

수중모함에서 사출되는 고속 수중운동체의 초기 거동 모델링 및 시뮬레이션

윤현규^{*,1)} · 조현진²⁾

¹⁾ 창원대학교 산업조선해양공학부

²⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

Modeling and Simulation for the Initial Dynamics of a High Speed Underwater Vehicle Ejected from a Submerged Mother Ship

Hyeon Kyu Yoon^{*,1)} · Hyeonjin Cho²⁾

¹⁾ School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University, Korea

²⁾ The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 7 October 2015 / Revised 3 February 2016 / Accepted 25 March 2016)

ABSTRACT

Heavy-weight high speed underwater vehicle(HSUV) is launched from the submerged mother ship. For the safety point of view, it is important to confirm whether the HSUV would touch the launching mother ship. In this paper, the hydrodynamic force and moment were modeled by the polynomials of motion variables and the simple lift and drag acting on a plate and cylinder which consist of the HSUV's several parts. The mother ship was assumed as the Rankine half body to consider the flow field near the moving ship. Such hydrodynamic force and moment were included in the 6 DOF equations of motion of the HSUV and the dynamic simulations for the various conditions of the HSUV until the propeller activation were performed. Developed simulation program is expected to reduce the number of expensive sea trial test to develop safety logic of the HSUV at the initial firing stage.

Key Words : High Speed Underwater Vehicle(고속 수중운동체), Modeling and Simulation(모델링 및 시뮬레이션), Initial Firing Stage(초기 발사단계), Dynamics(동력학)

1. 서론

일반적으로 고속 수중운동체는 수중모함에서 발사되

는데, 수중모함에서 발사되는 방식에는 두 가지가 있다. 첫 번째는 발사관내에서 추진기를 작동하여 자체적으로 수영(Swim-out)하여 사출되는 방식이고, 두 번째는 고압의 압축공기를 이용하여 강제적으로 사출하는 방식이다. 어떤 방식을 사용하건 간에 수중모함의 안전성 확보를 위하여 발사관을 이탈하는 수중운동체

* Corresponding author, E-mail: hkyoon@changwon.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

가 수중모함과의 접촉이 일어나는지, 과도한 초기 불안정 거동을 보이는지에 대한 면밀한 검토가 요구된다. 이러한 초기거동은 제어판의 작동 로직, 추진기 작동 시점과 같은 운용로직 변수 결정에 중요한 입력 자료가 된다. 초기거동에는 수중운동체의 형상뿐만 아니라 수중모함의 속력, 조류와 같은 해상환경변수가 큰 영향을 주게 되며, 이를 실제 시험을 통하여 해석하기에는 많은 시간과 비용이 소요된다. 따라서, 발사관 이탈 후부터 일정 거리만큼 떨어질 때까지 수중운동체에 작용하는 외력을 모델링하고, 6자유도(전후동요: Surge, 좌우동요: Sway, 상하동요: Heave, 횡동요: Roll, 종동요: Pitch, 선수동요: Yaw) 운동방정식을 정립한 후 동력학 시뮬레이션을 통하여 초기거동을 해석하는 방법이 유용하다.

잠수함^[1]과 회전타원체 형상의 무인잠수정^{[2][3]}에 대한 6자유도 운동방정식에 대해서는 많은 연구가 이루어져 왔다. 일반적으로 운동방정식은 Newton의 제 2법칙을 이용하여 모델링하는데, 이 때 운동방정식의 우변을 구성하는 외력은 수중운동체의 운동에 대한 주변 유체력의 변화 정도를 나타내는 동유체력미계수(Hydrodynamic coefficient)를 이용하여 표현한다. 수중운동체의 동유체력미계수는 수직면 운동장치(Vertical planar motion mechanism) 시험^[4]을 통하여 추정하는데 이를 수행하기 위해서는 정도 높게 만들어진 모형과 대형수조가 필요하고 많은 비용이 소요되므로, 정상항주 상태의 속력 구간에 대하여만 수행하는 것이 일반적이다. 다른 방법으로는 수중운동체의 몸체, 제어판 등을 몇 개의 실린더(Cylinder), 평판(Plate)으로 구분하고, 각 구성부의 양항력계수^[5]와 대표점에서의 상대유속을 이용하여 동유체력을 모델링하는 방법이 있다. 첫 번째 방법은 수중운동체가 고속으로 정상항주하면서 소폭의 운동 변화가 있을 때 적합하고, 본 논문에서 고려하는 초기거동과 같이 상대적으로 저속이고, 대영각 운동이 일어나는 영역에서는 교차항력(Cross-flow drag) 효과^[6]를 고려할 수 있는 두 번째 방법이 더욱 효과적일 수 있다.

본 논문에서는 수중운동체의 발사후 초기거동을 모사하는데 적합한 동유체력 모델을 양항력계수를 이용하여 정립하였다. 이렇게 정립된 양항력계수를 이용하여 정립된 모델과 정상항주 상태를 대상으로 정립된 다항식 형태의 동유체력 모델을 적용하여 수중운동체의 초기거동 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통하여 수중운동체 초기거동 모사를 위해서는 양항력계수를

이용한 모델링이 더욱 적합함을 보였다. 이에 추가하여 수중모함을 Rankine 반체(Half-body)^[7]로 가정하여 전진하는 수중모함 주변 유동장을 계산하고, 이를 수중운동체에 유입되는 상대유속에 중첩하였다.

이러한 초기거동 해석 결과는 발사관을 이탈한 수중운동체 추진기 작동시점 결정에 활용될 예정이다. 추후, 실제 시험을 통하여 얻어진 초기거동 궤적과의 비교·검토를 통하여 최적의 동유체력 모델 구조를 선정하고, 동유체력미계수 또는 양항력계수를 튜닝하면 시뮬레이션을 통하여 보다 정확한 초기거동을 모사할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 발사 단계

군사용으로 사용되는 고속 수중운동체는 경량형(Light-weight)과 중량형(Heavy-weight)의 두 종류가 있다. 경량형은 수상함, 항공기 또는 헬기에서 투하되어 잠수함을 주표적으로 하고, 중량형은 본 논문에서의 수중모함인 잠수함에서 사출되어 수상함을 주표적으로 한다.

본 논문에서는 수중모함의 발사관에서 사출되는 중량형 고속 수중운동체를 대상으로 하고, 운동 범위는 발사관 이탈 후부터 추진기 작동시점까지로 한다. 이는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 수중운동체의 가속속, 속력의 크기에 따라 네 개로 구분된 운동단계 중에 2 단계에 해당한다. Fig. 1에는 각 단계별 속력 및 주요 사항을 나타내었다.

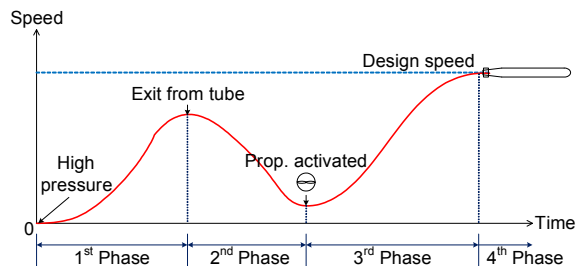


Fig. 1. Firing phases of a heavy-weight underwater vehicle launched in a mother ship's tube

2.1 1단계

1단계는 발사관내에서 수중운동체 후미에 고압의 압축력이 작용하는 순간부터 수중운동체의 후미가 발사

관을 이탈할 때까지로 정의하고, Fig. 2에 수중운동체에 작용하는 외력들을 도시하였다. 이 때 수중운동체는 가속운동을 하게 된다.

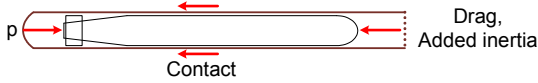


Fig. 2. Force vector diagram at the 1st phase

2.2 2단계

2단계는 앞서 언급한 바와 같이 수중운동체 후미가 발사관을 이탈하는 순간부터 추진기가 작동을 시작하는 시점까지로 정의한다. 이 단계에서는 고압의 압축력이 더 이상 수중운동체에 작용하지 않고, 추진력이 발생되기 전이므로 큰 감속 운동을 하고, 제어관이 작동하지 않고, 중량 및 부력, 각각의 중심점들에 차이가 있는 경우에 대영각 운동을 할 수 있다. 중량형 수중운동체는 실전용(War shot), 훈련용(Exercise shot)에 따라서 중량이 부력보다 크거나 그 반대가 된다.

Fig. 3에는 2단계에서 실전용 수중운동체에 작용하는 외력을 요소별로 나타내었다. 이 때 대영각 운동의 크기는 추진기가 어느 시점에서 작동되는가에 따라 달라지게 되는데, 만약 발사관 이탈시의 전진속력을 모두 잃을 때까지 추진기가 작동하지 않는다면 2단계 후반부의 외력 작용 형태는 Fig. 3의 마지막 그림과 같이 될 것이다.

본 논문에서는 수중모함과의 간섭 위험도가 가장 큰 2단계 운동만을 고려하기로 한다.

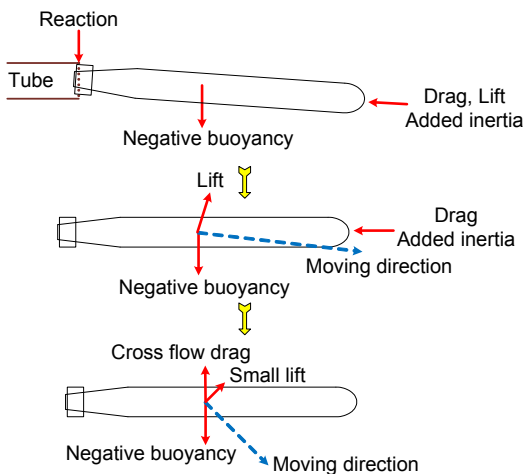


Fig. 3. Force vector diagram at the 2nd phase

2.3 3단계

3단계는 추진기 및 제어관이 작동하는 시점부터 정상항주상태에 도달하기까지로 정의한다. 이 단계에서는 Fig. 4에 도시한 바와 같이 Fig. 3의 2단계 외력 구성에 추진기와 제어관에 의한 추력과 제어력이 추가된다.

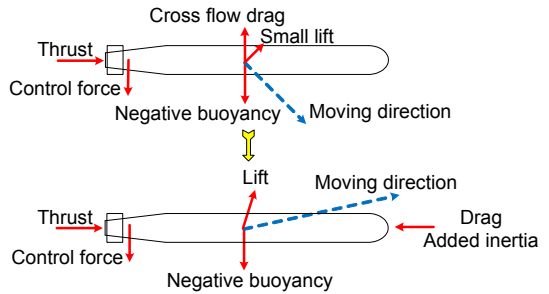


Fig. 4. Force vector diagram at the 3rd phase

2.4 4단계

4단계는 수중운동체가 정상항주상태에 도달하여 설계속력으로 직진 항주하는 것으로 정의한다. 이 단계에서 수중운동체는 고속으로 항주하므로 편류각(Drift angle) 및 영각이 작고, 운동 해석 관점에서 선형성이 보장된다.

3. 운동방정식

3.1 좌표계

수중운동체의 운동을 기술하기 위해서 Fig. 5에 나타낸 두 개의 좌표계가 필요하다.

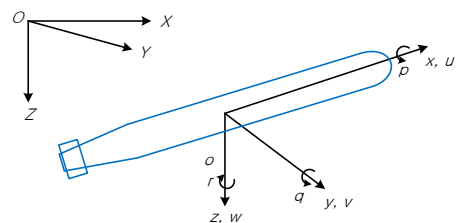


Fig. 5. Coordinate systems

첫 번째는 수중운동체의 위치와 자세각을 기술하기 위하여 수중운동체가 발사관을 이탈하는 순간, 즉, 본 논문에서 운동 시뮬레이션의 시작 시점에서, 수중모함

의 중심을 원점으로 하는 지구고정좌표계($O-XYZ$)이다. 이 좌표계는 양의 X 축, Z 축이 각각 발사관 방향, 연직 하방인 직각우수좌표계이고, 관성좌표계로 가정한다. 두 번째는 물체고정좌표계($o-xyz$)로서 원점은 수중운동체 몸체의 길이, 폭, 높이의 중심점이고, 양의 x 축, z 축이 선수방향, 아랫방향인 직각우수좌표계로서, 수중운동체와 함께 가속 및 회전운동을 하므로 비관성좌표계이다. 수중운동체의 병진속도(u, v, w) 및 회전각속도(p, q, r)는 물체고정좌표계에 대하여 기술된다.

3.2 6자유도 운동방정식

수중운동체의 질량분포가 Fig. 5의 xz 평면에 대하여 대칭이고, 정적안정성 보장을 위하여 무게중심만 원점보다 아래에 있다면 y 방향의 무게중심과 xy, yz 평면에 대한 교차질량관성모멘트는 0이 된다. 수중운동체의 6자유도 운동방정식은 Newton 제 2법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다^[7].

$$\begin{aligned}
 m[\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + z_G(\dot{p}r + \dot{q})] &= X \quad (1) \\
 m[\dot{v} - \phi + ur + z_G(\dot{q}r - \dot{p}) + x_G(\dot{q}p + \dot{r})] &= Y \\
 m[\dot{w} - uq + vp - z_G(\dot{p}^2 + \dot{q}^2) + x_G(\dot{r}p - \dot{q})] &= Z \\
 I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}(\dot{r} + pq) - mz_G(\dot{v} - wp + ur) &= K \\
 I_y\dot{q} + (I_x - I_z)rp + I_{xz}(\dot{p}^2 - r^2) \\
 + m[z_G(\dot{u} - vr + wq) - x_G(\dot{w} - uq + vp)] &= M \\
 I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pq + I_{xz}(rq - \dot{p}) + mx_G(\dot{v} - wp + ur) &= N
 \end{aligned}$$

여기서, Fig. 5에 정의된 운동변수들의 상첨자 ‘·’는 각 변수들의 시간변화율을 나타낸다. m, I_x, I_y, I_z, I_{xz} 는 각각 수중운동체의 질량, 하첨자 축들에 대한 질량관성모멘트를 나타내고, $(x_G, 0, z_G)$ 는 물체고정좌표계에 대하여 기술된 무게중심 위치벡터의 좌표값이다.

운동방정식 우측에 기술한 X, Y, Z, K, M, N 은 각 방향에 대한 외력들이다. 앞서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 추진기와 제어관이 작동하지 않는 2단계 운동만을 고려하므로 외력은 수중운동체 운동에 따른 주변 유체의 동유체력(하첨자 H 로 표기), 중력, 정유체력(하첨자 S 로 표기)만으로 구성된다.

식 (1)의 6자유도 운동방정식을 매시간 간격마다 풀면 u, v, w, p, q, r 을 얻을 수 있고, 이것을 321 Euler 변환법^[8]으로 $X, Y, Z, \phi, \theta, \psi$ 시간변화율로 변환한 후 수치적분을 하면 궤적 및 Euler각을 구할 수 있다.

3.3 중력과 정유체력

중력과 정유체력은 지구고정좌표계에 대하여 각각 연직하방, 연직상방으로 일정하게 작용한다. 하지만, 물체고정좌표계에 대하여는 수중운동체의 자세각(횡동요각: ϕ , 종동요각: θ , 선수동요각: ψ) 변화에 따라 각각 방향 성분은 다음과 같이 달라지게 된다.

$$\begin{aligned}
 X_S &= -(W - B)\sin\theta \quad (2) \\
 Y_S &= (W - B)\cos\theta\sin\phi \\
 Z_S &= (W - B)\cos\theta\cos\phi \\
 K_S &= -(z_G W - z_B B)\cos\theta\sin\phi \\
 M_S &= -(x_G W - x_B B)\cos\theta\cos\phi - (z_G W - z_B B)\sin\theta \\
 N_S &= (x_G W - x_B B)\cos\theta\sin\phi
 \end{aligned}$$

여기서, $W, B, (x_B, 0, z_B)$ 는 각각 수중운동체의 무게, 부력, 물체고정좌표계에 대하여 기술된 중심 위치벡터의 좌표값이다.

3.4 동유체력 - 다항식 모델

수중운동체의 4단계 운동과 같이 고속으로 정상항주하는 경우에는 영각이 매우 작아서 동유체력을 속도 및 가속도에 대한 선형함수로 모델링 한다. 이러한 선형운동방정식은 수중운동체의 운동 시뮬레이션뿐만 아니라 유도제어를 해석적으로 설계할 수 있는 기반이 된다.

이러한 이유 때문에 다항식 모델은 널리 사용되고 있고, 편류각 또는 영각이 큰 2단계 운동에도 적용하기 위하여 운동에 대한 Taylor 급수 전개 결과에서 2, 3차 비선형항을 다음과 같이 추가하여 모델링한다^[2].

$$\begin{aligned}
 X_H &= X_u \dot{u} + X_{uu} u^2 + X_{uv} v^2 + X_{uw} w^2 + X_{uq} wq \\
 &\quad + X_{uq} \dot{q}^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 \quad (3) \\
 Y_H &= Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_{uv} uv + Y_{ur} ur + Y_{v|v}|v| \\
 &\quad + Y_{r|r}|r| + Y_{\phi} \phi + Y_{pq} pq \\
 Z_H &= Z_w \dot{w} + Z_q \dot{q} + Z_{uw} uw + Z_{uq} uq + Z_{w|w}|w| \\
 &\quad + Z_{q|q}|q| + Z_{vp} vp + Z_{rp} rp \\
 K_H &= K_p \dot{p} + K_{p|p}|p| \\
 M_H &= M_w \dot{w} + M_q \dot{q} + M_{uw} uw + M_{uq} uq + M_{w|w}|w| \\
 &\quad + M_{q|q}|q| + M_{vp} vp + M_{rp} rp \\
 N_H &= N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_{uv} uv + N_{ur} ur + N_{v|v}|v| \\
 &\quad + N_{r|r}|r| + N_{\phi} \phi + N_{pq} pq
 \end{aligned}$$

여기서, X_u, \dots, N_r 은 부가질량 및 부가질량관성모멘트 계수, Y_{uv}, \dots, N_{ur} 은 선형감쇠계수, X_{uu}, \dots, N_{pq} 는 비선형 및 연성감쇠 및 부가질량계수를 나타낸다.

3.5 동유체력 - 양항력 모델

Fig. 3에 나타난 바와 같이 수중운동체가 발사관 이탈 속력을 모두 잃고 대역각 자유낙하 한다면 식 (3)의 비선형 다항식 모델로 교차항력을 표현하는데 불충분할 수 있다. 따라서, 이러한 경우에는 수중운동체와 제어판을 몇 개의 구성부로 나누고 각각에 대한 양력 계수 및 항력계수를 이용하여 모델링하는 것이 타당하다. 수중운동체 후부와 제어판 구성부 사이에는 복잡한 유동이 형성되지만 이에 대한 정확한 영향을 고려하는 것은 어렵고, 수중운동체의 형상이 비교적 단순하므로 이 영향은 무시하기로 한다.

본 논문에서는 수중운동체 몸체를 양력을 계산하기 위해서는 두 부분, 항력을 계산하기 위해서는 세 부분으로 나누었다. 양항력 계산을 위해서는 각 구성부에 대한 상대속도가 필요하므로 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 구성부의 중심점에서의 상대유속을 대푯값으로 가정하였다. 2단계에서는 제어판이 작동되지 않지만, 고정된 제어판도 몸체의 일부분이므로 각각을 양항력 계산의 구성부로 취급한다.

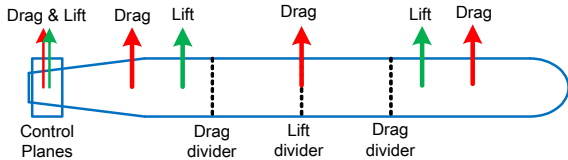


Fig. 6. Components and those representative points of drag and lift

동유체력은 다음과 같이 벡터 표기법(' '는 벡터)을 써서 힘과 모멘트를 각각 \underline{F} , \underline{M} 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\underline{F}_{HD} = \sum_{i=1}^3 \underline{F}_{BD}^{(i)} + \sum_{i=1}^2 \underline{F}_{BL}^{(i)} + \sum_{i=1}^4 (\underline{F}_{FD}^{(i)} + \underline{F}_{FL}^{(i)}) \quad (4)$$

$$\underline{M}_{HD} = \sum_{i=1}^3 (\underline{r}_{BD}^{(i)} \times \underline{F}_{BD}^{(i)}) + \sum_{i=1}^2 (\underline{r}_{BL}^{(i)} \times \underline{F}_{BL}^{(i)}) + \sum_{i=1}^4 [\underline{r}_F^{(i)} \times (\underline{F}_{FD}^{(i)} + \underline{F}_{FL}^{(i)})]$$

여기서, 하첨자 BD, BL, FD, FL 은 각각 몸체 항력, 몸체 양력, 제어판 항력, 제어판 양력을 나타내고, 상첨자 (i) 는 양력 및 항력을 구할 때 몸체 및 제어판 구성부들의 번호를 나타낸다. $\underline{r}_{BD}, \underline{r}_{BL}, \underline{r}_F$ 는 몸체 구성부들과 제어판들의 대표점 위치벡터이다.

양력과 항력은 양력계수 기울기($C_{L\alpha}$), 항력계수($C_{D\alpha}$, C_{Dy} , C_{Dz}), 유기항력계수(K)와 대표점에서의 수중운동체에 대한 유체의 상대유속을 통하여 다음과 같이 모델링한다.

$$\underline{F}_L = \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sign}(V_x) \frac{\rho}{2} A_{\parallel} \|\underline{V}\|^2 C_{L\alpha} \alpha \sin \alpha \\ -\frac{\rho}{2} A_{\parallel} \|\underline{V}\|^2 C_{L\alpha} \alpha \cos \alpha \frac{V_y}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}} \\ -\frac{\rho}{2} A_{\parallel} \|\underline{V}\|^2 C_{L\alpha} \alpha \cos \alpha \frac{V_z}{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\underline{F}_D = \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \\ Z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho}{2} A_t V_x |V_x| (C_{D\alpha} + K C_L^2) \\ -\frac{\rho}{2} A_t V_y |V_y| C_{Dy} \\ -\frac{\rho}{2} A_t V_z |V_z| C_{Dz} \end{bmatrix}$$

여기서, A_t, A_{\parallel} 는 각각 수중운동체의 길이방향 단면적, 횡단면적이고, \underline{V} 는 물체고정좌표계에서 유체에 대한 수중운동체의 운동속도, 즉, 대수속도이다. V_x, V_y, V_z 는 \underline{V} 의 물체고정좌표계에 대한 속도 성분들이고, α 는 대표점 위치에서 유입류의 영각을 나타낸다.

대수속도와 영각은 다음과 같이 물체고정좌표계 원점의 물체고정좌표계에 대한 속도(\underline{V}_0)와 각속도(ω), 대표점의 물체고정좌표계에 대한 위치벡터(\underline{r})와 주변 유체의 물체고정좌표계에 대한 속도벡터(\underline{V}_f)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\underline{V} = \underline{V}_0 + \omega \times \underline{r} - \underline{V}_f \quad (6)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{V_y^2 + V_z^2}}{\|\underline{V}\|} \right)$$

몸체와 제어판 구성부를 표현하는 실린더와 평판의 방향별 항력계수, 양력계수 기울기, 유기항력계수, 실속각을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Lift and drag coefficients of the hull and the control planes^[5]

Item	C_{Dx}	C_{Dy}, C_{Dz}	$C_{L\alpha}$	K	Stall
Hull	0.29	1.10	0.40	1.10	50°
Control	0.05	1.17	1.57	1.00	20°

3.6 수중모함 근처 유동 모델

수중운동체는 이동하는 수중모함에에서 발사될 수 있다. 이 때, 이동하는 수중모함에에 의하여 교란된 발사관 주위의 유동이 수중운동체의 초기거동에 영향을 줄 수 있으므로 이에 대한 영향을 모델링하여야 한다.

수중모함은 축대칭, 주변 유체는 이상유체, 수중운동체에 의하여 교란되는 유동은 무시할 수 있다고 가정하면 수중모함을 Rankine 반체로 가정할 수 있다. Fig. 7에는 수중모함과 동일하게 등속으로 이동하고, 원점이 Rankine 반체의 용출점에 위치한 수중모함고정좌표계($o_f - x_f y_f z_f$)와 형상변수를 정의하였다.

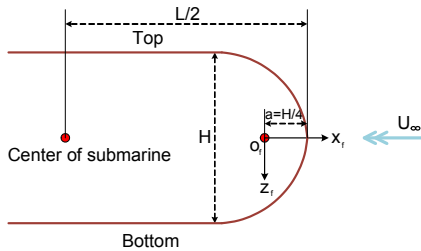


Fig. 7. Source-origin moving coordinate system and the definitions of mother ship's geometry

Rankine 반체를 구성하는 속도 포텐셜과 용출점의 세기(m)은 수중모함의 높이(H)와 이동속력(U_∞)을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = -U_\infty r \cos\theta - \frac{m}{r} \tag{7}$$

여기서, $m = \frac{1}{16} U_\infty H^2$

식 (7)에서 r 은 수중모함고정좌표계의 원점에서 유체장 내의 임의의 지점까지의 거리이다. r 위치(X, Y, Z)에서 지구고정좌표계에 대하여 기술된 유체속도는 다

음과 같다. 이렇게 계산된 지구고정좌표계에 대한 유체속도는 Euler 변환법으로 물체고정좌표계에 대한 유체속도로 변환한 후, 식 (6)의 \underline{V}_f 에 대입하여 적용한다.

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \frac{m}{r^2} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\phi \end{bmatrix} \tag{8}$$

여기서, $r = \sqrt{\left[X - U_\infty t - \frac{1}{2}\left(L - \frac{H}{2}\right)\right]^2 + Y^2 + Z^2}$

$$\theta = \cos^{-1}\left\{X - U_\infty t - \frac{1}{2}\left(L - \frac{H}{2}\right)/r\right\}$$

$$\phi = \tan^{-1}(Z/Y)$$

Fig. 8에는 수중모함의 높이, 길이가 각각 10 m, 100 m이고, 전진속력이 5 knots인 경우에 주변의 교란된 유동 속도를 나타내었다.

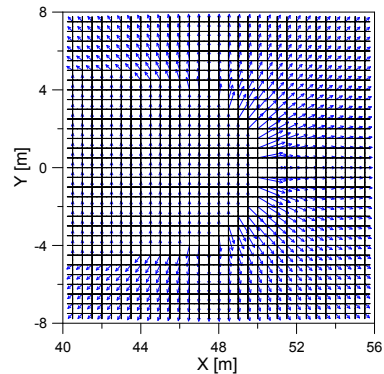


Fig. 8. Flow field near the mother ship modeled with the Rankine half body

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

앞서 언급한 바와 같이 중량형 수중운동체는 실전용(War shot), 훈련용(Exercise shot)의 두 종류가 있고, 전자는 음성 부력, 후자는 양성 부력을 갖게 된다.

본 논문에서는 다항식 모델과 양항력 동유체력 모델의 비교를 위하여, 두 종류의 수중운동체가 정지되거나 움직이는 수중모함에서 10 m/s의 속력으로 발사

관을 이탈한 후의 초기거동에 대하여 모사하였다. Fig. 9에는 수중모함에 장착된 다수의 발사관 위치를 나타내었다.

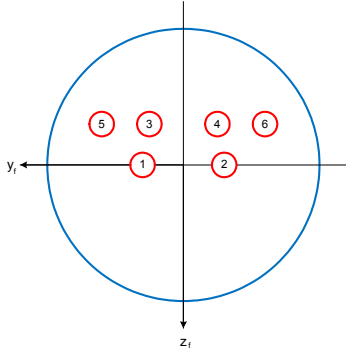


Fig. 9. Tube numbers in the mother ship

4.2 동유체력 모델 비교

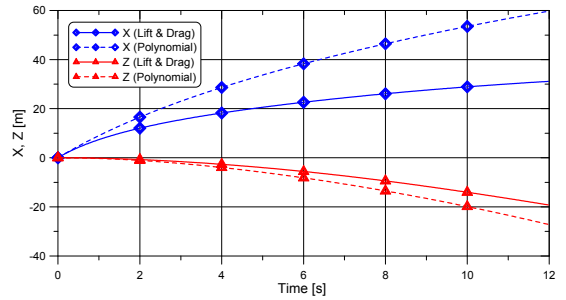
Fig. 10에는 정지된 수중모함에서 발사된 훈련용 수중운동체의 동유체력 모델에 따른 초기거동 시뮬레이션 결과를 도시하였다.

양항력 모델을 적용한 경우가 초기에 중동요 각속도가 큼에 따라 속력이 더 빨리 감소되는 것을 볼 수 있다. 수직면 궤적, 중동요각의 변화는 두 모델에 의한 결과가 동일한 경향을 나타내고 있다. 훈련용 수중운동체는 양성부력을 가지므로 제어관이 작동하지 않는다면 시간이 지남에 따라 위로 이동하여야 한다.

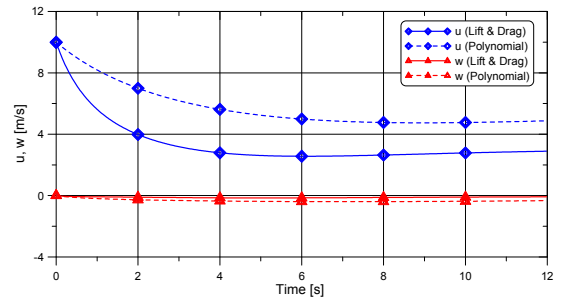
4.3 이동하는 수중모함의 영향

Fig. 11에는 이동하는 수중모함의 1번 발사관(Fig. 9의 발사관 번호 참조)에서 발사된 실전용 수중운동체의 동유체력 모델에 따른 초기거동 시뮬레이션 결과를 도시하였다.

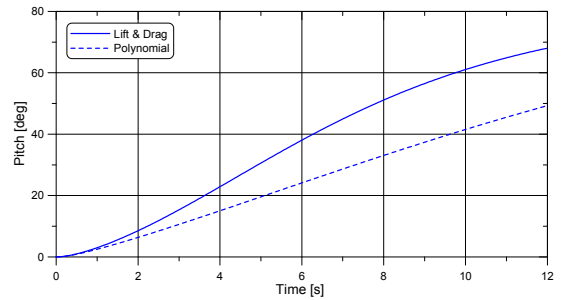
이동하는 수중모함에 의하여 교란된 좌우 비대칭 유동이 수중운동체의 좌우동요, 횡동요, 선수동요의 수평면 운동을 유발하는 것을 볼 수 있다. 다항식 동유체력 모델에 의한 결과는 속력이 계속 감소하고 선수가 위로 향하는 상태로 하강하는데, 일반적으로 실전용 수중운동체는 중력과 정유체력에 의한 모멘트와 동유체력에 의한 모멘트가 평형을 이루어서 선수가 아래로 향하면서 하강하여야 한다. 따라서, 다항식 모델은 영각이 큰 영역에서 동유체모멘트를 과도하게 추정하는 것을 알 수 있고, 양항력 모델이 보다 타당한 결과를 주고 있다고 사료된다.



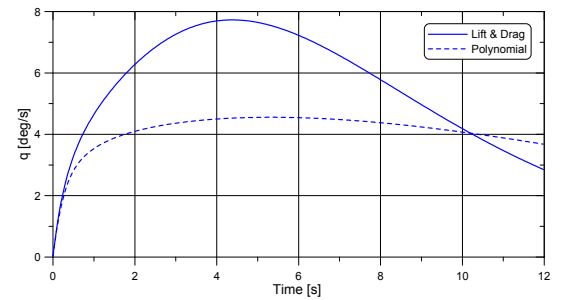
(a) Trajectory



(b) Velocity



(c) Pitch angle



(d) Pitch rate

Fig. 10. Simulation results of Exercise shot fired from the stationary mother ship

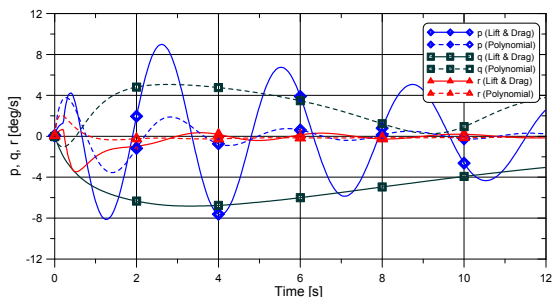
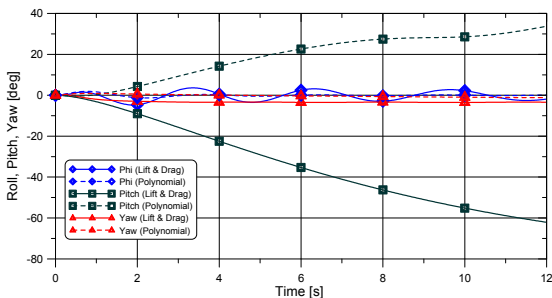
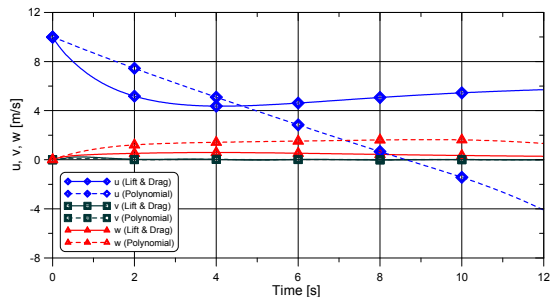
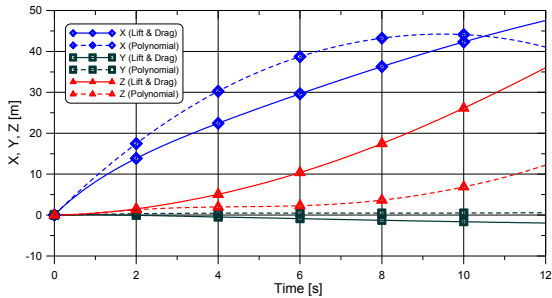


Fig. 11. Simulation results of War shot fired in the tube 1 of the moving mother ship

5. 결론

수중모함에서 발사되는 고속 수중운동체의 불안정한 초기거동은 수중모함과의 접촉과 같은 위험한 상황을 초래할 수 있다. 본 논문에서는 고속 수중운동체의 발사단계를 네 단계로 구분하고, 발사관 이탈 후부터 추진기 작동 전까지의 2단계 운동을 모사하기 위한 동역학 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 다항식 모델과 대영각 운동에 적용되는 양항력 동유체력 모델의 비교·검토를 수행한 결과, 큰 감속이 일어나고 대영각 운동을 하는 2단계 운동에서는 양항력 모델이 보다 타당한 결과를 준다고 사료된다. 향후, 실제 시험 결과와의 비교를 통한 추가 검증이 필요하다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 “강제 사출 고속 수중운동체의 초기운동 모델링 연구” 과제의 지원으로 수행되었고, ACMSSR 2014 학술대회에서 발표되었다.

References

- [1] J. Feldman, “DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion,” DTNSRDC, 1979. 6.
- [2] T. Prestero, “Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for REMUS Autonomous Underwater Vehicle,” Master’s thesis, MIT, 2001.
- [3] A. J. Healey and D. Lienard, “Multivariable Sliding-Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
- [4] J. Jung, J. Jeong, I. Kim, and S. Lee, “Estimation of Hydrodynamic Derivatives of Submarine Model by Using VPMM Test,” Korean Institute of Navigation and Port Research, Vol. 38, No. 2, pp. 97-103, 2014.
- [5] S. F. Hoerner, “Fluid-Dynamic Lift, Drag,” Hoerner Fluid Dynamics, 1975.
- [6] Y. Yoshimura, “Mathematical Model for the Manoeuvring Ship Motion in Shallow Water(2nd Report) - Mathematical Model at Slow Forward

Speed,” Journal of Kansai Society of Naval
Architecture of Japan, No. 210, pp. 77-84, 1988.
[7] W. L. Haberman and J. E. John, “Introduction to

Fluid Mechanics,” Prentice Hall, 1987.
[8] T. I. Fossen, “Guidance and Control of Ocean
Vehicles,” John Wiley & Sons, 1994.