

수치해석을 이용한 자주도하장비의 수상성능 분석

김근형^{*,1)} · 장유진¹⁾ · 이종석¹⁾ · 이남훈¹⁾ · 허영민¹⁾ · 오재이¹⁾

¹⁾ 한화에어로스페이스 LS 사업부 M&S팀

Analysis of Hydrodynamic Performance for Korea Amphibious Bridging Vehicle(KABV) by Using CFD

Keunhyong Kim^{*,1)} · Yujin Jang¹⁾ · Jongseok Lee¹⁾ · Namhun Lee¹⁾ · Youngmin Heo¹⁾ · Jaeyi Oh¹⁾

¹⁾ Modeling & Simulation Team, Land Systems Business Group, Hanwha Aerospace, Korea

(Received 12 November 2024 / Revised 2 January 2025 / Accepted 22 January 2025)

Abstract

Military operations in South Korea require frequent river crossing due to the country's terrain. While existing bridges serve this purpose, it is vulnerable to enemy sabotage. To solve this, the South Korea military introduced ribbon bridges in 1992. However logistical challenges and aging equipments have prompted the need for alternative solutions. The recently introduced Amphibious Bridging Vehicle(ABV) "KM3", developed in Germany's GDELS, offers a promising alternative. This study focuses on estimating the drag resistance of the ABV "KM3" during waterborne operations by using Computational Fluid Dynamics(CFD). Since discretization errors in time and space are critical error factors in CFD analysis, 'Grid convergence Index' was applied to study the reduction of these errors. Based on this, the hydrodynamic performance of ABV "KM3" was evaluated under varying flow velocities.

Key Words : Amphibious Bridge Vehicle(도하차량), Resistance Test(저항시험), CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산 유체역학), GCI(Grid Convergence Index, 격자 수렴성 지표)

1. 서론

우리나라 지형 특성상 하천이 많아 군 작전 수행 중 물을 건너야 하는 경우가 많다. 기존에 건설되어 있는 교량을 이용하여 전차 및 차량이 이동할 수도 있지만, 적군에 의해서 파괴가 된다면 우리 군의 기동

부대가 기동력을 상실할 가능성이 크다. 이에 우리 군은 하천 도하 작전을 수행하기 위해 1992년에 리본 부교를 도입하여 운용하고 있다. 리본 부교의 경우 장비의 연식이 오래되기도 했고, 단정과 다리가 되는 교절을 차량 또는 헬기로 옮겨야 하고 진수 후에도 차량으로 다시 회수해야 하는 등 작전 시 소요되는 시간이 길어 신규 장비 도입에 대한 요구가 많았다. 이러한 문제를 극복하고자 최근 도입된 것이 자주도하장비이다. 자주도하장비는 바퀴가 달린 수륙양용차

* Corresponding author, E-mail: keun-h.kim@hanwha.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

량으로 이러한 차량에 관한 연구는 많이 수행되어 있다^[1,2,3].

새롭게 도입된 자주도하장비 KM3는 독일의 GDELS사가 원천기술을 보유하고 있고, 기술을 이전받아 국산화율 90%를 목표로 국내에서 2027년까지 생산해 전력화할 예정이다.

자주도하장비는 하천의 유속 조건에 영향을 많이 받는 만큼, 다양한 유속을 고려한 저항 성능과 차체 거동에 대한 분석이 필수적으로 요구되어 진다. 저항 성능을 확인하는 방법으로 모형선 저항시험(Resistance Test) 및 전산 유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 해석을 활용할 수 있다.

모형선 저항시험은 선체의 운동 응답 특성을 파악하기 위한 가장 실질적인 방법이지만, 모형선 제작에 필요한 비용과 시간에 따른 경제적인 문제와 공간적인 제약 등으로 현실적인 한계가 분명하다. CFD 해석은 현재 수치 기법 및 하드웨어의 발달에 따른 병렬계산 기법의 발전으로 다양한 설계 변수들의 영향성 평가를 시간과 비용을 절감하여 수행할 수 있는 수준까지 도달하여 여러 산업현장에서 널리 사용되고 있다.

CFD 해석은 시간과 공간에 대한 차분에 의한 오차가 중요한 오차 요인 가운데 하나이다. 본 연구에서는 선정한 계산 영역에 대한 수치적 불확실도 및 오류를 정량적으로 평가하기 위해 격자 수렴도 지표인 Grid Convergence Index(이하 GCI)를 도출하여 저항 성능 분석에 활용 가능한 격자 시스템을 선정하였다. GCI의 도출을 통하여, 생성된 격자계의 격자로 인한 불확실도를 정량적으로 도출할 수 있으며 격자 밀집도를 판단하는 지표로 활용될 수 있다. 본 연구에서 적용한 GCI 도출을 통한 오차 분석 기법은 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineering, ASME)의 유체공학 부분(Fluids Engineering Division, FED)에서 제안한 Richardson 외삽법 기반의 이산화 오류 추정 기법이다^[4].

본 연구에서는 3차원 CFD 해석을 수행하여 실제 차 크기의 자주도하장비의 항력과 차체 거동을 다양한 유속 조건에 대해 산출하여 보았다. GCI 개념을 적용하여 격자 수준에 기인한 공간 이산화 오차에 관한 연구를 선 수행하여 격자 수준에 대한 타당성을 확보하였고, 이를 바탕으로 자주도하장비의 유속 변화에 대한 저항 해석을 통해 항력 및 차체 거동 특성을 자세히 살펴보았다.

2. 해석 모델

2.1 해석 형상

자주도하장비는 2대를 결합해 동력이 있는 배와 같이 움직일 수 있는 “문교” 형태와 여러 대의 자주도하장비를 하나의 다리처럼 연결해서 운용하는 “부교” 형태가 있다. Fig. 1에 자주도하장비의 문교와 부교 형상을 나타내었다.

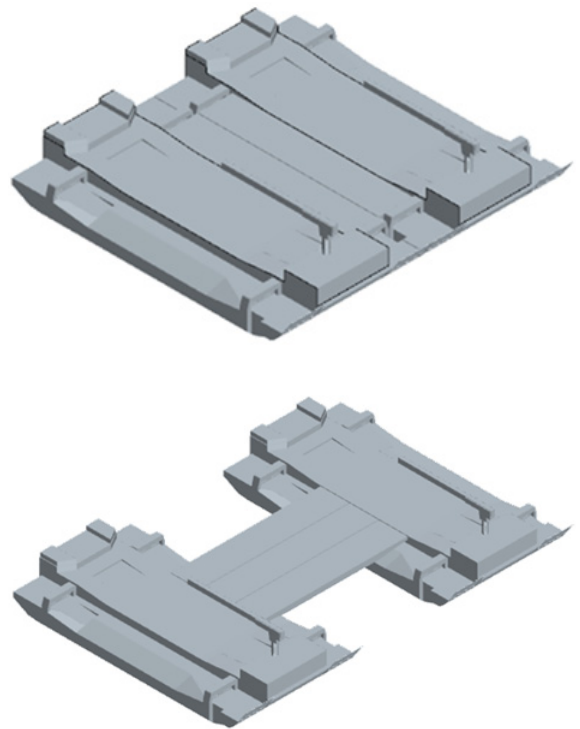


Fig. 1. Simplified shape of KM3(top : ferry mode, bottom : bridge mode)

본 연구에서는 자주도하장비의 문교 형태에 대하여 해석을 수행하는 것으로 범위를 좁혔다. 부교의 경우 하천의 차안에서 대안까지 여러 대의 자주도하장비가 다리 형태로 연결되어 운용되는데, 해석 범위를 정의하기 어렵고 특히 중량을 산정하는 데 어려움이 있다. 문교의 경우 차량 2대가 결합해 있어, 형태가 명확하고 중량을 정확히 산정할 수 있다. 즉 경계조건 설정을 명확히 정의할 수 있는 문교 상태의 자주도하장비를 최종 해석 모델로 선정하여 수상성능 분석을 수행하였다.

2.2 해석 기법

수상 저항 유동해석은 난류 운동의 지배 방정식인 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 기반으로 한다. 이때, 선체의 운동을 모사하기 위해 이동 격자계를 적용하였다. 이를 위해 차체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하고, 이를 6 자유도 운동방정식에 대입하여 운동 변위에 대한 저항 성능 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 상용 코드인 STAR-CCM+ Ver. 16.04를 해석에 사용하였다.

계산 영역은 실린더 형태로 구성하였으며 자주도하장비의 전장을 L이라고 했을 때, 전체 계산 영역의 반경은 3.5 L로 설정하였다. 계산 영역의 바닥 방향 깊이는 자주도하장비의 실제 운용 조건을 고려하여 자유수면 기준으로부터 5 m로 설정하였고 공기 영역의 높이는 자유수면 기준 4.5 m로 설정하여 해석을 수행하였다.

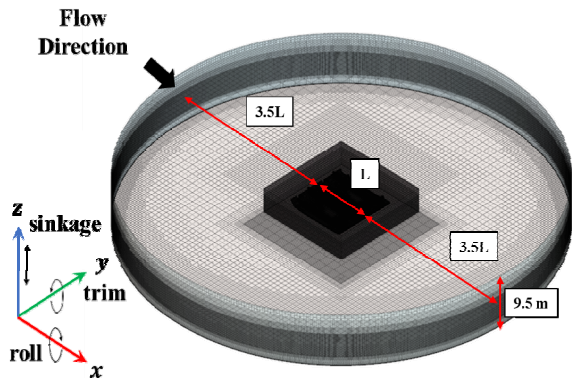


Fig. 2. Computational domain size for the hull resistance analysis

자주도하장비의 형태는 사각형이지만, 전체 계산 영역의 형태는 직육면체가 아닌 실린더 형태로 구성한 이유는 자주도하장비 특성에 기인한다. 자주도하장비는 종/횡 방향 운용이 가능하다. 즉 각도별 사선 방향 운용에 대한 CFD 해석을 수행하는 데 있어, 직육면체 도메인은 면과 면이 만나는 영역에서 교란이 나타날 수 있으며 수치해석의 신뢰성을 보장할 수 없는 문제가 발생할 수 있다. 이 경우 유동 방향이 변경되었을 때, 모델을 회전시켜서 유동 방향을 구현하는 방법이 일반적이거나, 유동 방향이 변경됨에 따라 격자를 재생성해야 하는 불편함이 뒤따를 수 있다. 따라서 일관된 해석과 수치 정확성과 더불어 수렴성 향상 및 해석

시간 단축을 위해 실린더 형태의 도메인으로 구성하고 해당 경계면을 Velocity inlet 경계조건을 적용하여 해석을 수행하였다^[5]. 바닥면은 천수 효과 영향을 확인하기 위해 Wall 경계조건을 적용하였고, 천장면은 Pressure outlet 경계조건을 적용하였다.

자유 수면을 고려하기 위한 다상모델(Multi-Phase)은 VOF(Volume of Fluid)^[6,7] 방법을 사용하여 모델링하였고, 차량의 차체 자세를 모사하기 위해 STAR-CCM+에서 제공하는 DFBI(Dynamic Fluid Body Interaction) 기법과 중첩 격자(Overset Mesh) 기법을 적용하여 해석을 수행하였다.

DFBI 기법은 작용하는 힘과 모멘트에 의해 계산 영역이 회전 및 병진 운동하는 방법으로, 본 해석에서는 x축 회전(roll), y축 회전(trim), z축 방향 병진(sinkage)이 적용되었다. 중첩 격자 기법은 차량의 주변 격자와 배경 격자를 각각 생성하고 인터페이스를 생성하여 중첩된 영역에서의 셀 간 데이터를 교환하는 해석 기법이다.

해석에 사용된 난류 모델은 강건하고 경제적인 해석 시간을 위하여 realizable k-ε 난류 모델을 적용하였으며, 표면에서의 정확한 전단력 계산을 위해 Two-layer all y+ wall treatment 벽함수를 적용하였다. 해석에 적용한 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Input information for CFD

Item	Value
Time	Implicit Unsteady
Governing Equation	RANS
Turbulent Model	Realizable k-ε model
Wall Function	Two-layer all y+
Multiphase Model	Volume of Fluid
Physical Time	100 s
Time step	0.02 s
Weight	- ton

자주도하장비의 수상 저항 해석을 위한 적절한 격자 조밀도 수준을 확인하기 위하여 GCI 개념을 적용하여 그 결과를 3장에 상세하게 기술하였다. 해당 결과에서 도출된 격자계를 이용하여 수상 속도 변화에 따른 수상성능 해석을 수행하였다.

3. GCI(Grid Convergence Index) 도출

격자 조밀도에 따른 수렴도(Grid Convergence Index) 지표를 도출하기 위해서 격자계 구성에 따른 주요 변수의 비교를 통한 이산화 오류 추정 절차를 Celik 등^[4]에 의해 제시된 방법을 활용하였다. GCI는 가장 조밀한 격자의 물리량이 갖는 격자에 대한 불확실성을 나타낸다.

본 연구에서는 격자 크기에 따른 불확실성을 도출하기 위해 비정렬 격자를 사용하여 Coarse(C), Medium(M), Fine(F) 격자를 생성하였다. 비정렬 격자 기준 격자 길이 스케일 h 는 식 (1)과 같다.

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3} \quad (1)$$

여기서 h 는 격자 크기이며, ΔV_i 는 i 번째 격자의 체적이고, N 은 수치해석에서 사용되는 총 격자 수를 의미하고 있다. 서로 다른 크기의 격자계를 구성 시, 고려해야 하는 격자 조정 계수(Grid refinement ratio) r 은 Celik 등^[4]에 의하여 정의되었으며, 격자 조정 계수 값은 1.3 이상으로 권고되고 있으나, 이는 경험에 기반을 둔 값이며 정식 도출에 의해 근거가 된 값은 아니다. GCI 계산에 적용될 격자의 구성은 체계적으로 이루어져야 하며, 기하학적으로 유사한 격자의 사용이 바람직하다. Kim 등^[8]은 사류 펌프 GCI 도출에 사용한 격자 조정 계수는 1.2~1.28로 설정하였고 Gohil & Saini^[9]는 1.3 이하로 격자 조정 계수를 설정하여 실험 결과와 비교를 통해 그 타당성을 검토하였다. GCI를 도출하기 위한 Apparent order p 의 계산은 $h_f < h_m < h_c$ 을 기반으로 하며, 이에 따른 격자 조정 계수는 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$r_{mc} = h_m / h_c \quad (2)$$

$$r_{fm} = h_f / h_m \quad (3)$$

Stern 등^[10]은 Coarse-Medium 격자 간 물리량의 차 ϵ_{mc} 및 Medium-Fine 격자 간 물리량의 차 ϵ_{fm} 의 비율을 격자 수렴비(Refinement ratio) R_i 로 정의하였으며 식 (4)와 같다.

$$R_i = \epsilon_{fm} / \epsilon_{mc} \quad (4)$$

도출된 Refinement ratio 값은 아래 식 (5)와 같이 3가지 조건으로 나타낼 수 있으며 해의 수렴상태를 파악할 수 있다.

- (i) Monotonic Convergence $0 < R_i < 1$
- (ii) Oscillatory Convergence $R_i < 0$ (5)
- (iii) Divergence $1 < R_i$

도출된 Refinement ratio가 단조 수렴(Monotonic Convergence) 조건에 있으면 Richardson 외삽법을 활용한 GCI 도출이 가능하다. 진동 수렴(Oscillatory Convergence)의 경우에는 해석 케이스 수가 추가로 필요하다. 반면에 발산(Divergence)의 경우 GCI 도출이 불가능하다.

Refinement ratio가 단조 수렴 조건일 경우 Apparent order p 는 식 (6)과 같다.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{fm})} \left| \ln\left(\frac{1}{R_i}\right) + q(p) \right| \quad (6)$$

$$q(p) = \ln\left(\frac{r_{fm}^p - 1}{r_{mc}^p - 1}\right) \quad (7)$$

Apparent order p 를 계산했다면 선정된 물리량에 대한 외삽값 ϕ_{ext}^{21} 는 식 (8)과 같다. 본 연구에서는 GCI에 활용할 물리량으로 자주도하장비에 작용하는 유속 방향 차체 항력으로 선정하였다.

$$\phi_{ext}^{21} = \frac{r_{fm}^p \phi_1 - \phi_2}{r_{fm}^p - 1} \quad (8)$$

정밀한 격자계의 GCI 값을 추정하기 위한 추정 상대 오차(Approximate relative error) e_a^{21} 및 외삽 상대 오차(Extrapolated relative error) e_{ext}^{21} 는 식 (9) 및 (10)과 같이 나타낼 수 있다. 추정 상대 오차를 활용하여 격자 수렴도 지표 GCI_{fine}^{21} 은 식 (13)과 같이 정의할 수 있다.

$$e_a^{mc} = \left| \frac{\phi_m - \phi_c}{\phi_m} \right| \quad (9)$$

$$e_a^{fm} = \left| \frac{\phi_f - \phi_m}{\phi_f} \right| \quad (10)$$

$$e_{ext}^{ef} = \left| \frac{\phi_{ext} - \phi_f}{\phi_{ext}} \right| \quad (11)$$

$$GCI_{medium}^{mc} = \left| \frac{1.25e_a^{mc}}{r_{mc}^p - 1} \right| \quad (12)$$

$$GCI_{fine}^{fm} = \left| \frac{1.25e_a^{fm}}{r_{fm}^p - 1} \right| \quad (13)$$

여기서 1.25는 안전계수로 GCI 계산을 위한 비교 격자계가 3개일 때 적용되는 계수이다.

해당 절차에 따라 Coarse-Medium 및 Medium-Fine 간 격자 비율인 r_{mc} 과 r_{fm} 을 동일하게 설정하여 격자 밀집도에 의한 불확실성 분석을 수행하였으며 각 격자계에 대한 격자 수 및 격자 길이 스케일은 Table 2 에 나타내었다. 전체 격자계 기준 y+ 값의 범위는 동일하게 50 수준으로 구성하였다.

Table 2. Grid sizes for the grid convergence analysis

	Coarse(C)	Medium(M)	Fine(F)
Number of Grid	5,337,838	9,714,702	17,600,474
Refinement length	1.22		

자주도하장비의 GCI를 산출하기 위해서 문교 형상을 채택하였다. 특정 속도 조건에 대하여 저항 성능 해석을 수행하였으며, GCI 도출을 위한 변수로는 차체에 작용하는 저항으로 선정하였고 90s~100s 구간의 평균값을 사용하여 GCI 결과를 도출하였다. 보안상의 문제로 항력을 공개할 수 없으므로 항력 값이 가장 낮은 Fine 격자계의 값을 기준값으로 선정하고 그 외 격자계의 값을 % 비율로 계산하여 Table 3에 나타내었다.

GCI를 도출한 결과, 격자 수렴비가 단조 수렴 구간에 있는 것을 확인하였고, 최종적으로 계산된 GCI_{fine}^{fm} 결과는 2.08 %로 GCI_{medium}^{mc} 의 5.15 %에 비해 작은 오

차를 도출하는 것을 확인하였다. GCI는 격자 밀집도 변화에 따라 물리량의 불확실도를 정량적으로 나타내는 지표이기 때문에, Fine 격자계를 활용한 저항 성능 해석 문제에 있어서 적절한 격자 시스템을 확인하였다. 격자계의 형상은 Fig. 3과 같다.

Table 3. Results of the grid convergence analysis

	Coarse(C)	Medium(M)	Fine(F)
Resistance Ratio	109 %	102.5 %	100 %
ϵ_{mc}	-2.08		
ϵ_{fm}	-0.82		
R_i	0.394(monotonic convergence)		
\dot{p}	4.684		
e_a^{mc}	6.34 %		
e_a^{fm}	2.56 %		
GCI_{medium}^{mc}	5.15 %		
GCI_{fine}^{fm}	2.08 %		
e_{ext}^{ef}	1.74 %		

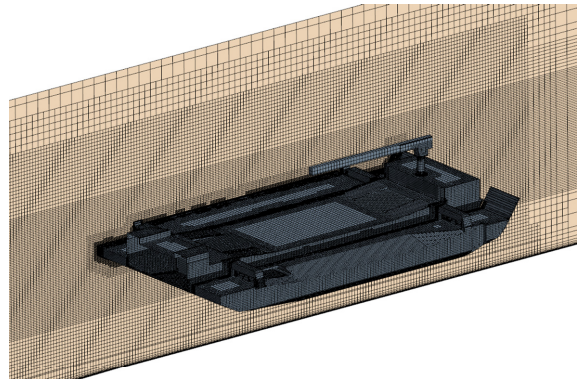


Fig. 3. Numerical grid employed for calculations

4. 수치해석 결과

4.1 저항 성능 분석

3장에서 GCI를 도출하여 얻은 격자계를 이용하여 자주도하장비의 수상 속도 변화에 따른 저항 및 차체 거동을 포함한 수상성능 분석을 수행하였다.

유속에 따른 항력 결과를, 분석 수행한 최고 속도의 항력 값을 기준으로 % 비율로 계산하였고, 속도는 분석 수행한 최고 속도를 기준값으로 다른 속도를 속도 비로 표기하여 Fig. 4에 나타내었다. 또한, 자주도하장비에 설치된 펌프젯 추력 곡선도 함께 나타내었다.

저항 곡선과 펌프젯 추력 곡선이 만나는 교점의 속도는 자주도하장비가 달성할 수 있는 최고 속도가 되는데, 수치해석으로 얻은 수상 최고 속도는 해석 최고 속도 대비 0.963 수준으로 확인하였다. 독일 GDELS社에서 제공한 수상 최고 속도와 비교해 보았을 때, 그 차이가 크지 않고 유사한 수준임을 확인하였고, 실제 크기의 자주도하장비의 CFD 해석에 대한 정확도를 간접적으로 확인할 수 있었다.

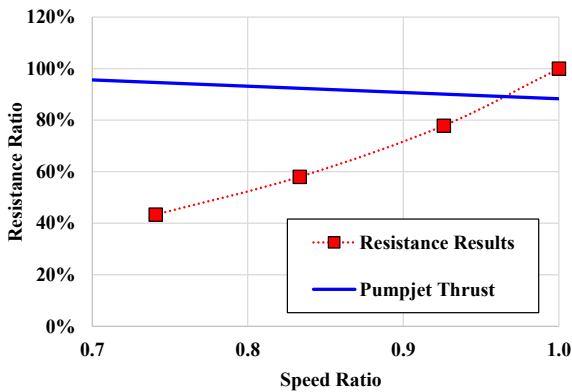


Fig. 4. Computed resistance results

4.2 동적 거동 분석

Fig. 5에는 자주도하장비 문교 상태의 침하량(Sinkage) 값을 선체 길이 L 로 나누어 무차원화하여 나타내었다.

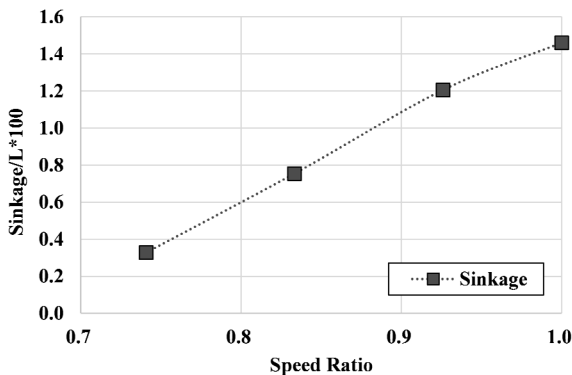


Fig. 5. Computed sinkage results

일반적으로 속도가 증가하면 양력에 의해 침하량이 감소할 것으로 예상할 수 있는데, 자주도하장비의 경우 속도가 증가함에 따라 침하량이 커지는 것을 확인하였다. 속도가 증가할수록 자주도하장비가 물속으로 가라앉는다는 의미로 볼 수 있다. 이는 자주도하장비 하부에서 빠른 유속이 형성될 때, 차량 하부에서 음압(Negative pressure)이 발생하여 차량을 중력 방향으로 잡아당기고 있기 때문으로 파악되었다. Fig. 6에는 수상 속도에 따른 차량 하부의 정수압을 뺀 정압(Static pressure)을 식 (14)로 무차원화 하여 압력계수 C_p 로 나타내었다.

$$C_p = \frac{p}{0.5\rho U^2} \quad (14)$$

여기서 p 는 정압에서 정수압을 뺀 압력, ρ 는 물의 밀도, U 는 물의 유입 속도이다.

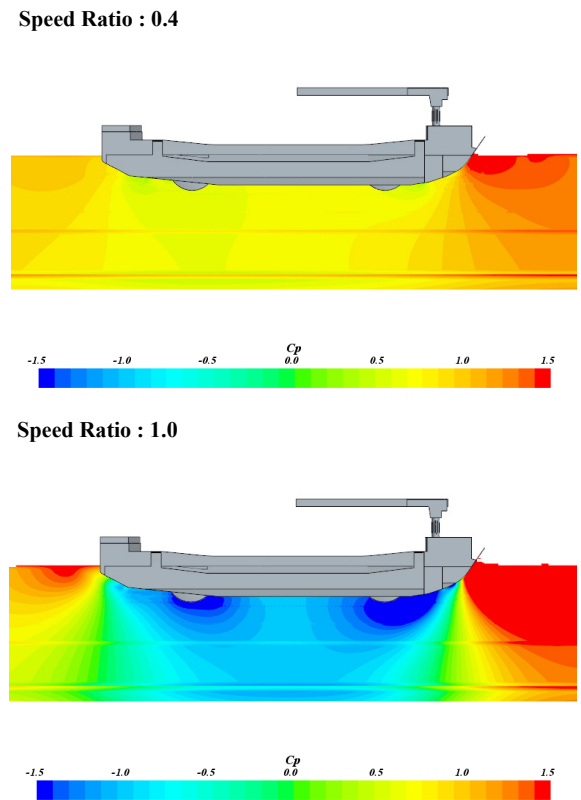


Fig. 6. Comparison of pressure coefficients at different speed ratio(top : 0.4, bottom : 1.0)

유속이 상대적으로 느린 속도비 0.4에서 차량의 하부에서는 C_p 값이 0 이상으로 음압이 발생하지 않았으나, 유속이 빠른 속도비 1.0의 차량 하부에서는 선수 물막이를 지난 유체에 의해 차량 하부에서 C_p 값이 -0.5 이하로, 음압을 발생시키는 것을 확인하였다.

선체 하부의 음압은 선체의 트림(trim)에도 영향을 주는 것을 확인하였다. Fig. 7에는 선체 하부에서 발생하는 음압의 크기를 압력계수 C_p 로 나타내었는데, 선미부 대비 선수부에서 음압의 범위가 넓고 그 크기가 큰 것을 볼 수 있다. 이는 선수 내림 방향으로 회전할 수 있다는 의미이다.

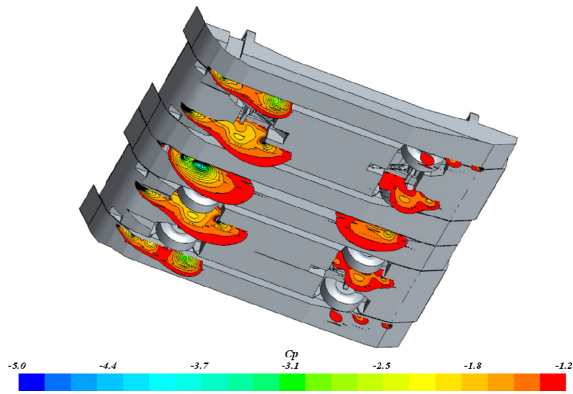


Fig. 7. Pressure coefficients at high speed

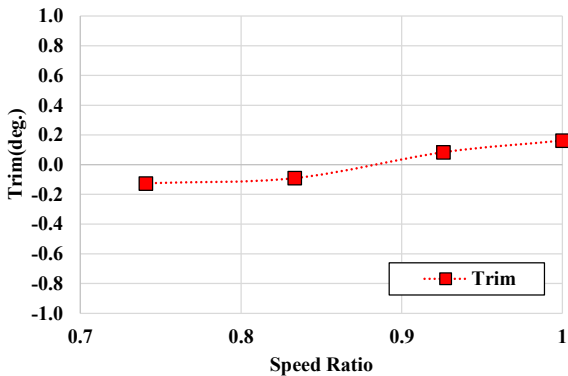


Fig. 8. Computed trim angle results

Fig. 8에 수상 속도에 따른 트림을 나타냈는데, 음의 값은 선수 들림 방향이고, 양의 값은 선수 내림 방향을 의미하고 있다. 수치해석 결과를 살펴보면 최고 속도 부근에서 속도가 증가함에 따라 선수 하부의 음

압의 크기가 커지면서 양의 트림으로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 하지만 속도가 증가함에 따라 트림 각 변화의 기울기가 감소하게 되는데, 이는 선체 전방 하부에 강한 음압이 작용함과 동시에 자주도하장비의 물막이와 유선형 형상의 선수에 종방향의 강한 압력이 작용하여 선수 내림 방향의 운동을 상쇄하기 때문이다.

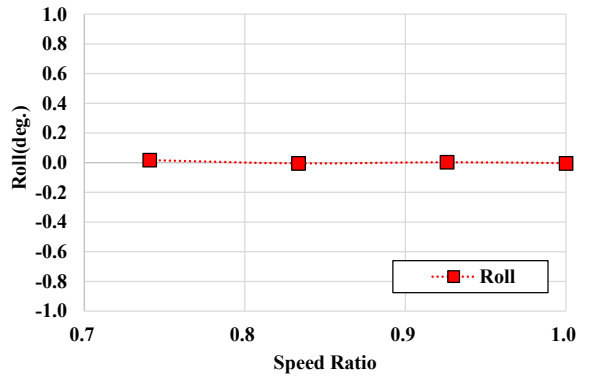


Fig. 9. Computed roll angle results

Fig. 9에는 유속에 따른 roll 값을 나타내었다. 자주도하장비의 형상이 좌우대칭이기 때문에 그 값은 0에 수렴하는 것을 확인하였다.

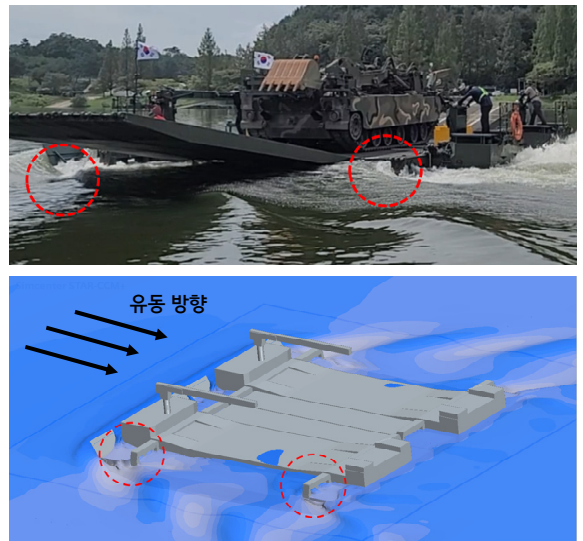


Fig. 10. Comparison of wave profiles around the vehicle at speed ratio 0.92(top : experiment, bottom : CFD)

Fig. 10은 자주도하장비가 저수지에서 일정 속도를 가졌을 때의 수면 모습과 수치해석의 자유 수면 형상을 비교하여 나타내었다. 자주도하장비는 차체 하부의 펌프젯 작동에 의해 운용되기 때문에 후방에서의 유동이 CFD 해석과 차이가 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면, 선수와 선측에서 발생하는 자유 수면의 높이 변화 및 파형의 모습은 실제 현상과 가깝게 모사가 되는 것을 확인할 수 있다.

4.3 수치해석 결과와 문교 운용성 관계

자주도하장비의 문교 운용은 정해진 적재하중과 유속 조건 내에서 저항과 자세가 안전한 범위 내에서 동작 가능해야 한다. 수치해석 결과, 저항과 펌프젯 성능을 이용하여 최고 속도를 예측했을 때, 원천사에서 제공한 최고 속도 수치와 비슷한 속도에 도달하는 것을 확인하였고 이때 자세는 문교 위 가설 병들이 작업하는 데 어려움이 없는 각도 이내에서 변화하는 것을 확인하였다.

속도가 빨라질수록 침하량과 트림이 커지는 경향을 보았을 때, 최고 속도를 상회하는 속도에서는 선수부로 물이 넘쳐 들어오는 Plow-in이 발생할 가능성이 있다. 원천사에서는 이를 고려하여 펌프젯을 설계, 적용함으로써 운용 속도를 설정하여 안정성을 확보했을 것으로 판단하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 자주도하장비 문교 상태의 수상성능 평가를 위해 CFD 해석을 수행하였다. 국내에 처음 도입되는 장비인 만큼, 다양한 유속에 대한 수상 저항 및 동적 거동을 자세히 검토할 필요가 있었다. 먼저 GCI를 적용하여 격자 수준에 대한 타당성을 확인하였고 이를 바탕으로 자주도하장비의 유속 변화에 대한 수상성능 분석을 통해 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) GCI 계산 결과, 격자 수렴비가 단조 수렴 구간에 있는 것을 확인하였고, 최종적으로 계산된 GCI_{fine}^{m} 결과는 2.08 % 수준으로 적은 오차를 도출하는 격자계를 구성하였다.
- 2) CFD 해석으로 계산된 유속별 항력 곡선과 펌프젯 추력 곡선의 교점을 통해 얻은 자주도하장비 수상

최고 속도는 해석 최고 속도 대비 0.963 수준으로 원제작사에서 제공한 수상 최고 속도와 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

- 3) 유속이 빨라질수록 차랑 하부에서 발생하는 음압에 의해 자주도하장비의 침하량이 커지고 트림이 선수 내림 방향으로 회전하는 것을 확인하였다. 차랑 전방 하부에서 강한 음압이 발생하지만 물막이와 유선형 형상의 선수에 강한 종방향 압력이 동시에 작용하여 선수 내림 방향의 운동을 상쇄하여 트림 각은 0도에 가깝게 수렴하고 있다.
- 4) 자주도하장비가 저수지에서 실제 주행하는 모습과 CFD 해석 간 자유 수면 높이 변화를 비교했을 때, 선수와 선측에서 모습이 유사함을 확인할 수 있었다.

자주도하장비는 종/횡 방향 수상 운행이 가능한 장비이므로 향후 다양한 외부 조건에 대한 동적 거동 연구가 필요하다.

또한, CFD 해석 결과에 대한 검증을 위한 시험 결과와의 비교 연구가 필요하다. 실제 차 크기의 저항과 같은 수치를 제시하는 데 어려움이 있으므로, 다양한 시험을 통해 CFD 해석의 신뢰성을 높일 수 있는 연구가 필요하다.

마지막으로 자주도하장비에 펌프젯을 포함한 자항 해석을 위한 기법 연구가 요구된다. 자항 해석의 경우 펌프젯의 추력 및 동력을 정도 높게 추정할 수 있어야 하므로 추가적인 수치 기법 연구가 필요하다.

References

- [1] Helvacioğlu, S., Helvacioğlu, Ismail., Tuncer, B., "Improving the river crossing capability of an amphibious vehicle. Ocean Engineering," Vol. 38, pp. 2201-2207, 2011.
- [2] Sun, C., Xu, X., Wang, W. and Xu, H., "Influence on Stern Flaps in Resistance Performance of a Caterpillar Track Amphibious Vehicle," IEEE Access, Vol. 8, pp. 123828-123840, 2020.
- [3] Behara, S., Arnold, A., Martin, J. E., Harwood, C. M. and Carrica, P. M., "Experimental and computational study of operation of an amphibious

- craft in calm water. Ocean Engineering,” Vol. 209, 107460, 2020.
- [4] Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. and Raad, P. E., “Proceduce for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD Applications,” ASME J. Fluids Eng., Vol. 130, p. 078001, 2008.
- [5] Yang, K. K., Kim, Y. C., Kim, K. S., Yeon, S. M., “Numerical Analysis on Turning and Yaw Checking Abilities of KCS in Calm Water a Based on Free-Running Simulations,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 59, No. 1, pp. 1-8, 2022.
- [6] Zwart, P. J., Godin, P. G., Penrose, J. and Rhee, S.H., “Simulation of unsteady free-surface flow around a ship hull using a fully coupled multi-phase flow method,” Journal of marine science and technology, Vol. 13, pp. 346, 2008.
- [7] C. Hirt and B. Nicols, “Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries,” Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [8] Kim, Y. I., Yang, H. M, Lee, K. Y. & Choi, Y. S., “Influence of Blade Leading Edge Shape on Hydraulic and Suction Performance of a Mixed-Flow Pump,” Journal of Physics:Conference Series, 2217, 2022.
- [9] Gohil, P. P. & Saini, R. P., “Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant,” Energy, Vol. 93, pp. 613-624, 2015.
- [10] Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H., & Paterson, E., “Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part 1 : Methodology and Procedures,” ASME J. Fluids Eng., Vol. 123, 2001.