보급되었다 (Wikipedia, 2007). 이후 OpenFOAM Foundation 이라는 단체를 통하여 지속적인 개발과 최신버전(Ver.1606 2016.6월 배포)이 공개되고 있다 (OpenCFD Ltd, 2004). UlsanFOAM은 OpenFOAM Ver. 2.4(2015.5월 배포판)을 시작으 로, 전체 OpenFOAM에 포함된 라이브러리 중에서 본 문제의 해 석에 적합한 비압축성 솔버(simpleFOAM, pimpleDyMFoam, interDyMFoam 등)를 취사선택한 후, 솔버 세팅, 형상정의, 격자 생성, 난류모델 설정 등에 필요한 입력 변수의 기본 값을 사전 설정하는 방법으로 전반적인 해석 프로세스의 단순화를 목표로 재구성되었다. 따라서 UlsanFOAM은 OpenFOAM의 부분집합 코 드라고 할 수 있으며, 이는 지속적으로 새로운 기능이 추가되고 있는 OpenFOAM 공식 배포판 중에서 필요한 부분만을 선택적으 로 활용한다는 측면에서, 오픈소스 코드에 대한 효율적인 활용

방법이라고 판단된다. 문자열 기반의 OpenFOAM 운용 환경의 접근성을 높이기 위하여, GUI(Graphics User Interface) 기능의 필요성이 제기 되었으며, 이를 위하여 Oh and Kim (2015)의 사례를 참고하였다.

3.1 해석방법

UlsanFOAM을 활용한 3차원 CFD 해석을 통해 수중 예인체에 작용하는 6자유도 방향에 대한 힘과 모멘트를 예측하였다. Fig. 2와 같이 관성좌표계 기준 $+x_x$ 방향으로 등속 운동하는 예인체를 해석하기 위해 Fig. 3과 같이 해석조건을 정립했다. CFD해석에 필요한 격자는 삼각형의 조합으로 표현되는 표면형상을 기반으로, OpenFOAM의 기본 격자 생성자인 snappyHexMesh를 이용하여 Cut-cell 기반의 방식으로 생성한다. Fig. 3은 해석 영역의 y_z 축 값이 0인 x_z 평면으로써 Cut-cell을 통해 생성된 격자구조를 나타낸다. 수중 예인체가 $+x_x$ 방향으로 등속 예인하는 현상은 $-x_x$ 방향으로 유속이 U_x 의 크기로 흐르도록 하여 구현했다. 본 연구에서는 U_x 의 크기를 5m/s로 정하여 해석을 수행하였다.



Fig. 2 Tow-fish which has uniform velocity to $+x_x$ direction

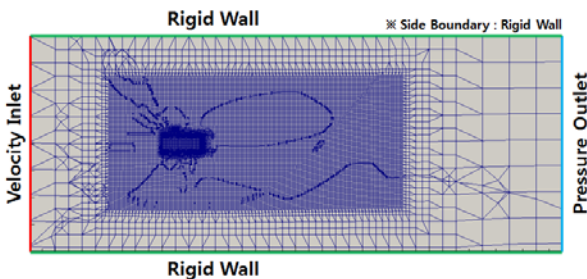


Fig. 3 CFD simulation conditions for underwater tow-fish

3.2 종동요(pitch) 각 변화

Fig. 3과 같은 동일한 해석조건에서 물체고정좌표계에 대한 수중 예인체의 종동요 각을 Fig. 4와 같이 변화시키면서 해석을 수행했다. 해석은 종동요 각을 $-40\sim+40$ 도 사이를 5도씩 변화시키면서 각각의 경우(총 17가지 경우)에 대하여 정상상태(steady-state) CFD해석을 수행했다.

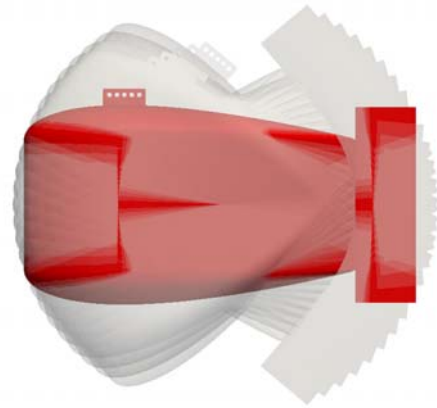


Fig. 4 Pitch angle variation

해석 결과를 통해 측정된 물체고정좌표계 기준 6자유도 방향에 대한 힘과 모멘트는 Fig. 5와 같다. 유속은 $-x_x$ 방향 5m/s로 동일한 상황에서 수중 예인체의 종동요 각만 변화시켰기 때문에 예인체에 작용하는 좌우동요(sway) 힘, 횡동요(roll) 그리고 선수동요(yaw) 모멘트 값은 0에 가까운 값으로 예측되었다. 전후동요(surge) 힘의 경우 종동요 각이 0도일 때 가장 크게 나타나고 종동요 각이 커질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

상하동요(heave) 힘의 경우 종동요 각이 +일 때 예인체의 자세가 머리올림(nose up)이기 때문에 예인체의 아래 부분에 높은 압력이 작용하여 $-$ 방향의 힘이 발생하게 된다. 이와는 반대로 종동요 각이 $-$ 일 경우 예인체의 자세가 머리내림(nose down)이기 때문에 예인체의 윗부분에 높은 압력이 작용하여 $+$ 방향의 힘이 발생하게 된다. 종동요 모멘트의 경우 종동요 각과 반대 부호의 모멘트, 즉 복원모멘트가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 선수동요(yaw) 각 변화

Fig. 3과 같은 동일한 해석조건에서 물체고정좌표계에 대한 수중 예인체의 선수동요 각을 Fig. 6과 같이 변화시키면서 해석을 수행했다. 해석은 선수동요 각을 $-40\sim+40$ 도 사이를 5도씩 변화시키면서 각각의 경우(총 17가지 경우)에 대하여 정상상태(steady-state) CFD해석을 수행했다.

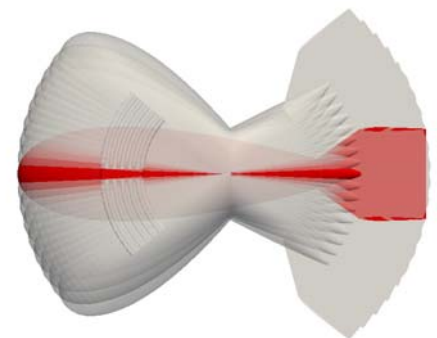


Fig. 6 Yaw angle variation

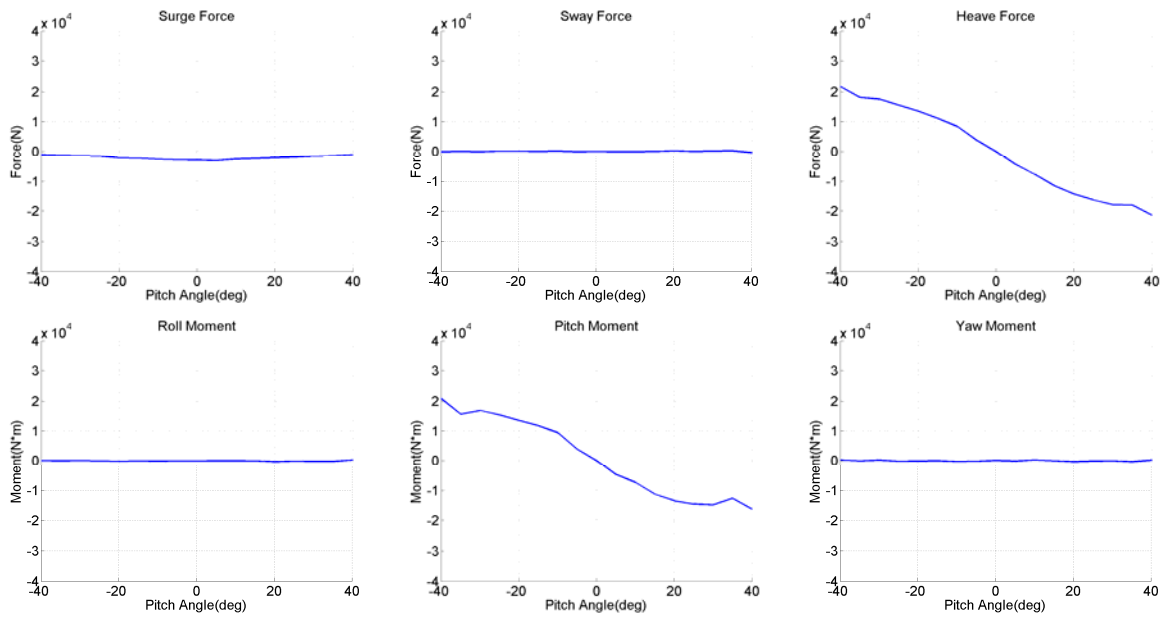


Fig. 5 CFD simulation results with respect to pitch angle variation of underwater tow-fish. Forces and moments are calculated about body-fixed coordinates.

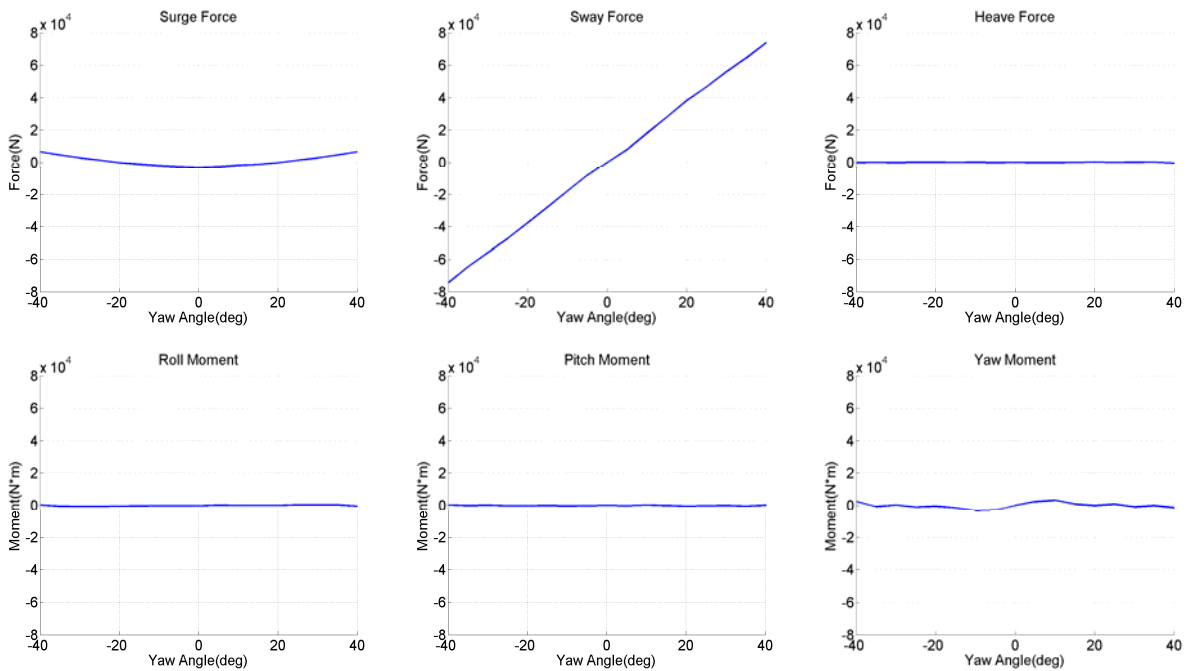


Fig. 7 CFD results with respect to yaw angle variation of underwater tow-fish. Forces and moments are calculated about body-fixed coordinates.

해석 결과를 통해 측정된 물체고정좌표계 기준 6자유도 방향에 대한 힘과 모멘트는 Fig. 7과 같다. 유속은 -x방향 5m/s로 동일한 상황에서 수중 예인체의 선수동요 각만 변화시켰기 때문에 예인체에 작용하는 상하동요(heave) 힘과 종동요(pitch) 모멘트 값은 0에 가까운 값으로 예측되었다. 횡동요(roll)와 선수동요 모멘트 값은 모멘트를 유발시키는 힘의 작용점이 물체고정좌표계의 원점과 근접하여 0에 가까운 값으로 예측된 것으로 판단된다.

전후동요(surge) 힘의 경우 선수동요 각이 0도일 때 가장 크게 나타나고 선수동요 각이 ±방향으로 커질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다. ±20도 부근에서 전후동요 힘이 +방향으로 작용하는 이유는 선수동요 각 변화에 따라 예인체에 의해 발생하는 양력(lift)이 항력(drag)에 비해 월등히 크게 발생했기 때문이다. 물체고정좌표계로 변환시 양력은 +방향 전후동요 힘을 항력은 -방향 전후동요 힘으로 변환된다. 좌우동요(sway) 힘의 경우 선수동

요 각이 +일 때 예인체의 좌현에 높은 압력이 작용하여 +방향의 힘이 발생한다. 이와는 반대로 선수동요 각이 -일 때 예인체의 우현에 높은 압력이 작용하여 -방향의 힘이 발생한다.

4. 유체력 미계수 결정방법

본 장에서는 3절에서 제시된 CFD 해석 결과를 통해 유체력 미계수를 예측하는 방법이 제시된다.

4.1 종동요(pitch) 각 변화에 따른 유체력 미계수 결정

Fig. 8과 같이 관성좌표계에 대하여 등속도로 움직이는 수중 예인체는 종동요 각 변화에 따라 물체고정좌표계에서의 병진속도 중 x와 z 방향 속도(u,w)가 변하게 된다. 동유체력은 u,w에 대한 함수이기 때문에 식 (42)에서 부가질량, 회전속도에 대한 감쇠계수 그리고 y방향 속도 v에 대한 감쇠계수는 고려되지 않는다. 이를 자세히 나타내면 다음과 같다.

$$\tau_{HD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Z_w \\ 0 & 0 \\ 0 & M_w \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{w|u} \\ 0 & 0 \\ 0 & Z_{w|w} \\ 0 & 0 \\ 0 & M_{w|w} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u|u \\ w|w \end{Bmatrix} \quad (43)$$

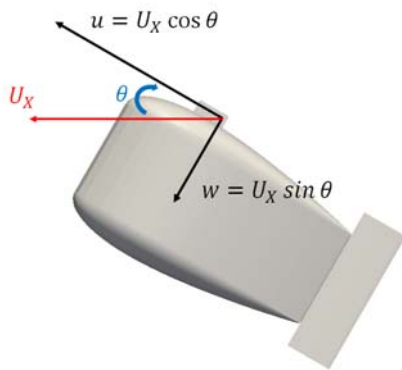


Fig. 8 Variation of translational velocities about body-fixed coordinates with respect to change of pitch angles

식 (43)과 같이 종동요 각 변화 CFD 해석을 통해 결정할 수 있는 유체력 미계수는 총 6개이다. 식 (43)을 각 방향별로 세분화하면 다음과 같다.

$$X_{HD} = X_{u|u}|u|u| + X_{w|w}|w|w| \quad (44)$$

$$Z_{HD} = Z_w w + Z_{w|w}|w|w| \quad (45)$$

$$M_{HD} = M_w w + M_{w|w}|w|w| \quad (46)$$

Fig. 5를 통해 u와 w의 변화에 따른 XHD, ZHD 그리고 MHD의 값은 통계적으로 알고 있기 때문에 식 (44)-(46)에서의 미지수는 6가지의 유체력 미계수가 된다. 따라서 식 (44)-(46)은 각각 식 (47)-(49)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} X_{\theta_1} \\ X_{\theta_2} \\ \vdots \\ X_{\theta_{16}} \\ X_{\theta_{17}} \end{Bmatrix}_{\theta_{p1}} = \begin{bmatrix} u_{\theta_1} & |u_{\theta_1}| & w_{\theta_1} & |w_{\theta_1}| \\ u_{\theta_2} & |u_{\theta_2}| & w_{\theta_2} & |w_{\theta_2}| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{\theta_{16}} & |u_{\theta_{16}}| & w_{\theta_{16}} & |w_{\theta_{16}}| \\ u_{\theta_{17}} & |u_{\theta_{17}}| & w_{\theta_{17}} & |w_{\theta_{17}}| \end{bmatrix}_{A_{p1}} \begin{Bmatrix} X_{u|u} \\ X_{w|w} \end{Bmatrix}_{x_{p1}} \quad (47)$$

$$\begin{Bmatrix} Z_{\theta_1} \\ Z_{\theta_2} \\ \vdots \\ Z_{\theta_{16}} \\ Z_{\theta_{17}} \end{Bmatrix}_{\theta_{p2}} = \begin{bmatrix} w_{\theta_1} & |w_{\theta_1}| & |w_{\theta_1}| \\ w_{\theta_2} & |w_{\theta_2}| & |w_{\theta_2}| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{\theta_{16}} & |w_{\theta_{16}}| & |w_{\theta_{16}}| \\ w_{\theta_{17}} & |w_{\theta_{17}}| & |w_{\theta_{17}}| \end{bmatrix}_{A_{p2}} \begin{Bmatrix} Z_w \\ Z_{w|w} \end{Bmatrix}_{x_{p2}} \quad (48)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{\theta_1} \\ M_{\theta_2} \\ \vdots \\ M_{\theta_{16}} \\ M_{\theta_{17}} \end{Bmatrix}_{\theta_{p3}} = \begin{bmatrix} w_{\theta_1} & |w_{\theta_1}| & |w_{\theta_1}| \\ w_{\theta_2} & |w_{\theta_2}| & |w_{\theta_2}| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{\theta_{16}} & |w_{\theta_{16}}| & |w_{\theta_{16}}| \\ w_{\theta_{17}} & |w_{\theta_{17}}| & |w_{\theta_{17}}| \end{bmatrix}_{A_{p3}} \begin{Bmatrix} M_w \\ M_{w|w} \end{Bmatrix}_{x_{p3}} \quad (49)$$

여기서 theta_n은 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_n = 40 - 5(n - 1) \quad (50)$$

X_theta_n, Z_theta_n, M_theta_n은 각각 theta_n에서 CFD를 통해 계산된 전후동요 (surge) 힘, 상하동요(heave) 힘 그리고 종동요 모멘트를 뜻한다. u_theta_n, w_theta_n에 대한 정의는 Fig. 8에서 제시되었듯이 다음과 같다.

$$u_{\theta_n} = U_x \cos(\theta_n) \quad (51)$$

$$w_{\theta_n} = U_x \sin(\theta_n) \quad (52)$$

식 (47)-(49)를 하나의 식으로 표현하면 다음과 같다.

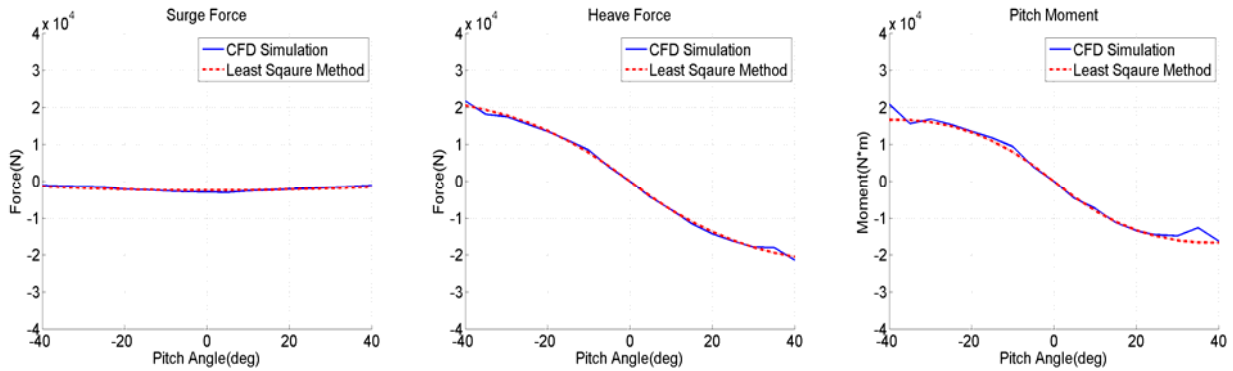


Fig. 9 Comparison of surge force, heave force and pitch moment with respect to pitch angle variation between CFD simulation and least square method

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} b_{p1} \\ b_{p2} \\ b_{p3} \end{Bmatrix}}_{b_p} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_{p1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{p2} & 0 \\ 0 & 0 & A_{p3} \end{bmatrix}}_{A_p} \underbrace{\begin{Bmatrix} x_{p1} \\ x_{p2} \\ x_{p3} \end{Bmatrix}}_{x_p} \quad (53)$$

본 논문의 경우 b_p 는 51x1 벡터, A_p 는 51x6 행렬 그리고 x_p 는 6x1 벡터이다. 여기서 미지수는 x_p 이기 때문에 식 (53)은 미지수의 계수(6개)보다 식의 수(51개)가 많은 Overdetermined 시스템이다. 따라서 x_p 는 식 (53)을 식 (54)와 같이 Determined 시스템으로 변환시킨 후 식 (55)와 같이 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 최소자승(least square)법이라고 한다.

$$A_p^T(b_p = A_p x_p) \quad (54)$$

$$x_p = (A_p^T A_p)^{-1} A_p^T b_p \quad (55)$$

Fig. 9는 최소자승법을 통해 결정된 6개의 유체력 미계수로 계산된 종동요 각 변화에 따른 전후동요 힘, 상하동요 힘 그리고 종동요 모멘트를 CFD 해석과 비교한 결과이다.

4.2 선수동요(yaw) 각 변화에 따른 유체력 미계수 결정

선수동요 각 변화에 따른 유체력 미계수 결정과정은 4.1절에서 제시된 방법과 동일하게 진행된다. Fig. 10과 같이 예인체는 선수동요 각 변화에 따라 물체고정좌표계에서의 병진속도 중 x와 y방향 속도(u, v)가 변하기 때문에 식 (42)는 다음과 같이 표현된다.

선수동요 각 변화 CFD 해석을 통해 결정할 수 있는 유체력 미계수는 총 6개이다. 이 중 $X_{u|u}$ 는 4.1절에 이미 구한 값이다. 또한, Fig. 7에서 횡동요(roll) 모멘트 값이 선수동요 각 변화와 상관없이 항상 0이기 때문에 K_v 값이 0임을 알 수 있다. 따라서 4.2절에서는 총 4개의 유체력 미계수를 결정하게 된다.

$$\tau_{HD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Y_v \\ 0 & 0 \\ 0 & K_v \\ 0 & 0 \\ 0 & N_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{u|u} & X_{v|v} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N_{v|v} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} |u| \\ |v| \end{Bmatrix} \quad (56)$$

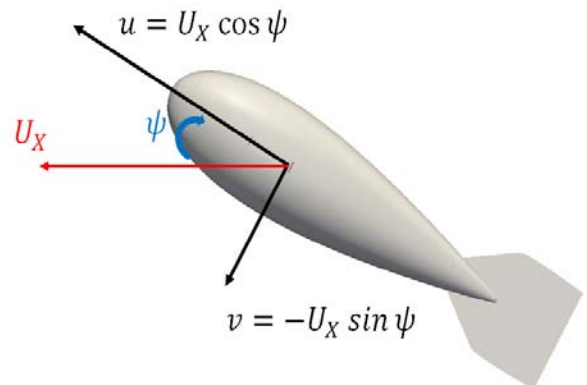


Fig. 10 Variation of translational velocities about body-fixed coordinates with respect to change of yaw angles

실질적으로 구해야하는 유체력 미계수만을 고려하여 식 (56)을 각 방향별로 세분화하면 다음과 같다.

$$X_{HD} = X_{u|u}|u| + X_{v|v}|v| \quad (57)$$

$$Y_{HD} = Y_v v \quad (58)$$

$$N_{HD} = N_v v + N_{v|v}|v| \quad (59)$$

유체력 미계수를 결정하기 위해 식 (57)–(59)는 각각 식 (60)–(62)와 같이 나타낸다.

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} X_{\psi_1} \\ X_{\psi_2} \\ \vdots \\ X_{\psi_{16}} \\ X_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{b}_{y1}} \underbrace{\begin{Bmatrix} u_{\psi_1} & u_{\psi_1} \\ u_{\psi_2} & u_{\psi_2} \\ \vdots & \vdots \\ u_{\psi_{16}} & u_{\psi_{16}} \\ u_{\psi_{17}} & u_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{A}_{y1}} X_{u|v} = \underbrace{\begin{Bmatrix} v_{\psi_1} & v_{\psi_1} \\ v_{\psi_2} & v_{\psi_2} \\ \vdots & \vdots \\ v_{\psi_{16}} & v_{\psi_{16}} \\ v_{\psi_{17}} & v_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{A}_{y1}} X_{v|v} \quad (60)$$

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} \mathbf{b}_{y1} \\ \mathbf{b}_{y2} \\ \mathbf{b}_{y3} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{b}_y} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{y1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_{y3} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_y} \underbrace{\begin{Bmatrix} x_{y1} \\ x_{y2} \\ x_{y3} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{x}_y} \quad (66)$$

식 (66)은 식 (60)-(62)를 하나의 식으로 나타낸 결과이다. 본 논문의 경우 \mathbf{b}_y 는 51x1 벡터, \mathbf{A}_y 는 51x4 행렬 그리고 \mathbf{x}_y 는 4x1 벡터이다. 식 (66)은 미지수의 수(4개)보다 식의 수(51개)가 많은 Overdetermined 시스템이다. 따라서 \mathbf{x}_y 는 4.1절에서 제시된 방법과 동일한 과정으로 구한다.

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} Y_{\psi_1} \\ Y_{\psi_2} \\ \vdots \\ Y_{\psi_{16}} \\ Y_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{b}_{y2}} = \underbrace{\begin{Bmatrix} v_{\psi_1} \\ v_{\psi_2} \\ \vdots \\ v_{\psi_{16}} \\ v_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{A}_{y2}} X_{v|v} \quad (61)$$

$$\mathbf{A}_y^T(\mathbf{b}_y = \mathbf{A}_y \mathbf{x}_y) \quad (67)$$

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} N_{\psi_1} \\ N_{\psi_2} \\ \vdots \\ N_{\psi_{16}} \\ N_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{b}_{y3}} = \underbrace{\begin{Bmatrix} v_{\psi_1} & v_{\psi_1} & v_{\psi_1} \\ v_{\psi_2} & v_{\psi_2} & v_{\psi_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{\psi_{16}} & v_{\psi_{16}} & v_{\psi_{16}} \\ v_{\psi_{17}} & v_{\psi_{17}} & v_{\psi_{17}} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{A}_{y3}} \underbrace{\begin{Bmatrix} N_v \\ N_{v|v} \end{Bmatrix}}_{\mathbf{x}_{y3}} \quad (62)$$

$$\mathbf{x}_y = (\mathbf{A}_y^T \mathbf{A}_y)^{-1} \mathbf{A}_y^T \mathbf{b}_y \quad (68)$$

Fig. 11은 최소자승법을 통해 결정된 4개의 유체력 미계수로 계산된 선수동요 각 변화에 따른 전후동요 힘, 좌우동요 힘 그리고 선수동요 모멘트를 CFD 해석과 비교한 결과이다. 전후동요 힘에서 선수동요 각의 크기가 증가함에 따라 오차가 발생하는 이유는 2절에서 가정했던 동유체력 모델링의 한계라고 판단된다.

여기서 ψ_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$\psi_n = 40 - 5(n - 1) \quad (63)$$

$X_{\psi_n}, Y_{\psi_n}, N_{\psi_n}$ 은 각각 ψ_n 에서 CFD를 통해 계산된 전후동요(surge) 힘, 좌우동요(sway) 힘, 선수동요 모멘트를 뜻한다. u_{ψ_n}, v_{ψ_n} 에 대한 정의는 Fig. 8에서 제시되었듯이 다음과 같다.

$$u_{\psi_n} = U_X \cos(\psi_n) \quad (64)$$

$$v_{\psi_n} = -U_X \sin(\psi_n) \quad (65)$$

5. 결정된 유체력 미계수 신뢰성 검증

4절에서 결정된 병진속도에 대한 유체력 미계수의 신뢰성을 검증하기 위해 수중 예인체 거동해석 결과를 정성적(5.1절) 그리고 정량적(5.2절)으로 비교해보았다.

5.1 90도 긴급 예인 거동해석

관성좌표계 기준 $+y_i$ 방향으로 긴급 예인하는 상황을 시뮬레이션하였다. 시간에 따른 예인체의 자세변화를 정성적으로 판단하여 결정된 유체력 미계수의 신뢰성을 검증하였다. 긴급 예인은 정지된 상태에서 순간속도로 가하여 예인하는 상황을 뜻한다.

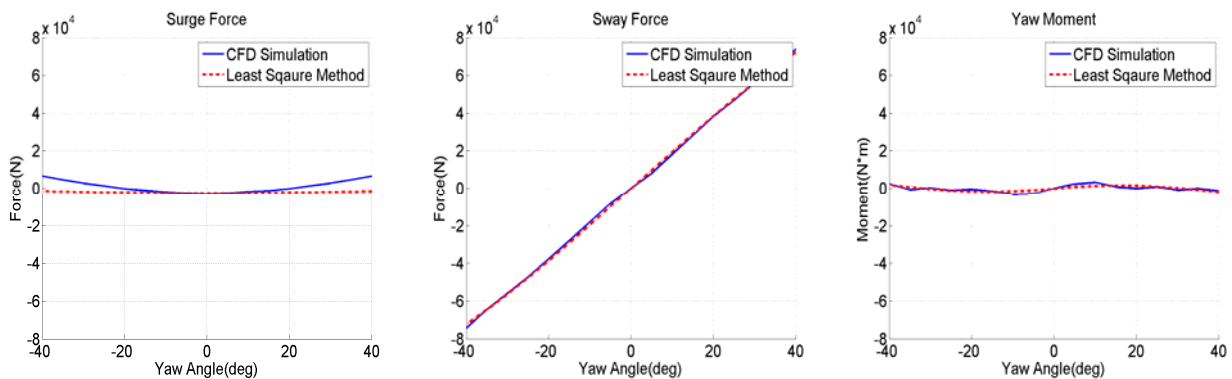


Fig. 11 Comparison of surge force, sway force and yaw moment with respect to yaw angle variation between CFD simulation and least square method

본 연구에서 수행한 90도 긴급 예인에 대한 초기조건은 Fig. 12와 같다. 몸체의 위쪽에 위치한 예인장치의 맨 뒤쪽 구멍을 구속한 상태로 예인하는 조건이다. x_i , z_i 방향에 대한 병진운동은 구속되고 회전운동은 자유롭게 발생하게 된다. 해석은 10초간 이루어졌으며, 시간에 따른 자세변화를 Fig. 13, 14와 같이 나타냈다.

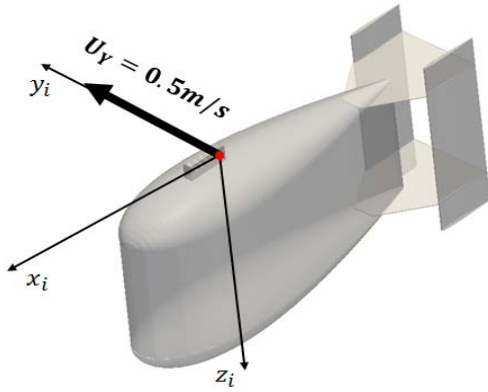


Fig. 12 Initial condition of impulsive side towing simulation

Fig. 13을 통해 $+y_i$ 방향으로 예인됨에 따라 예인체의 선수부분이 예인방향으로 수렴해나가는 것을 확인할 수 있다. 긴급 예인이기 때문에 발생할 수 있는 과도한 횡동요(roll)도 관측할 수 있었다. 자세변화를 보다 더 정확히 확인해 보기 위해 Fig. 14와 같이 시간에 따른 Euler 각의 변화 추이를 나타냈다. 초기에 발생했던 과도한 횡동요는 시간이 지남에 따라 사라지는 것을 확인할 수 있다. 선수동요(yaw) 각이 90도로 수렴해가는 현상도 명확히 관측되었다.

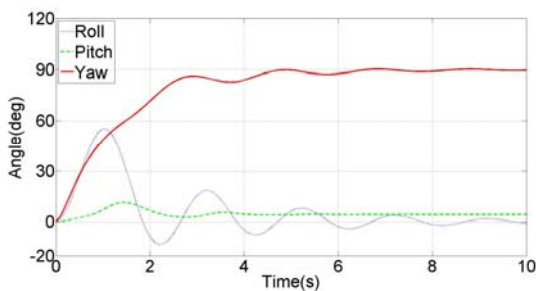


Fig. 14 Time history of variation of Euler angles

5.2 직진 예인 거동해석

직진 예인시 발생하는 자세변화 해석결과를 회류수조 실험과 비교해보았다. 실험에 사용된 회류수조는 최대 1m/s의 유속을 발생시킬 수 있으며, 관측영역의 크기는 2400mm(길이) x 900mm(폭) x 900mm(높이)이다. 실험에 사용된 모형 예인체의 크기는 369mm(길이) x 85.3mm(폭) x 188mm(높이)이다. 모형 예인체는 내부에 추를 배치할 수 있도록 설계되었으며, 추의 계수와 위치를 조절하여 무게특성을 변화시킬 수 있다. 본 실험에서는 CAD(Computer Aided Design) 프로그램을 활용하여 수중에서 초기자세로 4.74도의 종동요(pitch) 각을 가지도록 추의 계수와 위치를 결정했다.

및 위치를 조절하여 무게특성을 변화시킬 수 있다. 본 실험에서는 CAD(Computer Aided Design) 프로그램을 활용하여 수중에서 초기자세로 4.74도의 종동요(pitch) 각을 가지도록 추의 계수와 위치를 결정했다.

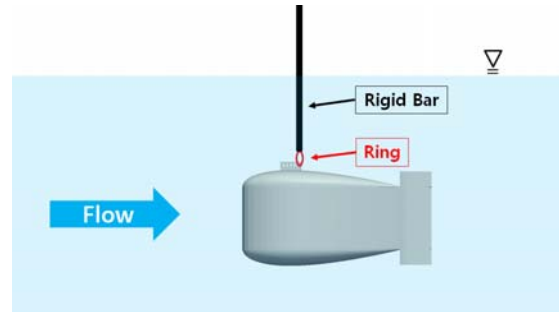


Fig. 15 Conceptual diagram of experiment

직진 예인상황을 실험으로 재현하기 위해서는 병진운동은 구속되고 회전 운동은 자유롭게 발생될 수 있어야 한다. 이와 같은 부분 구속 모형실험을 위한 개념도는 Fig. 15와 같다. 수중 예인체가 고정된 강체 막대기에 링으로 연결되어 있기 때문에 병진운동은 구속되고 회전 운동은 자유롭게 발생될 수 있다. Fig. 16은 Fig. 15와 같이 제시된 개념도를 실제 회류수조에서 재현한 결과를 나타낸다.

자세변화는 예인체 내부에 IMU(Inertial Measurement Unit)센서를 장착하여 측정하였다. 사용된 센서는 RUVA TECH에서 제작된 RTxQ모델이다. 최소 측정각도는 0.1도이고 초당 약 60번 각도변화를 측정할 수 있다. 각도 측정은 자이로스코프와 가속도계를 이용해 가속도를 구한 후 시간 적분을 통해 이루어진다.



Fig. 16 Partial captive model experiment in circulating water channels

Table 1 Reynolds numbers with respect to flow velocity

Flow velocity(m/s)	Reynolds number
0	0
0.32	1.18×10^5
0.64	2.36×10^5
0.96	3.54×10^5

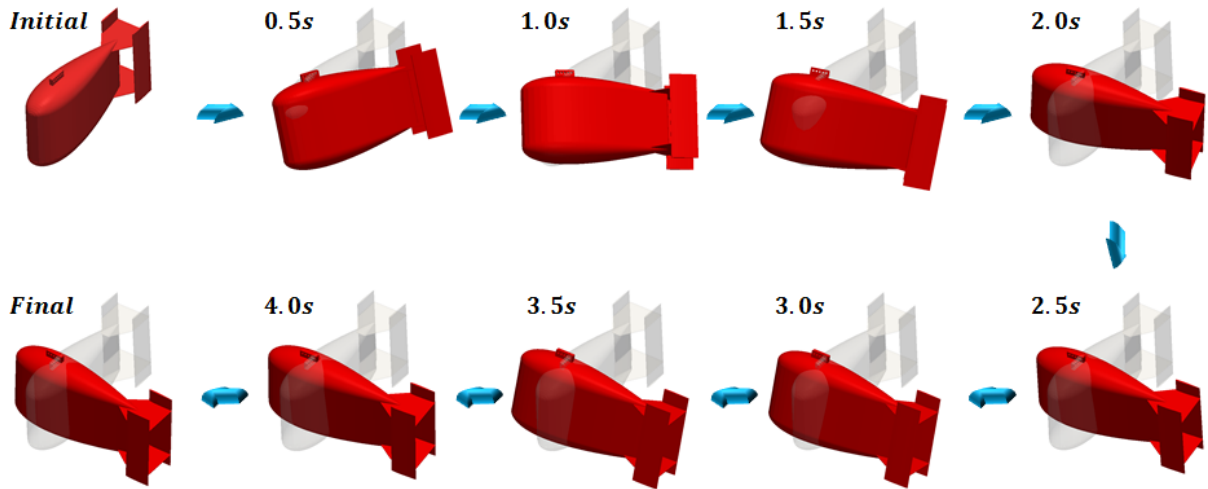


Fig. 13 Snapshots of impulsive side towing simulation. Shade means initial attitude

실험은 회류수조 임펠러의 회전수를 0rpm, 200rpm, 400rpm, 600rpm으로 바꿔가면서 수행했다. 이에 상응하여 발생하는 평균 유속은 각각 0m/s, 0.32m/s, 0.64m/s, 0.96m/s이다. 모형 예인체의 길이에 대한 유속별 레이놀즈 수(Reynolds number)는 Table 1과 같다. 회류수조 임펠러에 의해 발생하는 유속이 목표로 하는 각각의 속도에 도달할 수 있도록 충분한 시간을 두고 실험을 진행했다. 목표속도에 도달한 후에 60초간 예인체의 자세를 IMU센서를 활용하여 측정하였다. 직진 예인 거동해석 결과를 실험결과와 비교하기 위해 Fig. 17과 같은 직진 예인 시뮬레이션 시나리오를 구축하였다. 등속구간은 60초, 가속도 구간은 10초인 조건이다.

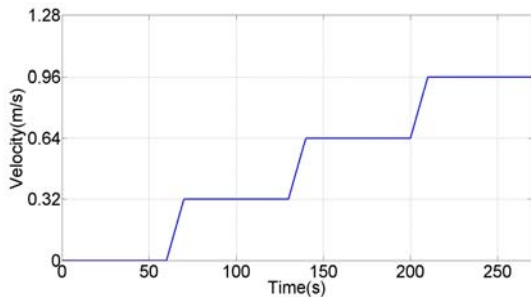


Fig. 17 Towing velocity scenario for straight towing simulation

시뮬레이션과 실험의 결과비교는 Fig. 18과 같다. 시뮬레이션의 경우 직진 예인시 종동요에 대한 자세변화만 발생하기 때문에 실험결과 중에서도 종동요 각만을 따로 발취하였다. 예인시나리오에 따라 해석된 시뮬레이션 결과 그래프에 각 등속구간에 대응하는 실험결과를 겹쳐서 표현하였다.

실험의 경우 시뮬레이션에서 고려되지 않은 센서의 신호처리 과정에서 발생하는 기계적인 잡음(noise), 유동 박리(flow separation)에 의해 발생하는 와류 방출(vortex shedding) 그리고

난류(turbulent flow)의 영향 때문에 결과 값이 진동하게 된다. Fig. 18에서 유속이 없을 때 실험값이 진동하는 현상은 센서의 기계적인 잡음이 주요원인이다. 이후 유속이 증가함에 따라 발생하는 와류와 난류의 추가적인 영향으로 실험값 진동의 진폭이 커지게 된다.

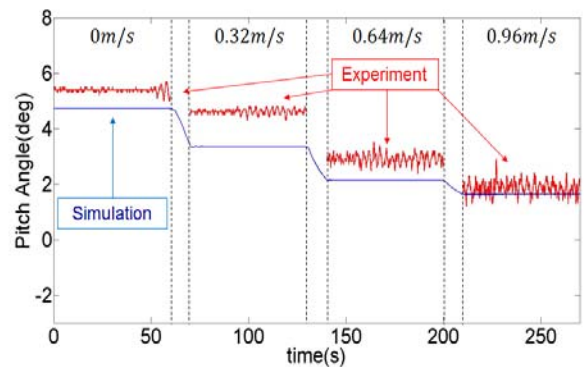


Fig. 18 Comparison of variation of pitch angle between simulation and experiment

Fig. 18을 통해 각 유속별 오차는 대략 1도 정도로 실험값이 크게 측정되고 있으나, 시뮬레이션이 실험에서 측정된 자세변화의 전반적인 경향성을 매우 유사하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 시뮬레이션의 경우 앞서 제시되었던 설계된 초기자세 값(종동요 4.74도)을 초기조건으로 주었기 때문에 실험에서 자세변화가 1도 정도 크게 측정되고 있다고 판단할 수 있다. 이와 같은 이유로 실험과 시뮬레이션 사이에서 발생한 오차의 주요 원인은 실험에 사용된 센서의 초기 값 설정 문제에서 비롯된 측정오차라고 판단된다. 본 연구를 통해 결정된 유체력 미계수는 유속에 따른 자세변화에 영향을 미치는 동유체력을 구성하는 요소들이다. 직진 예인 거동해석 결과가 실험에서 측정된 자세변화의 경향성을 유사하게 나타내고 있기 때문에 결정된 유체력 미계수를 정량적으로 검증할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 CFD 해석기법을 이용하여 수중 예인체의 유체력 미계수를 결정하였다. 결정된 유체력 미계수의 신뢰성을 검증하기 위해 90도 긴급 예인 거동해석과 직진 예인 거동해석을 수행하였다. 이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- PMM(Planar Motion Mechanism) 시험이나 회전 팔(rotating arm) 시험과 같은 고 비용의 수조 실험 없이 CFD 해석만으로 수중 예인체의 핵심적인 유체력 미계수를 결정할 수 있는 가능성을 확인했다.
- 90도 긴급 예인 거동해석에서 초기에 발생하는 과도한 자세 변화와 시간이 지남에 따라 예인체의 선수가 예인방향으로 수렴해나가는 현상을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 결정된 유체력 미계수의 신뢰성을 정성적으로 검증할 수 있었다.
- 직진 예인 거동해석에서 나타난 수중 예인체의 자세변화에 대한 경향성이 회류수조 모형실험 결과와 매우 유사함을 확인하였으며, 이를 통해 결정된 유체력 미계수의 신뢰성을 정량적으로 검증할 수 있었다.

본 논문에서 수행한 검증으로는 모든 유체력 미계수의 신뢰성을 평가하기는 어렵다. 따라서 시뮬레이션 결과를 다양한 운동이 고려된 모형실험결과와 비교하여 결정된 유체력 미계수를 다각적인 관점에서 검증할 수 있는 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 본 연구를 통해 제시된 유체력 미계수 결정기법이 추후 다양한 형상의 수중 예인체에 적용되기 위해서는 본 연구에서 유사선형의 값을 차용했던 회전속도에 대한 감쇠계수 결정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 (주)한화와 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Abkowitz, M.A., 1964. *Lectures on Ship Hydrodynamics - Steering and Maneuverability. Technical Report No. Hy-5*. Lyngby: Hydro- and Aerodynamic's Laboratory, Denmark.
- Ahn, J.H. & Jung, C.H., 2012. A Study on the Analysis of Underwater Behaviors of Two Bodies Having Different Weight Characteristics. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 21(1), pp.35-43.
- Fedyayevsky, K.K. & Sobolev, G.V., 1963. *Control and Stability in Ship Design*. Leningrad: State Union Shipbuilding Industry Publishing House.
- Fossen, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Imlay, F.H., 1961. *The Complete Expressions for "Added Mass" of a Rigid Body Moving in an Ideal Fluid. Hydromechanics Laboratory, Research and Development Report No. 1528*. Washington, D.C.: Department of the NAVY, David Taylor Model Basin.
- Jeong, J.H., 2015. *Research on the captive model tests and prediction of hydrodynamic forces for the underwater vehicle*. Ph.D. Thesis. Pusan National University.
- Jeong, J.H. Han, J.H. Ok, J. Kim, H.D. Kim, D.H. Shin, Y.K. & Lee, S.K., 2016. Prediction of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicle Using Rotating Arm Test. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(1), pp.25-31.
- Kwon, S.E. & Ahn, H.T., 2015. Analysis of Self-propulsion performance for KCS using UlsanFOAM. *The General Meeting & Annual Autumn Conference, The Society of Naval Architects of Korea*, Geoje, Republic of Korea, 24-27 November 2015.
- Kwon, S.E., 2016. *Analysis of self-propulsion performance for KCS using UlsanFOAM*. Master Thesis. University of Ulsan.
- Lewis, E.V., 1989. *Principles of Naval Architecture, Vol. 3, 2nd Revision*. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- OpenCFD Ltd, 2004. *OpenFOAM - The open source CFD toolbox*. [Online] Available at: <http://www.openfoam.com>[Accessed 15 May 2015].
- Oh, G.H. & Kim, B.Y., 2015. Development GUI for using OpenFOAM. *Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Jeju, Republic of Korea, 14-15 May 2015.
- Park, J.K. & Kang, K.H., 2010. Review on OpenFOAM - An Open Source Software. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 15(3), pp.46-53.
- Park, S. & Rhee, S.H., 2012. CFD Code Development Using Open Source Libraries for Shipbuilding and Marine Engineering Industries. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(2), pp.151-157.
- Park, J.M. & Kim, N.W., 2015. Dynamic Modeling of a Semi-Submersible Autonomous Underwater Vehicle with a Towfish Towed by Cable. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(2), pp.409-425.

Son, K.H. Lee, S.K. & Ha, S.P., 2006. Mathematical Model for Dynamics of Manta-type Unmanned Undersea Vehicle with Six Degrees of Freedom and Characteristics of Maneuverability Response. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(4), pp.399-413.

Santhankumar, M. Asokan, T. & Sreeram, T.R., 2009. Analysis of Parameter Sensitivity Using Robust Design Techniques for a Flapfish Type Autonomous Underwater Vehicle. *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*, 2009, pp.1-10.

Sun, F.J., 2009. *Elastodynamic Analysis of Towed Cable Systems by a Novel Nodal Position Finite Element Method*. Master Thesis. Toronto: York University.

Sun, F.J. Zhu, Z.H. & LaRosa, M., 2011. Dynamic Modeling of Cable Towed Body Using Nodal Position Finite Element Method. *Ocean Engineering*, 38, pp.529-540.

The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1950. *Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid. Technical and Research Bulletin No. 1-5*. New York: SNAME.

Wikipedia, 2007. *OpenFOAM - Wikipedia*. [Online] (Updated 22 July 2016) Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM> [Accessed 25 July 2016].

Won, J.Y. & Ahn, H.T., 2015. ESD performance

evaluation using open source CFD program. *The General Meeting & Annual Autumn Conference, The Society of Naval Architects of Korea*, Geoje, Republic of Korea, 24-27 November 2015.

Won, J.Y., 2016. *Performance evaluation of duct for a JBC hull using UlsanFOAM*. Master Thesis. University of Ulsan.

