

활강 진수대에서 운용되는 시험용 운동체의 초기 거동 모사

박영일*, 김찬기*, 권순홍**, 이만형***

Simulation for Initial Motion of a Test Vehicle Launched from Sliding Launcher

by

Yeong Il Park*, Chanki Kim*, Sun Hong Kwon** and Man Hyung Lee***

요 약

본 연구에서는 활강 진수대에서 운용되는 시험용 운동체의 초기 거동을 수학적으로 정식화하고, 이를 사용하여 모사한 초기 거동 예측 결과와 해상 시험 결과를 비교하여 수학 모형의 정확성을 검증하였다. 특히, 수학 모형으로 도입된 Strip 법을 사용하는 것이 경험식과 선형 운동방정식을 사용한 결과보다는 좋은 결과를 제공함을 보였다. 이 연구 결과는 활강 진수대와 시험용 운동체의 설계에 효과적으로 사용될 수 있다.

Abstract

In this study, mathematical modelling for initial motion of test vehicle launched from sliding launcher is performed, and simulation results from this mathematical models are verified by comparing them with sea trial results. Especially, it is showed that models using strip method give better results than using empirical formulae and linear equations of motion. This mathematical model can give useful tools to design sliding launchers or test vehicles.

1. 서 론

물수체에 적용될 수 있는 새로운 기술들을 확인하기 위해 시험용 운동체(Test Vehicle)가 운용된다. 시험용 운동체는 일반적으로 회수를 위해 양성 부력을 갖고 있으며, 활강 진수대(Sliding Launcher)에서 운용된다. 이 때 진수대는 입수 후

추진기가 작동할 수 있는 충분한 잠수 시간 및 심도를 보장하고 초기 상태를 안정화하여 제어기가 정상적으로 작동할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서, 시험용 운동체를 활강 진수대에서 효과적으로 운용하기 위해서는 활강 진수대의 제원과 시험용 운동체의 형상 및 중량 특성 등에 따른 입수 후 초기 거동 해석에 대한 연구가 필요하다.

접수일자 : 1998년 12월 22일, 재접수일자 : 1999년 3월 22일

* 정회원, 국방과학연구소

** 정회원, 부산대학교 조선공학과

*** 부산대학교 기계공학부

추진기가 작동하여 정상 상태에 도달하기 전까지의 시험용 운동체의 초기 거동은 진수되어 입수하기 전까지의 진수 단계(Launching Phase)와 입수 순간부터 몸체 전체가 완전히 잠기기 전까지의 수면 진입 단계(Water Entry Phase), 운동체가 완전히 수면에 진입한 순간부터 추진기가 작동하기 전까지의 자유 운동 단계(Free Motion Phase), 추진기가 작동하는 순간부터 운동이 정상 상태(Steady State)로 되기 전까지의 과도 운동 단계(Transient Motion Phase)로 구분되어 정식화될 수 있다. 진수 단계는 중량에 의한 정특성과 진수 대와의 마찰을 고려하여 정식화될 수 있으며, 수면 진입 단계는 입수 충격, 중량, 부력과 동유체력 등을 고려하여 정식화될 수 있다. 자유 운동 단계는 전진속도가 작아 선형 운동방정식으로 표현하기에는 비선형성이 강한 구간으로 이에 대해 적절히 고려해 주어야 한다. 마지막으로 과도 운동 단계는 추진기가 작동하면서 발생하는 과도한 불균형 토오크에 의해 운동이 복잡해지는 영역으로 상태 변수 간의 연성 효과와 비선형 특성이 강하게 나타난다.

앞서 기술한 바와 같이 과도 운동 단계는 과도 상태에서의 추진 특성과 상태 변수들의 연성 효과 및 비선형성이 지배적인 또 다른 하나의 연구 주제가 되므로 본 연구에서는 추진기가 작동하기 전까지만을 다루겠다. 따라서, 본 연구에서는 활강 진수대에서 운용되는 시험용 운동체의 초기 거동을 자유 운동 단계까지 수학적으로 정식화하여 진수 거동을 모사(Simulation)하고, 모사 결과와 관성 항법 장치(Inertial Navigation System) 및 압력 센서(Depth Sensor)로 측정한 실측 자료를 비교하여 수학 모형에 대한 검증을 수행하였다.

2. 수학적 정식화

본 연구에서는 시험용 운동체가 활강 진수대에서 운용될 때의 초기 거동을 앞장에서 기술한 단계들로 구분하고 이에 대한 수학적 정식화를 다음과 같이 수행하였다.

1.1. 진수 단계

진수 단계에서의 수학 모형은 선박에서의 구명선(Life Boat) 진수 모형[1]과 유사하게 정립되었는데, 진수 단계를 각각 활강 단계(Sliding Phase), 회전 단계(Rotating Phase) 및 자유 낙하 단계(Free-fall Phase)로 구분하였다. 먼저, 이들의 수학 모형 정립을 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- ① 수평 동요, 횡 동요, 선수 동요 등의 수평면 운동은 무시된다.
- ② 진수대의 기울기 θ 는 0° 보다 크고 90° 보다 작다.
- ③ 활강시 중력에 의한 활강력이 충분히 커서 정적 마찰력에 의한 효과는 무시될 수 있다.
- ④ 공기의 밀도를 무시한다. 즉, 동적 공력과 공기 중 부력을 무시한다.
- ⑤ 진수대는 충분히 견고하여 시험용 운동체의 활강에 의해 진동이나 변형이 발생하지 않는다.

상기의 가정들이 진수 거동의 모사에 미치는 영향은 받아들일 수 있을 만큼 충분히 작다고 볼 수 있다. 물론 진수대를 확실히 견고하게 제작하지 않았다면 가정 ⑤는 문제가 될 수 있다. 이와 같은 가정들을 사용하여 진수 단계를 세부 단계별로 정식화한 모형은 다음과 같다.

가. 활강 단계

활강 단계는 진수 순간부터 운동체 무게 중심이 진수대 끝단을 통과하기 전까지의 단계를 의미한다. 이 때의 좌표계 및 구성은 Fig. 1과 같은데 $O-X_0Z_0$ 는 원점이 수면상에 놓인 공간 고정 좌표계이고, $G-xz$ 는 물체 고정 좌표계이다. G 는 운동체의 무게 중심이고, E 는 선미 곡선부 시작점이다. 또한, θ 는 수면과 진수대가 이루는 각도, H 는 수면에서 진수대까지의 높이, x_{cg} 는 선수에서 무게 중심까지의 거리, z_g 는 운동체 하단에서 무게 중심까지의 거리, L_R 는 무게 중심에서 E 점까지의 거리, L_G 는 진수대 끝단에서 무게 중심까지의 초기 거리를 의미한다. 한편, 운동 상태를 정의하기 위한 상태변수를 다음과 같이 정의하였다. θ 는 공간 고정좌표계와 물체 고정좌표계 사이의 각인 중

동요각이고, q 는 x 축에서 z 축으로의 회전 각속도이며, u, w 는 각각 x 축 및 z 축에서의 운동체 속도이다. 또한, 이들 상태변수들의 시간 미분은 위에 점을 찍어 표시하였다.

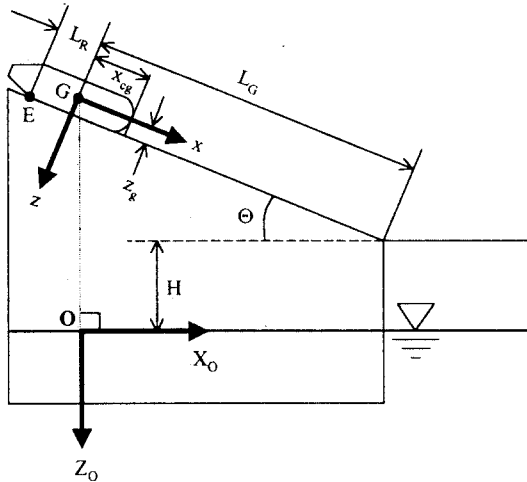


Fig 1. Coordinate system for sliding phase

활강 단계에서의 운동방정식은 전후동요 방정식이 존재하며, 중력과 마찰력의 함수로 표현되는데, 이것을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \\ \dot{w} &= \dot{q} = 0 \\ \dot{X}_0 &= u \cos \theta \\ \dot{Z}_0 &= u \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력 가속도이고, μ 는 동마찰 계수이다. 진수대에는 마찰력을 감소시키기 위해 롤러가 달려 있는데, 이 때의 동마찰 계수를 알지 못하므로 기계공학에서 일반적으로 많이 사용하는 0.1을 기준으로 하였는데, 운동 모사 결과 문제가 없는 것으로 판단된다. 한편, 초기 조건들은 다음과 같다.

$$u(0) = w(0) = q(0) = X_0(0) = 0$$

$$\begin{aligned} Z_0(0) &= -H - L_G \sin \theta - z_g \cos \theta \\ \theta(0) &= -\theta \end{aligned} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 조건을 사용하여 다음과 같은 해석적인 해를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= \int_0^t g(\sin \theta - \mu \cos \theta) dt \\ &= g(\sin \theta - \mu \cos \theta)t \\ X_0 &= \int_0^t \int_0^{t_1} g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \cos \theta dt dt_1 \\ &= g \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) t^2 / 2 \\ Z_0 &= -H - L_G \sin \theta - z_g \cos \theta \\ &\quad + \int_0^t \int_0^{t_1} g(\sin \theta - \mu \cos \theta) \sin \theta dt dt_1 \\ &= -H - L_G \sin \theta - z_g \cos \theta \\ &\quad + g \sin \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) t^2 / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

활강 단계는 다음과 같은 두 가지 경우에만 종료된다. 하나는 운동체 무게 중심이 진수대의 끝단을 통과하는 경우이고($H > x_{cg} \sin \theta$), 또 다른 하나는 진수대의 끝단을 무게 중심이 통과하기 전에 선수가 수면에 먼저 닿는 경우($H \leq x_{cg} \sin \theta$)이다. 식 (3)을 이용하여 각각의 경우에 활강 단계가 종료되는 순간에서의 상태를 추정하면 다음과 같다.

1) Case I : $H > x_{cg} \sin \theta$

이 경우 종료 순간 X_0 축상으로 운동체 이동 거리가 진수대의 X_0 축 방향 길이와 일치하므로 종료 순간의 경과 시간 t_{END_1} 을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} g \cos \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) t_{END_1}^2 / 2 &= L_G \cos \theta \\ \Rightarrow t_{END_1} &= \sqrt{\frac{2L_G}{g(\sin \theta - \mu \cos \theta)}} \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 식 (4)를 식 (3)에 대입함으로써 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u &= \sqrt{2g(\sin \theta - \mu \cos \theta)L_G} \\
 X_0 &= L_G \cos \theta \\
 Z_0 &= -H - z_g \cos \theta \\
 \theta &= -\theta \\
 w &= q = 0
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

2) Case II : $H \leq x_{cg} \sin \theta$
 이 경우에는 운동체 선수부의 하단 위치가 수면에 접하여 절대 좌표계의 Z_0 축 상에서 영이 된다.

$$\begin{aligned}
 0 &= -H - (L_G - x_{cg}) \sin \theta \\
 &\quad + g \sin \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta) t^2 / 2 \\
 \Rightarrow t_{END_1} &= \sqrt{\frac{2[H + (L_G - x_{cg}) \sin \theta]}{g \sin \theta (\sin \theta - \mu \cos \theta)}}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

다시, 식 (6)을 식 (3)에 대입하면 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 u &= \sqrt{2g(\sin \theta - \mu \cos \theta)} \\
 &\quad \times \sqrt{\frac{[H - (L_G - x_{cg}) \sin \theta] \sin \theta}{\sin \theta}} \\
 X_0 &= \frac{[H - (L_G - x_{cg}) \sin \theta] \cos \theta}{\sin \theta} \\
 Z_0 &= -z_g \cos \theta - x_{cg} \sin \theta \\
 \theta &= -\theta \\
 w &= q = 0
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

나. 회전 단계

회전 단계는 운동체 무게 중심이 발사대의 끝단을 통과하여 선수부가 수면에 닿기 전까지의 단계로 중력에 의한 회전과 직선 운동이 공존하는데, 회전 단계는 $H > x_{cg} \sin \theta$ 인 경우에만 존재하며 그렇지 않으면 활강 단계에서 바로 진입 단계로 넘어 간다. 회전 단계에 대한 전체적인 구성은 Fig. 2와 같으며, Fig. 3은 진수대 끝단 부근만을 확대한 것이다. A는 운동체와 진수대가 접하는 점

이고, l_A 는 운동체 무게 중심에서 A까지의 거리를 μF_N 은 마찰력을, F_N 은 법선력을 나타낸다.

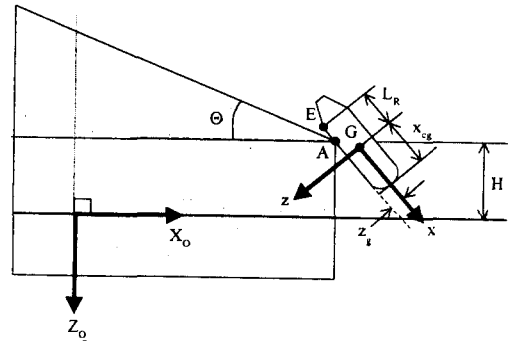


Fig. 2 Coordinates I in Rotation Phase

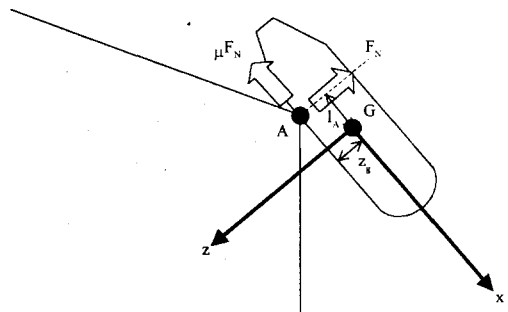


Fig. 3 Coordinates II in Rotation Phase

회전 단계의 경우 전후동요식은 활강의 경우와 동일하다. 상하동요는 관성 좌표계에서의 Newton의 제 2 법칙을 물체 고정 좌표계에 적용시키면서 생성된 uq 항만이 존재한다. 종동요는 A 점에 작용하는 법선력과 마찰력에 의한 모멘트로 표현된다. 법선력이 작용하는 점의 거리 l_A 는 절대 좌표계에서의 X_0 방향 무게 중심 위치와 발사대 끝단의 위치의 차이로부터 구할 수 있고, 마찰력이 작용하는 점의 거리는 z_g 가 된다. 따라서, 다음과 같은 회전 단계 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{u} &= -g(\sin \theta + \mu \cos \theta) \\
 \dot{w} &= uq \\
 I_y \dot{q} &= -mg \cos \theta (X_0 - L_G \cos \theta + \mu z_g)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{X}_0 &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{Z}_0 &= -u \sin \theta + w \cos \theta \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)로부터 해석적 해를 얻을 수 없으므로 수치 계산을 통해 운동을 모사해야 한다. 한편, 회전 단계 종료 조건은 두 가지 경우로 구분될 수 있다. 하나는 선수가 수면에 접하게 되는 경우이고, 다른 하나는 선수가 수면에 접하기 전에 선미 곡선부 시작점이 진수대 끝단을 통과하여 자유 낙하 단계로 들어가는 경우이다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

i) 두부의 수면 진입 :

$$Z_0 + z_g \cos \theta - x_{cg} \sin \theta \geq 0$$

ii) 후미 곡선부의 끝단 통과 :

$$X_0 - L_G \cos \theta \geq L_R \cos \theta$$

다. 자유 낙하 단계

자유 낙하 단계는 회전 단계에서 운동체가 입수하기 전에 선미 곡선부의 시작점이 발사대의 끝단을 통과하는 경우에만 존재한다. 이 때의 운동은 단순하게 부록과 같은 물수체의 선형 운동방정식 [2]에서 해수 밀도를 공기의 밀도로 치환하는 것으로 구현할 수도 있지만 자유 낙하 단계에서는 공력보다는 중력에 의한 정복원력이 운동에 미치는 영향이 지배적이므로 다음과 같이 운동체를 공력이 무시된 질점으로 간주할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{u} &= -g \sin \theta \\ \dot{w} &= uq + g \cos \theta \\ \dot{q} &= 0 \\ \dot{X}_0 &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{Z}_0 &= -u \sin \theta + w \cos \theta \end{aligned} \quad (9)$$

자유 낙하 단계의 종료 조건은 활강이나 회전 단계에서 운동체 선수부가 수면으로 진입할 때의 조건과 동일하다.

1.2 수면 진입 단계

운동체가 수면을 진입하는 순간에 상당히 복잡한 물리적 현상이 발생한다. 운동체 선수부가 수면과 닿는 순간 어느 정도의 운동체 운동량이 해수로 전달된다. 해수로 전달된 운동량은 물 입자를 가속시켜 주변 유장의 변화를 발생하고 운동체는 운동량변화량 만큼의 충격을 느끼게 된다. 그런데 이 때의 입수 충격은 개략적으로 입수 순간의 수선면 변화율에 비례한다.[6] 즉, 중앙평행부가 입수하는 동안에는 입수 충격은 무시될 만큼 작다. 따라서, 선수가 완전히 잠길 때까지만 입수 충격이 작용한다고 가정할 수 있다. 한편, 운동체가 고속으로 입수하는 경우에 공동(Cavity)이 발생하기도 한다. 즉, 고속으로 입수하는 운동체가 유체 입자들을 가속시켜 유압이 기화 압력 보다 낮아지면 유체는 기화되고, 자유 표면은 위쪽으로 튀어 올랐다가 닫히면서 공기를 가두게 된다. 닫힌 공동은 팽창함에 따라 내부 압력이 떨어지고 운동체 속도가 떨어지면서 공동은 완전히 소멸된다. 그러나, 활강 진수대에서 운용되는 운동체의 경우에는 입수 속도가 그다지 크지 않고 입수각도 적절한 범위로 유지될 것이므로 공동의 영향은 무시될 수 있다. 수면 진입 단계에서 운동체에 작용하는 외력으로는 이들 외에도 정복원력과 입수되는 형상 변화에 따른 동유체력이 있다. 이중 정복원력은 입수시 가장 지배적인 인자로서 수면에 진입하는 운동체의 체적을 계산하여 고려해 줄 수 있다. 입수시 형상 변화에 따른 동유체력을 어느 정도 정확히 예측하려면 상당한 시간적, 인적, 계산적인 부담이 수반되는 수치 해석[6]을 해야 하는데, 이러한 수치 해석법은 진수대나 시험용 운동체 설계시에 효율성 측면에서 동유체력을 표현하는 데 적합하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 가능한 모든 물리적 현상들을 간략하게 포함하는 수학 모형으로 수면 진입 단계를 정식화하였다.

가. 진입 1 단계

진입 1 단계는 선수가 수면에 접촉하는 순간부터 선수부가 완전히 잠기는 순간까지로 Fig. 4와 같이 입수 충격과 정복원력이 지배적이며, 입수 속도가 작기 때문에 입수 형상 변화에 따른 동유

체력 성분을 무시하였다. 또한, 입수전에 수평면 운동을 무시하였고 입수시에도 수평 방향 외력의 모델링이 어려우므로 진입 단계에서도 수평면 운동도 무시하였다. 따라서, 진입 1 단계에서의 운동 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

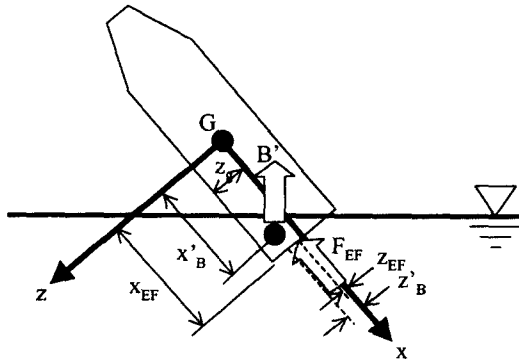


Fig. 4 Modelling of exciting forces on water entry

$$\begin{aligned}
 m\dot{u} &= -(mg - B') \sin \theta - F_{EF} \cos \theta \\
 m(\dot{w} - uq) &= (mg - B') \cos \theta + F_{EF} \sin \theta \\
 I_y \dot{q} &= z_{EF} F_{EF} \cos \theta - x_{EF} F_{EF} \sin \theta \\
 &\quad + z'_B B' \sin \theta + x'_B B' \cos \theta \\
 \dot{X}_O &= u \cos \theta + w \sin \theta \\
 \dot{Z}_O &= -u \sin \theta + w \cos \theta \quad (10)
 \end{aligned}$$

여기서, B' , x'_B 와 z'_B 는 각각 입수된 부분의 부력 및 물체 고정 좌표계에서의 부력 중심을 의미하고, F_{EF} 와 x_{EF} , z_{EF} 는 입수 충격과 입수 충격의 작용 점을 의미한다. 그런데, 본 연구에서 사용된 운동체는 선수부 형상이 직벽 형태로 되어 있으므로 부력을 계산하기 위해 전체 체적과 입수된 체적의 비는 측방향으로의 전체 투영 면적과 입수된 부분의 투영 면적의 비와 동일하고 체적 중심은 투영 면적 중심과 동일하다고 가정하였다. 또한, 투영 면적은 간략하게 선수부부터 중앙평행부까지는 직사각형으로, 선미부는 삼각형으로 가정하여 표현

하였다. 따라서, 가장 깊게 입수된 운동체 끝단에서 수면까지의 거리를 z_N 으로 정의하면 부력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 B' &= B \times \frac{z_N^2}{D(2L + x_{cg} + L_R) \cos \theta \sin \theta} \\
 (x'_B, z'_B) &= \left(x_{cg} - \frac{z_N}{3 \sin \theta}, z_g - \frac{z_N}{3 \cos \theta} \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

입수 충격은 포텐셜 이론의 3 차원 Green 함수와 B-Spline으로 계산한 결과[6]를 입수각 α [도]와 $z' (=2z_N/D)$ 에 대해 다음과 같은 곡선맞춤식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 F_{EF} &= \frac{\dot{z}}{\rho \pi R^2 V^2} \{ a_1 \exp[-s_1(z' - c_1)^2] \\
 &\quad + a_2 \tanh\left(\frac{z'}{c_1}\right) + a_3 \} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{단, } c_1 &= 0.0156564\alpha + 0.0129539 \\
 s_1 &= 9029.829\alpha^{-1.96} \\
 a_1 &= \frac{20.9514\alpha^{-0.940561} - 0.4955830 \tanh(1)}{1 - e^{-s_1 c_1^2}} \\
 &\quad + e^{-s_1 c_1^2} \tanh(1) \\
 a_2 &= 0.4955830 + a_1 e^{-s_1 c_1^2} \\
 a_3 &= -a_1 e^{-s_1 c_1^2}
 \end{aligned}$$

충격력은 길이 방향으로 선수부 끝단에 작용할 것이다. 또한, 수직 방향으로는 입수면의 중간쯤에 작용하는 것으로 근사화할 수 있다. 따라서, 충격력에 대한 작용점은 다음과 같이 가정하였다.

$$(x_{EF}, z_{EF}) = \left(x_{cg}, z_g - \frac{z_N}{2 \cos \theta} \right) \quad (13)$$

입수 충격력이 작용하는 진입 1 단계는 다음과 같이 운동체 직경 만큼 선수가 입수할 때까지이다.

$$\frac{z_N}{\cos \theta} \leq D \quad (14)$$

나. 진입 2 단계

진입 2 단계는 입수 충격이 사라진 후 물체 전체가 수면에 진입하기 전까지로 부력 등의 정특성이 지배적이다. 정특성은 진입 1 단계와 유사하게 모형화될 수 있다. 또한, 운동체가 진입할 때 선수부에는 동유체력과 정수압이 작용하고, 선미부에는 압력이 작용하지 않는다고 가정할 수 있다. 따라서, 이 압력 차이에 의한 힘에 마찰력을 추가하고 선수면의 수직 방향 높이의 반에 정압이 걸린다고 가정하면 전후동요 항력 X_F 는 다음과 같이 정식화될 수 있다.

$$X_F = C_F + \pi \frac{D^2}{4} \times \rho \left[g \left(z_N - \frac{D \cos \theta}{2} \right) + \frac{V^2}{2} \right] \quad (15)$$

여기서 C_F 는 ITTC 저항 곡선을 따르는 마찰 저항이다. 따라서, 진입 2 단계에서의 운동방정식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{m}u &= -(mg - B') \sin \theta - X_F \\ m(\dot{w} - uq) &= (mg - B') \cos \theta \\ I_y \dot{q} &= z'_B B' \sin \theta + x'_B B' \cos \theta \\ \dot{X}_O &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{Z}_O &= -u \sin \theta + w \cos \theta \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, 부력 B' 과 부력 중심 (x'_B, z'_B) 는 Fig. 5와 Fig. 6으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B' = B \times \frac{2z_N - D \cos \theta}{(2L + x_{cg} + L_R) |\sin \theta|} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (x'_B, z'_B) &= \left(x_{cg} - \frac{(a+b)^2 - ab}{3(a+b)}, z_g - \frac{d(2b+a)}{3(a+b)} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

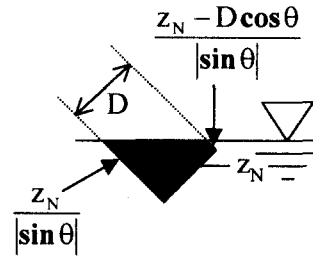


Fig. 5 Projected shape on water entry phase II

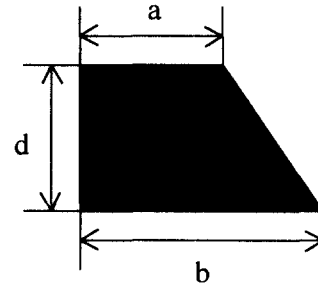


Fig. 6 Assumed trapezoid for projected area

한편, 진입 2 단계가 종료될 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{z_N}{\cos \theta} &> D \quad \text{and} \\ Z_O + z_g \cos \theta + L_R \sin \theta &\leq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

1.3 자유 운동 단계

자유 운동 단계는 운동체의 수면에 완전히 진입한 후 추진기가 작동하기 전까지의 단계로 중동요 등의 상태 변수가 커져 비선형성이 상당히 강한 구간이다. 따라서, 비선형성 운동방정식을 사용해야 하는데, 초기 설계 단계에서는 비선형 운동방정식을 확보하기 어려우므로 본 연구에서는 Strip 법으로 자유 운동 단계에서의 운동을 모형화하였다. 먼저, 나선체를 길이 방향으로 분할한 단면을 원형으로 가정하고, 단면에 유입되는 상하동요 속도가 작으므로 층류(Laminar)를 가정하였다. 그리

고 투영 길이로 무차원화된 항력 계수 C_D 를 항력 실험 자료[3]로부터 1.19로 선택하고, 단면에 대한 항력 계수를 길이 방향으로 적분하여 상하동요 동유체력과 종동요 동유체 모멘트를 다음과 같이 표현하였다.

$$Z_F = - \int_0^L C_D(\xi) \sin \theta d\xi \quad (20)$$

$$M_F = \int_0^L (x_{cg} - \xi) C_D(\xi) \sin \theta d\xi \quad (21)$$

그런데, 식 (20)만으로는 종동요 모멘트를 충분히 다 표현할 수 없다. 이상 유체장에서 항력이 존재하지 않을 때 존재하는 Munk 모멘트를 추가하여야 한다. Munk 모멘트는 이론적으로 계산될 수 있지만, 간단하게 Bottaccini[4]의 공식과 침수 길이 L_{wet} 를 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$M' = C_p (k_2 - k_1) \sin 2\theta \quad (22)$$

$$k_1 = 0.66/f^{1.5}, \quad k_2 = 1 - 1.20/f^{1.5},$$

$$f = D/L_{wet} \text{ and } C_p = 0.69 \sim 0.95$$

이 추정치는 시험치 보다 크게 나오며 이 값의 60 % 정도가 적절하다고 알려져 있다.[4] 따라서, 본 연구에서는 기존의 물수체 형상들에 대한 모형 시험 결과와 비교하여 C_p 를 0.95로 하고, 그 값에 0.6을 곱하여 주었다. 한편, 제어판에 의한 상하동요 동유체력 Z_{CS} 와 종동요 동유체 모멘트 M_{CS} 는 제어판에 수직인 유입 속도 성분으로 무차원화하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Z_{CS} = -1.4 S_{CS} / A_M \sin^3 \theta \quad (23)$$

$$M_{CS} = -(x_{cg} - x_{cs}) Z_{CS} \quad (24)$$

A_M 과 S_{CS} 는 나선체의 단면적과 제어판 면적이고, x_{cs} 는 두부에서 제어판 압력 중심까지의 거리이다.

전후동요 동유체력은 Strip으로 표현하기에 부적절하므로 선형 운동방정식[2]과 경험식[5]으로 표현하였다. 이상의 결과를 종합하면 자유 운동

단계에서의 운동방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} m\dot{u} &= -(mg - B) \sin \theta + X_u u \\ m(\dot{w} - uq) &= (mg - B) \cos \theta + Z_F + Z_{CS} \\ I_y \dot{q} &= B(z_B \sin \theta + x_B \cos \theta) \\ &\quad + M_F + M' + M_{CS} \\ \dot{X}_O &= u \cos \theta + w \sin \theta \\ \dot{Z}_O &= -u \sin \theta + w \cos \theta \end{aligned} \quad (25)$$

3. 계산 결과 및 고찰

수학 모형의 검증을 위해 40° 기울기의 진수대 끝단이 2.268 m 높이가 되게 하여 Table 1과 같은 제원의 운동체에 대한 실험을 수행하고, 그 결과를 운동 모사 결과와 비교하였다. 또한, 선형 운동방정식[2]과 경험식[5]으로 자유 운동 단계를 모사한 경우도 함께 비교하였다. 그림에서 실선은 해상 시험 결과이고, 긴 점선은 2장에서 기술된 모형으로 운동을 모사한 결과이며, 짧은 점선은 자유 운동 단계의 거동을 선형 운동방정식으로 대치한 결과이다.

Table 1 Principal Dimension

Length[m]	4.534
Weight[Kgf]	314.5
Buoyancy[Kgf]	361.4
x _{cg} [m]	2.0635

Fig. 7과 Fig. 8은 가속도에 대한 결과이다. Fig. 7을 살펴보면 모사 결과와 측정 결과가 비교적 유사함을 알 수 있다. 특히, 음의 가속도가 최대로 걸리는 부분에서 Strip으로 계산한 결과가 더 좋음을 알 수 있다. Fig. 8을 살펴보면 초기 진수대에서 진동하는 부분을 제외하면 모사 결과들이 비교적 잘 맞고 있으며, Strip으로 계산한 결과가 좀 더 좋음을 알 수 있다. 진수대에서 상하동요 가속도가 크게 동요한 것은 선박의 운동과 진수대 정렬의 오차에 의해 시험용 운동체가 진동하여 발생

한 것으로 판단된다.

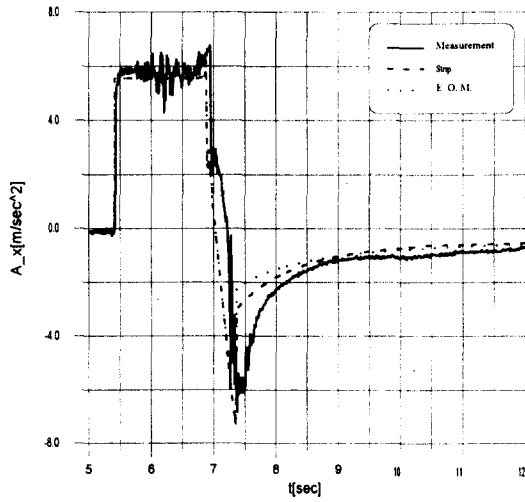


Fig. 7 Comparison of surge accel.

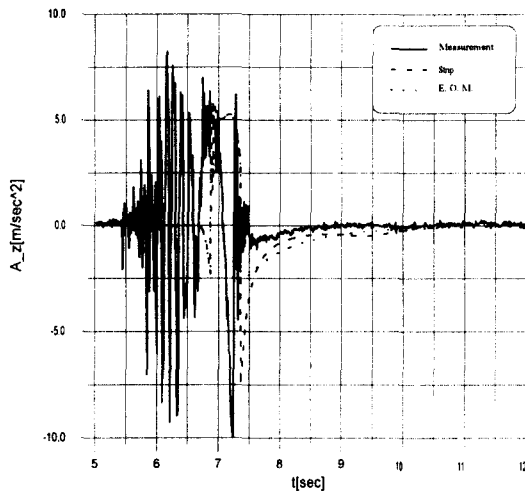


Fig. 8 Comparison of heave accel.

Fig. 9와 Fig. 10은 속도에 대한 결과이다. 전후 동요 속도는 비교적 유사한 결과를 주고 있고, 상하동요 속도는 약 8 초 이후 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 운동 모형의 감쇠력이 실제 보다 크게 작용한 것에 기인한 것으로 판단된다.

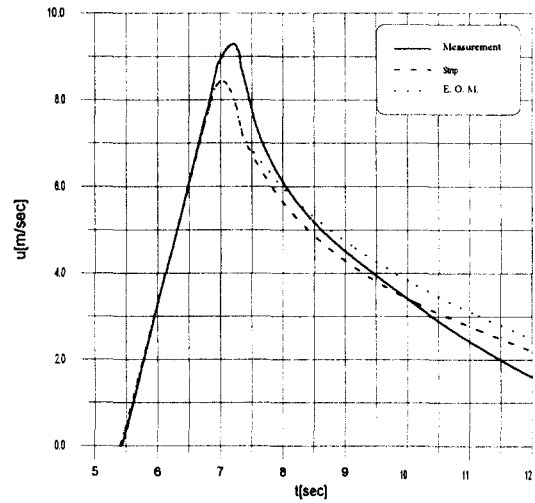


Fig. 9 Comparison of surge velocity

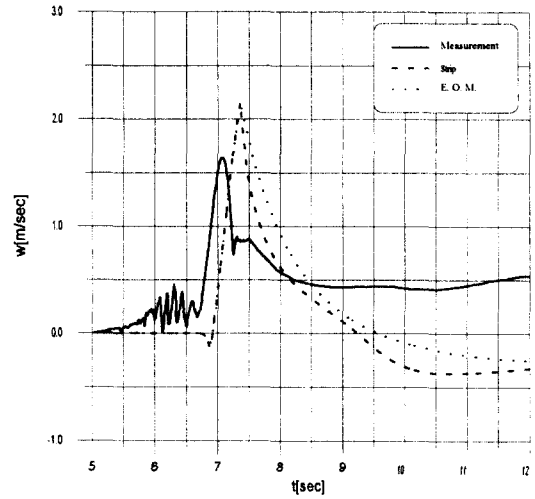


Fig. 10 Comparison of heave velocity

Fig. 11과 Fig. 12는 종동요각 및 각속도에 대한 결과이다. 이 결과들을 살펴보면 종동요 각속도와 종동요각의 모사 결과들은 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, Strip으로 모사한 결과는 종동요 각속도의 변화 경향까지 유사하게 나타나는 상당히 좋은 결과를 주고 있다. Fig. 12에서는 진수대 각도가 40° 보다 작았음을 지적하고 있다.

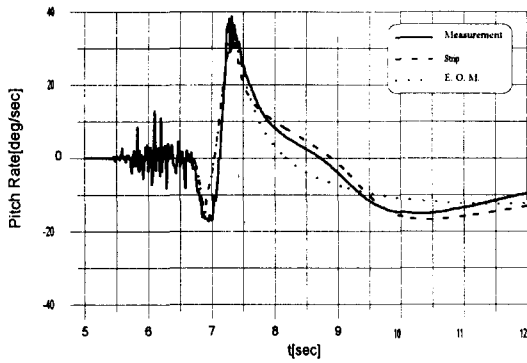


Fig. 11 Comparison of pitch rates

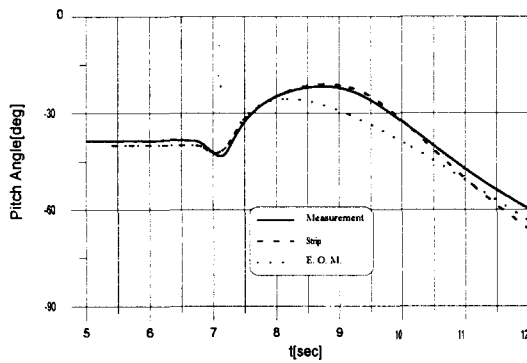


Fig. 12 Comparison of pitch angles

Fig. 13은 심도에 대한 결과이다. 이 결과를 살펴보면 심도 변화에 대한 모사 결과는 측정 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 초기 측정치의 심도가 영으로 나타난 것은 공기중에서는 수압으로 심도를 측정하는 압력 센서를 사용했기 때문이다.

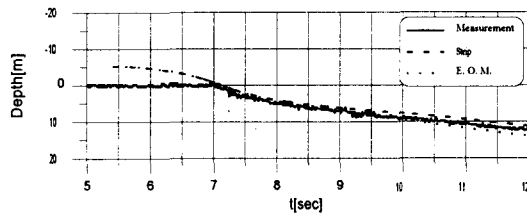


Fig. 13 Comparison of depth

4. 결론

본 연구에서는 활강형 진수대에서 운용되는 시험용 운동체의 초기 거동의 수학 모형을 제시하고 모사 결과를 해상 시험 결과와 비교하여 모형의 정확성을 검증하였다.

시험용 운동체의 초기 설계 단계에서는 입수후 거동을 Strip 법으로 표현하는 것이 경험식과 선형 운동방정식으로 표현하는 것 보다 좀 더 실측 결과에 유사함을 알았다. 또한, 보다 정확한 운동 모사를 위해서는 활강 진수대가 장착되는 시험 선박의 운동과 진수대의 정렬 오차 등에 의해 발생하는 진동을 해석할 수 있는 모형이 필요함을 알 수 있었다.

본 연구는 운동체가 입수하여 추진기가 작동하기 전까지의 운동을 표현할 수 있는 수학 모형을 제시하였는데, 이에 추가적으로 추진기가 작동하기 시작한 후의 비정상 거동에 대한 모형을 정립하기 위한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Makoto Arai, M. Reaz H. Khondoker & Yoshiyuki Inoue, "Water Entry Simulation of Free-fall Lifeboat -First Report : Analysis of Motion and Acceleration", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 178, 1996.
- [2] 안 창범 & 김 찬기, "수중운동체의 운동방정식과 좌표계 II", NWS-519-971654, 국방과학연구소, 1997
- [3] Frank M. White, Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, 1994
- [4] M. R. Bottaccini, "Stability Coefficients of Standard Torpedo", NAVORD Report 3346, 1954
- [5] 김찬기 & 김 진, "수중운동체 선형 운동방정식 내의 안정성 계수 추정", NWS-513-92701C, 국방과학연구소, 1992
- [6] 강창구 외, "물수체의 수중충돌에 따른 충격량 예측 및 2 차 필터 병렬 처리에 의한 조종 계수

추정 기법 연구”, NWS-419-941029, 국방과학 연구소, 1994

부록. 물수체의 선형 운동방정식

수중에서 운동하는 물수체에 대한 선형 운동방정식[2]은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$m\dot{u} = X_u\dot{u} + X_uu + X_T - (W - B)\sin\theta$$

$$m(\dot{v} + ur) = Y_v\dot{v} + Y_vv + Y_p\dot{p} + Y_pp + Y_r\dot{r} + Y_rr + Y_{\delta_e}\delta_e + (W - B)\sin\phi\cos\theta$$

$$m(\dot{w} - uq) = Z_w\dot{w} + Z_w w + Z_q\dot{q} + Z_q q + Z_{\delta_e}\delta_e + (W - B)\cos\phi\cos\theta$$

$$I_x\dot{p} = K_v\dot{v} + K_vv + K_p\dot{p} + K_pp + K_r\dot{r} + K_rr + K_o + K_{\delta_e}\delta_e + K_{\delta_e}(\delta_{e_r} - \delta_{e_l}) - y_B B \cos\phi\cos\theta + z_B B \sin\phi\cos\theta$$

$$I_y\dot{q} = M_w\dot{w} + M_w w + M_q\dot{q} + M_q q + M_{\delta_e}\delta_e + x_B B \cos\phi\cos\theta + z_B B \sin\theta$$

$$I_z\dot{r} = N_v\dot{v} + N_vv + N_p\dot{p} + N_pp + N_r\dot{r} + N_rr + N_{\delta_e}\delta_e - x_B B \sin\phi\cos\theta - y_B B \sin\theta$$

여기서, X_T 는 추력이고, 힘 F 와 모멘트 M 은 단면적을 A 라 할 때 다음과 같이 무차원화되어 있다.

$$F' = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho AU^2}$$

$$M' = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho ALU^2}$$