



Received: 2024/06/01
Revised: 2024/06/13
Accepted: 2024/06/27
Published: 2024/06/30

***Corresponding Author:**

Chul Hyun

Dept. of Battlefield Analysis and Development,
LIG Nex1
333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si,
Gyeonggi-do, 13488, Republic of Korea
Tel: +82-31-5178-4293
Fax: +82-31-5179-7086
E-mail: chul.hyun@gmail.com

비행구간 M & S를 이용한 수상함 발사 수중운동체의 입수 안정성 분석

Entry Stability Analysis of Underwater Vehicle Launched from Ships Using Flight Modeling and Simulation

현철^{1*}, 김현승², 김창환¹, 이호진¹

¹LIG넥스원 전장분석개발팀 수석연구원

²LIG넥스원 전장분석개발팀 선임연구원

Chul Hyun^{1*}, Changhwan Kim¹, Hyunseung Kim², Hojin Lee¹

¹Principal researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

²Senior researcher, Dept. of Battlefield Analysis and Development, LIG Nex1

Abstract

본 논문에서는 수상함에서 발사되어 일정 구간을 비행하고 수면으로 입수하는 수중운동체의 발사 후 비행 구간의 운동방정식을 도출하고 시뮬레이션을 수행하여 발사 조건별 수면 입수각을 분석해 보았다. 비행구간의 운동모델 시뮬레이션 결과는 시험 결과와 대체로 잘 매칭되었고, 발사 플랫폼의 롤 동요가 있더라도 충분한 비행시간만 확보된다면 수중 제어에 적합한 수면 입수 자세각을 얻을 수 있음을 예상할 수 있었다.

This paper investigates the motion equations and simulates the post-launch flight trajectory of an underwater vehicle that is launched from a surface ship. The simulation results of the flight phase motion model matched well with the test results. It is anticipated that appropriate water entry angles can be achieved for underwater control even if there is roll oscillation of the launch platform, as long as sufficient flight time is secured.

Keywords

자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle),
유체력계수(Hydrodynamic Coefficient),
비행자세안정장치(Stabilizer),
입수 안정성(Entry Stability)

1. 서론

수상함에서 발사되어 일정 구간을 비행 후 수중에서 운용되는 수중운동체는 입수 후 짧은 시간 안에 수평주행(pull-out) 상태를 만들어야 한다[1]. 이를 위해서는 안정적인 입수 자세각을 확보하여 수중의 일정 위치에서 자세 제어를 시작할 수 있도록 해야 한다. 입수각이 수직에 가깝게 크면 바닥에 충돌 위험성이 있거나, 수중에서 수평주행 상태를 만들기 위해 필요한 제어력이 너무 크게 요구되어 안정성에 문제가 생길 수 있다. 반대로 입수각이 작으면 몸체가 수면과 부딪히는 충격으로 운동체에 손상이 생기거나, 수면 위로 떠오를 우려가 있다.

비행 중의 안정성과 수중 제어에 적합한 수면 입수각을 얻어낼 수 있도록 대상 수중운동체에 꼬리날개 형태의 비행자세안정장치를 부착하였다. 본 논문에서는 비행자세안정장치가 부착된 수중운동체의 발사 후 입수 전까지의 비행 구간의 운동모델을 산출하고, 시뮬레이션을 수행하였다. 입수각 확보를 위한 고정 발사대에서의 적합한 발사 조건을 살펴보고, 실험 결과와 비교했다. 추가로 플랫폼의 롤 동요가 있는 조건에서의 시뮬레이션을 통해 실제 운용 조건에서의 입수 성능도 예상해 본다.

2. 형상 및 운동방정식

본 논문에서 다루는 대상 운동체의 비행 구간 형상은 Fig. 1과 같다. 기존 연구[2]의 수중운동체 선미 부분에 비행안정장치가 부착된 형태이다.

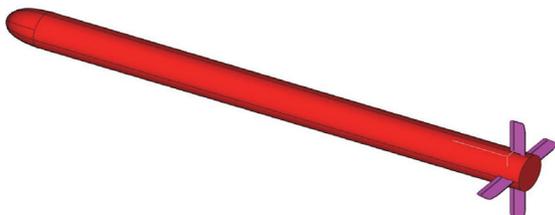


Fig. 1. Underwater vehicle with stabilizers

수상함에서 공중으로 발사되면, 꼬리날개가 전개되어 비행시간 동안 운동체의 입수각을 만들고, 수중으로 입수한 후에는 안정장치가 분리되어 수중운동체로서 동작을 하게 된다.

뉴턴 제2법칙으로부터 유도되는 식(1)과 같은 일반 6자유도 비선형 운동방정식을 이용하여 수중운동체의 기동 특성을 모사할 수 있다. 수중 운동방정식의 유체력계수 값은 모형시험을 통해 획득되었고[3], 실시험 결과와의 비교를 통해 수정·보완되었다[2].

$$X = m(\dot{U} + QW - RV) \quad (1a)$$

$$Y = m(\dot{V} + RU - PW) \quad (1b)$$

$$Z = m(\dot{W} + PV - QU) \quad (1c)$$

$$L = I_x \dot{P} + (I_z - I_y)QR - I_{xz}(\dot{R} + PQ) \quad (1d)$$

$$M = I_y \dot{Q} + (I_x - I_z)RP - I_{xz}(R^2 - P^2) \quad (1e)$$

$$N = I_z \dot{R} + (I_y - I_x)PQ - I_{xz}(\dot{P} - QR) \quad (1f)$$

본 연구의 초점은 수중운동체 비행 단계의 운동이므로, 식 (1) 형태의 기본 운동방정식에 비행 구간에 맞는 유체력계수를 적용하여 발사 후 공중에서의 운동특성을 모의하였다. 관성모멘트 I_{yy} , I_{zz} 값은 실제 측정을 통해서 얻었고, 유체력계수 값은 공기 밀도 1.225 kg/m^3 에 대해 추정식을 이용하여 선형항까지만 추정하였다[4]. 비행자세안정장치를 포함한 관성

모멘트는 포함하지 않은 경우보다 약 33.6 % 증가하여 공중에서 급격한 자세 변화를 방지할 수 있었다.

3. 비행구간 시뮬레이션

2장에서 획득한 유체력계수값을 식 (1) 형태의 운동방정식에 적용하여 수상함에서 발사되는 수중운동체의 비행구간 시뮬레이션을 수행하였다. 수면으로부터 10 m 위의 높이에서 30° , 45° , 60° 의 발사각으로 발사하였을 때의 시뮬레이션 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 이때 발사속도는 16 m/s 로 고정하였다.

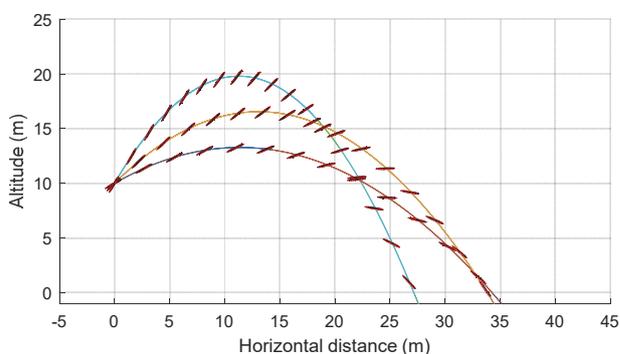


Fig. 2. Flight-entry simulation results for various launch angles

발사각을 45° 로 고정시키고 발사 속도를 각각 14 m/s , 16 m/s , 18 m/s 로 변화를 주었을 때의 시뮬레이션 결과는 Fig. 3에 나타났다.

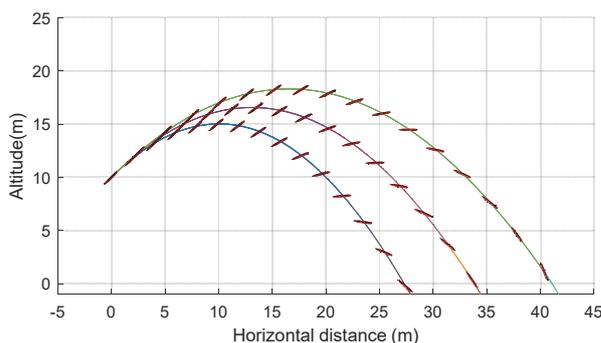


Fig. 3. Flight-entry simulation results for various launch velocities

비행자세안정장치가 부착된 경우, 비행시간이 충분히 확보만 되면 공중에서 피치다운 되어서 선수부터 안정적으로 입수하는 결과를 얻었다.

서론에서 언급한 바와 같이, 입수 후 안정적인 제

어를 수행하기 위해서는 너무 크지도, 작지도 않은 입수 자세각이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 자세각의 크기를 -35° 에서 -75° 까지의 값으로 설정하였다. Fig. 2에 도시된 시뮬레이션 결과 입수 자세각은 각각 -46.34° , -57.64° , -51.77° 이고, Fig. 3의 입수 자세각은 각각 -38.35° , -57.64° , -71.97° 로, 모두 설정한 입수각 범위 안에 들어옴을 확인할 수 있었다.

4. 해상시험

비행모델의 유체력계수는 선형항까지만 추정된 값이므로, 3장의 시뮬레이션 결과가 실제 해상 시험 결과와 잘 매칭되는지 확인할 필요가 있다. 시뮬레이션에서는 발사된 운동체가 비행할 동안의 위치나 자세가 수치적으로 계산이 되지만, 실제 시험 환경에서는 공중에서의 위치나 자세를 정확하게 측정할 수 없기 때문에 개략적인 비교만 가능한 제한점이 있다.

Fig. 4는 해상 발사 시험 사진이다. 시뮬레이션 결과와 유사한 형태로 공중에서 피치다운이 발생하고, 선수부터 40° 이상의 자세를 갖고 입수하고 있음을 확인할 수 있다.



Fig. 4. Maritime launch test

수중운동체 내부의 관성센서는 수중에서의 자세 제어를 위한 저가의 MEMS 센서이기 때문에, 정렬이 완전치 못한 발사 초기의 자세나 위치정보는 신뢰성이 떨어져서, 시뮬레이션 결과와의 직접적인 비교는 적절치 못하다. Fig. 5에 10여 회의 심도센서 시험 데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하여 도시하였다. 발사 후 전원인가가 되는 대상 수중운동체의 특성이 반영된 비교 결과이고, 대체적으로 발사 후 입수시간이 대략적으로 맞는 것을 확인할 수 있다. 시간에 따른 정확한 자세값을 상호 비교할 수는 없었지만, 이런

형태의 간접적인 비교를 통해 비행모델에 대한 최소한의 신뢰성을 검토할 수 있었다.

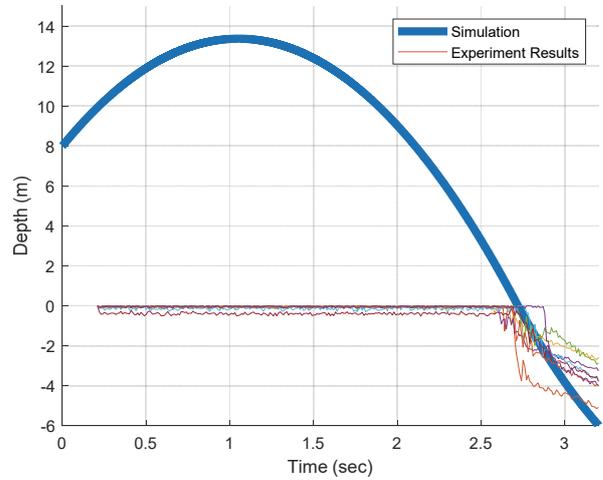


Fig. 5. Comparison of simulation and experimental results

5. 추가분석

3장의 시뮬레이션과 4장의 해상시험은 고정된 플랫폼에서 발사되는 조건하에 수행된 결과이다. 실제 수상함에서 발사되는 상황에서는 해상 상태에 따른 발사 플랫폼의 롤 동요가 영향을 줄 수 있다. 5장에서는 롤 동요에 의해 발사 초기 위치와 발사 고각 등의 초기 조건이 달라졌을 때 입수 자세각에 미치는 영향을 추가적으로 시뮬레이션을 이용하여 분석해 본다.

시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 정상 상태에서 10 m의 발사 높이를 가지는 수상함에 $\pm 15^\circ$ 의 롤 동요가 발생함을 가정하고, 이에 따른 입수 자세를 모의하였다. $\pm 15^\circ$ 의 롤 동요값의 대표적인 다섯 개의 조건에 대한 비행 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 도시하였고, 롤 동요값에 대한 입수 자세를 Table 1에 정리하였다.

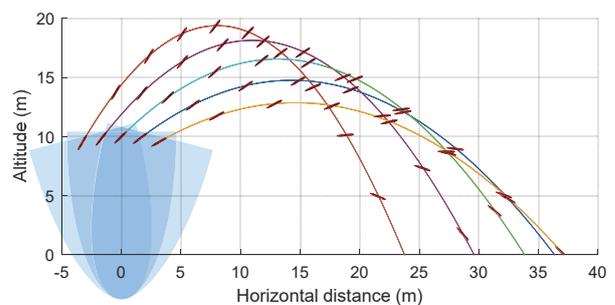
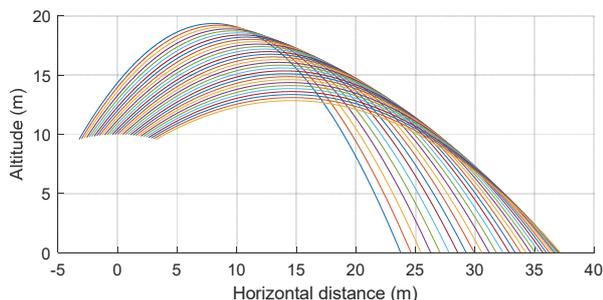
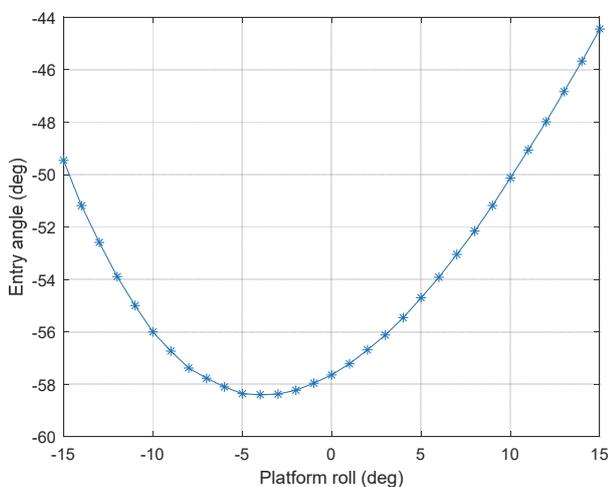


Fig. 6. Simulation results under roll motion conditions

Table 1. Entry angles corresponding to ship rolls

Ship roll (°)	Entry Angle (°)
-15	49.45
-7.5	57.58
0	57.64
7.5	52.57
15	44.44

$\pm 15^\circ$ 범위의 롤 동요에 대하여 보다 상세한 시뮬레이션 결과를 Fig. 7에 도시하였고, 이때의 입수 자세각의 변화를 롤 동요 값에 대하여 Fig. 8에 나타냈다. 수중운동체의 발사대가 수상함에 고정되어 있다고 가정하면, 발사 방향과 롤 동요 상황에 따라 발사 고각에 영향을 주게 된다. 그러나 롤 동요에 의해 발사 고각이 다소 높거나 낮아지더라도, 일정 시간의 비행시간만 확보된다면 기준으로 삼은 범위 내의 입수 자세각을 얻을 수 있을 것으로 예측 가능하다.

**Fig. 7.** Detailed simulation results under roll motion conditions**Fig. 8.** Detailed entry angles corresponding to ship rolls

6. 결론

본 논문에서는 수상함에서 발사되어 일정 구간을 비행하고 수면으로 입수하는 수중운동체의 발사 후 비행 구간의 운동방정식을 도출하고 시뮬레이션을 수행하여 발사 조건별 수면 입수각을 분석해 보았다.

비행구간의 운동모델은 기본 6자유도 운동방정식에서 추정식을 이용하여 대략적으로 구축했지만, 이를 이용한 시뮬레이션 결과는 시험 결과와 대체적으로 잘 매칭되는 것을 확인할 수 있었다.

또한 추가적인 시뮬레이션을 통해 플랫폼의 롤 동요가 있더라도 충분한 비행시간만 확보된다면 수중 제어에 적합한 수면 입수 자세각을 얻을 수 있음을 예상하였다.

참고문헌

- [1] Y. I. Park, D. K. Ryu, S. S. Kim, and M. H. Lee, "Design and Performance Evaluation of Controller for Unstable Motion of Underwater Vehicle after Water Entry," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 166-175, 1999.
- [2] C. Hyun, H. S. Kim, S. Lee, and H. Lee, "Tuning of Roll Damping Coefficient of Underwater Vehicle Using Sea Trial Results," *Journal of the KNST*, Vol. 6, No. 2, pp. 207-211, 2023.
- [3] T. Lee and S. Kwon, "A Study on Practical PMM Test Technique for Ship Maneuverability Using System Identification Method", *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 25-31, 2002.
- [4] E. L. Fleeman, *Missile Design and System Engineering*, AIAA, 2012.