

## 지상 전투차량의 수상 추진 시 동적 안정성에 대한 연구

안태술\* · 이경훈\*\*

### Study on the dynamic Stability of Ground Armored Moving Vehicle during cruising river

TaiSul Ahn\* and KyungHoon Lee\*\*

**Key Words :** 지상 전투차량, 수상 추진, 안정성

#### Abstract

In this study, the characteristics of crossing a river of Ground Armored Vehicle (GAV) were evaluated by numerical method and real size tests. 3-D hybrid mesh systems were constructed by 3-D models of the GAV, and a commercial software, FLUENT, was used in numerical analysis. In order to deal with multi-phase problem (air and water), Volume Of Fluid (VOF) method was used, and Moving and Deforming Mesh (MDM) was adapted for unsteady motion of GAV. There were two steps in this research. Firstly, stability of the GAV which cruised a river was evaluated by changing several shapes of water-proof-front-wing of the GAV in steady state, and compared results (free surface shape and drag value in 10km/h) with those of real size tests. Secondly, results of unsteady analysis considering weight and moment of inertia of the GAV were presented. There were showed a maximum velocity with a designed water jet and dynamic stability including pitch, roll, and yaw moment. Based on these results, the optimal shape of water-proof-front-wing of the GAV was determined for a proto-type of the GAV.

#### 1. 서론

지상 전투차량은 운용 특성상 지상에서 주행하는 것뿐만 아니라 강이나 하천을 도하해야 할 필요성이 있다. 지상 전투차량이 물속으로 진입할 시 부력과 무게에 의해 정적 평형 상태를 이루는 기울임이 발생한다. 이 상태에서 속도를 내면 속도 제공에 비례하여 양력과 항력이 발생하고 동적 평형 상태를 유지하기 위해 지상 전투차량 자세 변화가 이루어진다. 즉, 속도에 따라 발생된 양력과 지상 전투차량 무게의 균형을 잡기 위해 지상 전투차량의 수직 운동이 발생한다. 양력이 지상 전투차량 무게보다 크게 되면 지상 전투차량이 뜨게 되고, 반대의 경우는 가라앉는 현상이 일어난다. 또한, 지상 전투차량 속도에 따라 발생된 지상 전투차량 무게 중심점을 기준으로 한 모멘트가 전복방향일 때는 지상 전투차량이 반시계방향으로, 반대의 복원 방향일 경우는 전두부가 아래로 향하는 회전하는 운동이 발생한다.

본 연구에서는 수면에서 정적 평형을 이룬 지상 전투차량 자세를 기본으로 속도와 선수익 형상 변화에 따라 지상 전투차량의 동적 안정성을 상용 CFD 코드인 FLUENT를 이용하여 정상/비정상 상태 해

석을 수행하고 이를 기반으로 동적 환경의 수상 추진 안정성을 평가하였다.

#### 2. 해석 기법 및 경계 조건

##### 2.1 해석 기법

지상 전투차량이 수면을 지나가는 것을 묘사하기 위해서는 물과 공기의 이상 유체에 대한 해석 기술이 필요하다. 본 연구에서는 자유 표면(Free Surface)을 잘 묘사하는 것으로 알려진 VOF (Volume Of Fluid) 모델을 선택하였다. 식 (1)~(3)은 일반적인 질량 및 운동량 보존 방정식, 식 (4)는 Volume Fraction 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \alpha_q)}{\partial x_j} = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (4)$$

\* 현대로템 응용기술연구원, taisul@hyundai-rottem.co.kr

\*\* 현대로템 응용기술연구원, marklee@hyundai-rottem.co.kr

여기서  $x_i = (x, y, z)$ ,  $u_i = (u, v, w)$ ,  $\mu$ 는 동점성 계수,  $p$ 는 정압,  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서를 나타낸다.  $\alpha_q$ 는  $q$ 번째 유체의 volume fraction 값으로 0에서 1사이의 값을 가지게 된다.

지배 방정식에 대해 유한 체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 이산화 하였으며, 대류항은 1차의 풍상 차분법(Up-Wind Method)을 적용하였으며, 속도-압력의 연성은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 난류 효과를 고려하기 위해 보편적으로 사용되는 standard  $k-\epsilon$  모델을 적용하였다.

지상 전투차량이 도하하는 동안 차량에 작용하는 힘과 모멘트는 계속해서 변화하게 되고 이에 따라 자세도 변화하게 된다. 따라서 6-자유도에 대한 운동 특성을 묘사하기 위해 격자가 생성/소멸할 수 있는 기능이 필요로 하게 된다. 본 해석에서는 FLUENT에 Moving and Deforming Mesh 모델을 적용하였다. 식(5)은 Dynamic Mesh 보존 방정식을, 식(6), (7)은 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\vec{u} - \vec{u}_g) \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

$$= \int_{\partial V} \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV$$

$$\vec{v}_G = \frac{1}{m} \Sigma \vec{f}_G \quad (6)$$

$$\vec{\omega}_B = L^{-1} (\Sigma \vec{M}_B - \vec{\omega}_B \times L \vec{M}_B) \quad (7)$$

여기서  $\rho$ 는 유체 밀도,  $u$ 는 유체 속도 벡터,  $\vec{u}_g$ 는 moving mesh의 격자 속도,  $\Gamma$ 는 확산 계수,  $S_\phi$ 는 스칼라  $\phi$ 의 소스항을 의미한다. 또한,  $\vec{v}_G$ 는 무게 중심의 병진 운동,  $m$ 은 질량,  $\vec{f}_G$ 은 중력,  $\vec{\omega}_B$ 는 회전 운동,  $L$ 은 관성 텐서,  $\vec{M}_B$ 는 body의 모멘트 벡터를 나타낸다.

## 2.2 격자 구성 및 경계 조건

정상 상태 해석에서는 그림 1과 같이 지상 전투차량 표면은 프리즘 격자, 주변은 비정력 격자, 앞과 뒷면은 정력 격자로 구성된 하이브리드 격자계를 사용하였다. 사용된 격자수는 대략 130만 셀 정도이다. 비정상 상태 해석에서는 지상 전투차량의 6-자유도 운동에 따라 격자계가 재구성 되어야 하기 때문에 전체적으로 비정력 격자를 사용하였다.

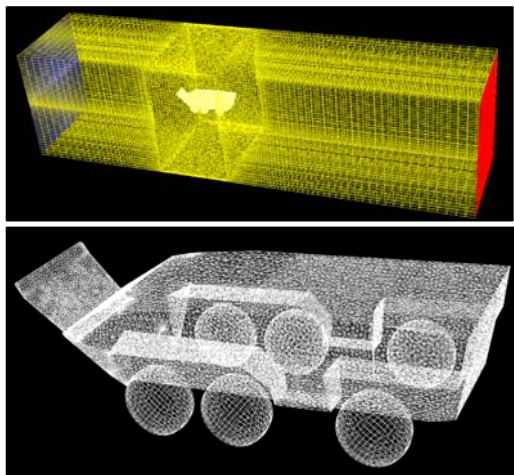


그림1 하이브리드 격자계 (130만 셀)

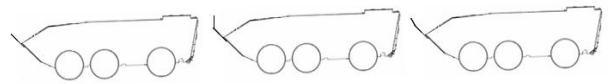
해석에 사용된 경계 조건은 입구에서는 정수압과 유속을 고려한 pressure inlet을 출구에서는 pressure outlet, 지상 전투차량의 벽면에서는 속도가 0이 되는 No-Slip 조건을 적용하였다. 해석에 사용된 중력 가속도는  $9.81\text{m/s}^2$ 을 적용하였으며, 이상 (two phase) 유체는 공기와 물의 물성치를 사용하였다.

## 3. 해석 결과

### 3.1 정상 상태 해석

지상 전투차량의 중량에 의해 속도가 없을 때 중량과 부력이 균형을 이루는 정적 안정 상태인  $2.3^\circ$  앞으로 기울어진 상태를 초기 상태로 가정하고 해석을 수행하였다. 계산 결과로 나온 힘과 모멘트로부터 추후 자세 변화를 반영하여 재해석을 수행하였으며 이 후 정상 상태에서 지상 전투차량의 자세와 필요한 추력을 예측하였다. 정상 상태 해석에 사용된 유속은 0, 7, 10km/h로 본 논문에서는 10km/h 결과만 제시하도록 한다.

또한 정상 상태 해석에서는 선수익 모양에 따라 안정성을 판단하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 선수익 모양에 따라 기본형, 수직 선수익,  $5^\circ$  경사 선수익으로 구분하였다.



a)기본형      b)수직선수익      c)5° 경사선수익

그림 2 해석에 사용된 선수익

그림 3과 4는 해석 결과로  $2.3^\circ$  기울어진 상태에서 기본형과 수직선수익의 수면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기본형의 경우는 차체가 물에 잠기는 불안정한 형태를 나타내고 있으나, 수직선수익과  $5^\circ$  경사선수익(그림 생략)의 경우는 침수가 되지 않는 것을 알 수 있다.

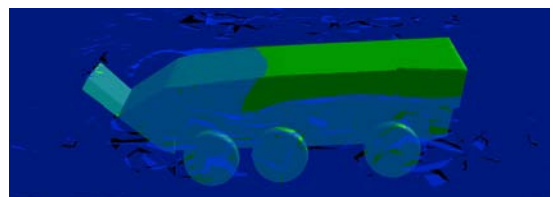


그림3 10km/h 도하시 수면(기본형)

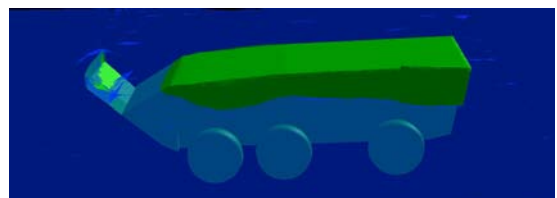


그림4 10km/h 도하시 수면(수직선수익)

표1은 힘과 모멘트 균형으로부터 초기 정적 상태에서 정상 상태에 도달할 때까지 자세 변화를 예측해서 해석을 수행한 결과이다. 10km/h로 도하 시 초기 정적 상태인  $2.3^\circ$  반시계 방향으로(선수익이 앞으로) 기울어진 상태에서는 양력이 부족하고

모멘트는 시계방향으로 작용하고 있다. 따라서 다음 해석에서는 차체를 시계방향으로 회전시킨 0° 자세에서 정상 상태 해석을 수행하였다. 수행 결과 역시 양력이 부족하지만, 모멘트는 거의 평형 상태에 도달하고 있는 것을 알 수 있다. 이후 해석은 수면을 10cm 낮추어서 해석을 수행하였고, 그 결과 양력과 중량이 거의 평형을 이루고 있으며, 모멘트도 크지 않음을 알 수 있다.

표1 자세 변화 예측(수직선수익)

2.3°	정적상태 수면	L	145.00	▼
		D	10.20	
		M	16.00	↻
0°	정적상태 수면	L	146.00	▼
		D	9.80	
		M	1.89	↻
10Cm 높은 수면	10Cm 높은 수면	L	159.00	▲
		D	10.50	
		M	1.97	↻

단위 : KN(힘), KNM(모멘트)

그림5는 5° 경사선수익에 대해 10km/h 도하시 해석결과와 시험 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수면 높이와 모양이 유사하게 보이는 것을 알 수 있다.

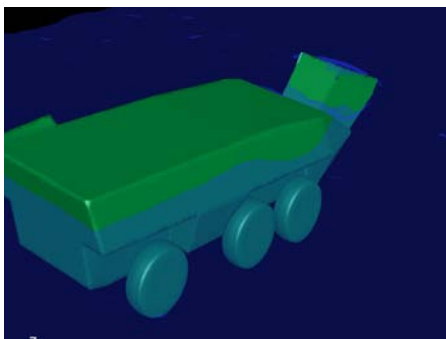


그림5 5° 경사선수익의 해석 결과와 시험 결과 비교

그림6은 밧줄로 견인 시험한 결과로 5, 7, 10km/h의 속도에서 측정된 것이다.

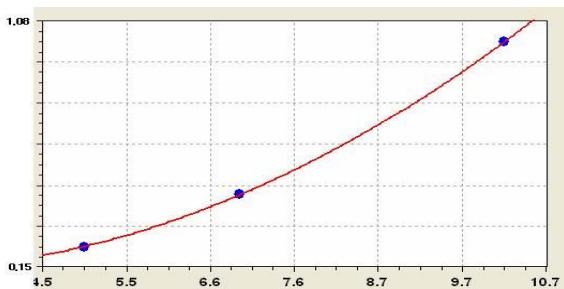


그림6 속도에 따른 견인력 시험결과 값 (x:속도, y:견인력(10km/h에서 1로 표준화))

시험 결과에서 견인력을 항력으로 보정한 후 해석 결과와 비교한 것으로 5%정도의 오차를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2 비정상 상태 해석

비정상 상태 해석은 지상 전투차량이 도하시 자세(pitch, roll, yaw)의 변화 및 water jet에 의한 추력에 의해 도달할 수 있는 최고 속도 등을 제시하였다. 해석에 사용된 지상 전투차량 형상은 정상 상태 해석 결과와 다른 형상으로 그림7에 보여주고 있다. 이 형상에 대해서도 정상 상태 해석을 수행 하였지만, 지면 관계상 내용은 생략하고 비정상 상태 해석 결과에 대해서만 제시하도록 한다. 본 논문에서 제시하는 결과는 유속이 7.2km/h로 유입되고 무게중심(CG)에 14,000N의 추력을 가했을 때 지상 전투차량의 자세 변화 및 속도를 보여 준다.

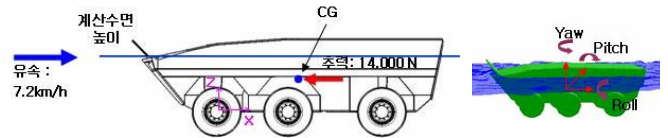
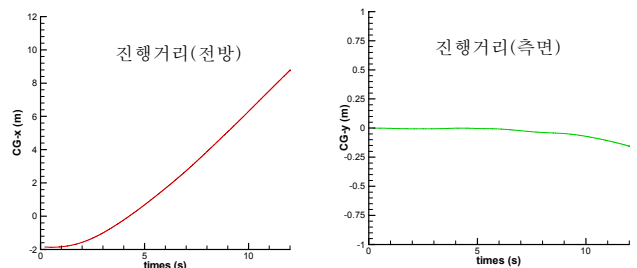


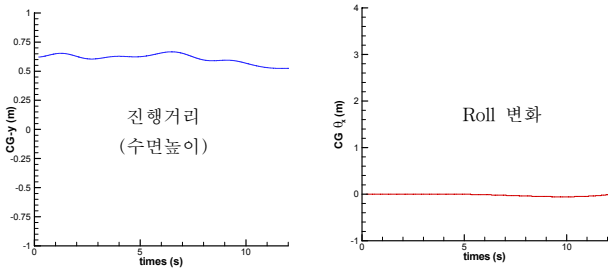
그림7 비정상 해석에 사용된 지상 전투차량

그림8은 지상 전투차량의 진행거리/자세/속도를 시간에 대한 변화를 그래프로 보여주고 있다. 유속이 7mk/h로 유입되고 있기 때문에 초반에 지상 전투차량은 조금 뒤로 밀렸다가 추력에 의해 앞으로 전진하고 있는 것을 그림에서 확인할 수 있다. 또한 시간이 진행됨에 따라 roll과 yaw의 변화에 의해 약간 측면으로도 진행이 되고 있으며, 양력과 pitch의 변화에 따라 지상 전투차량 수면 높이도 변화되는 것을 알 수 있다.

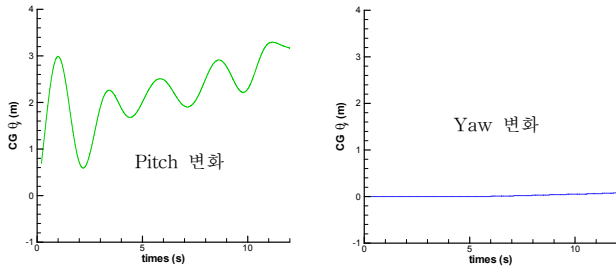
지상 전투차량이 진행함에 따라 선수익에서 수압에 의한 압력으로 pitch가 증가하는 자세로 진행하면 수면에 잠기는 후 반부 영역이 커지게 된다. 그러면 반대로 후반부의 압력이 증가하여 pitch가 감소되고 그 후 다시 선수익 압력이 증가하여 pitch가 증가하는 일련의 과정을 반복하게 된다. Roll과 yaw는 지상 전투차량 형상의 비대칭성에 의해 발생하고 한쪽으로 기울어지게 되면 역시 수면에 잠기는 압력이 커져서 반대편으로 작용하는 힘이 발생하여 복원되는 방향으로 진행이 된다. 14kN의 추력을 CG에 가했을 때 최대 도달 속도는 약 12km/h까지 나오는 것을 그림에서 확인할 수 있다.



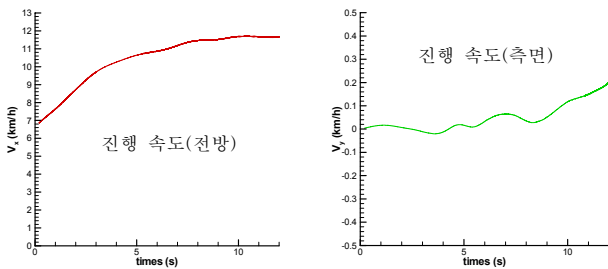
a) 진행거리 변화 (전방, 측면 진행거리)



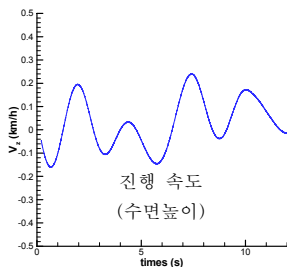
b) 진행거리 변화 (수면높이) 및 자세변화 (Roll)



c) 자세변화 (Pitch, Yaw)



d) 진행속도 변화 (전방, 측면)



e) 진행속도 변화 (수면높이)

그림8 지상 전투차량의 진행 방향/자세/속도 변화

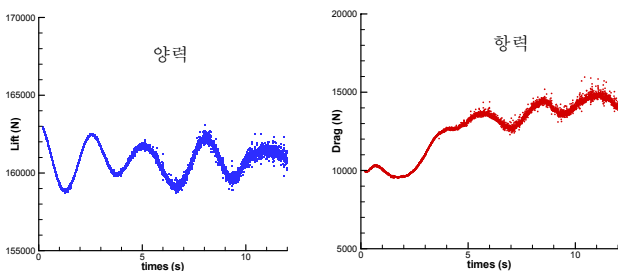


그림9 지상 전투차량의 양력/항력 변화

그림9는 지상 전투차량의 양력과 항력의 변화를 보여주고 있다. 양력은 일정한 값을 기준으로 진동하고 있으며, 항력은 초반에 점점 증가하여 14kN 정도까지 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지상 전투차량이 수상 도하시 선수의 형상에 따라 안정성, 자세변화, 추력에 의한 최고 도달 속도 등을 해석 및 시험에 의한 검증을 하였다. 정상 상태 해석에서는 기본형만으로 도하시 불안정한 반면, 수직선수익과 5° 경사선수익의 경우는 안정한 것으로 판단된다. 5° 경사선수익의 10km/h 견인 시험 결과와 해석 결과 비교시 비교 수면이 비슷하게 형성되고 있으며, 항력값을 비교할 때 5% 이내의 오차를 보여주고 있다. 비정상 상태 해석에서는 지상 전투차량이 water jet으로 추진시 수면에 잠기는 압력 변화에 의해 pitch, roll, 그리고 yaw의 자세변화가 나타나게 된다. 또한 14kN 추진 시 최고 도달 속도는 약 12km/h 정도일 것으로 예측이 된다.

#### 참고문헌

- [1] FLUENT 6.3 user's guide
- [2] Cook, M. V., "Flight Dynamics Principles", Arnold, 1997