

CFD를 이용한 차기 상륙돌격장갑차의 유체역학적 성능 평가

장재영^{*1)} · 김근형¹⁾ · 이종진¹⁾

¹⁾ 한화지상방산 개발센터

Evaluation of Hydrodynamic Performances for New Amphibious Assault Vehicles by Using CFD

Jaeyeong Jang^{*1)} · Keunhyong Kim¹⁾ · Jongjin Lee¹⁾

¹⁾ Defense Research & Development Center, Hanwha Landystems, Korea

(Received 14 July 2017 / Revised 28 November 2017 / Accepted 12 January 2018)

ABSTRACT

The Republic of Korea Marine Corps is planning to develop a new amphibious assault vehicle which is able to operate with higher water speed than current KAAV. In order to achieve a higher water speed for hydrodynamically bluff-body vehicles, it is essential to develop drag reduction strategies. In this paper, resistance characteristics including trim angles of amphibious assault vehicles with several appendage designs are investigated using a commercial CFD code, STAR-CCM+. The computed results are compared with experimental data conducted at the towing tank with 1:4.5 scaled model and show good correlation. Comparing with the results of bare hull, 3.4 % of hydrodynamic drag and 52 % of trim angle are reduced by the application of double angled bow flap and a hydrofoil attached at the transom.

Key Words : Amphibious Assault Vehicle(상륙돌격장갑차), Hydrofoil(수중익), Bow Flap(선수 플랩), Resistance Test(저항 시험), CFD(전산유체역학)

1. 서론

대한민국 해병대가 현재 운용하고 있는 상륙돌격장갑차(KAAV)의 수명주기가 2030년쯤에 도래함에 따라 향후 새롭게 운용할 차기 상륙돌격장갑차(KAAV-II)의 개발이 요구되고 있다. 기존 KAAV가 수상에서 최

고속도 약 13 km/h로 주행하는 것에 반해, 차기 상륙돌격장갑차는 이보다 더 빠른 속도로 운용하도록 목표하는 것으로 예상된다. 상륙돌격장갑차는 수상에서의 운용이 주요 임무이므로 신규 개발 시 축소모형을 이용한 저항시험(resistance test)이나 전산유체역학(이하 CFD, Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 수상에서의 저항을 산출하여 이를 기반으로 개발하는 것이 중요하다. 그러나 K21 보병전투차 및 차륜형 전투차량 등 현재까지 국내에서 개발된 수륙양용장갑차

* Corresponding author, E-mail: jy4903.jang@hanwha.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 수상 최고 속도가 약 10 km/h 이하로서, 강이나 하천을 도하하기 위한 수준에 그쳐 개발 당시에 적용된 선형(hull form)이나 선체 주위의 자유수면 및 유동 특성은 상대적으로 고속영역에서 운용하는 차기 상륙돌격장갑차와는 다를 것으로 예상된다. 이는 저속영역에서 운용하는 장갑차는 수상에서 부력에 의존하여 이동하는 것에 비하여^[1], 차기 상륙돌격장갑차는 수상속도 증가에 따른 급격한 저항 증가를 최소화하기 위한 다양한 부가물의 장착이 필수적으로 요구되며 이에 대한 유체역학적 성능의 정량적인 평가는 매우 중요한 기술적 사항이다. 또한, 차기 상륙돌격장갑차의 최적 선형을 도출하고 이를 실선(full-scale ship)으로 확장하기 위해서는 많은 모형시험이 필요하지만, 이는 현실적으로 많은 시간과 비용이 필요하다.

본 연구에서는 상륙돌격장갑차 기본선형의 CFD 해석을 통해 성능을 예측하고 모형시험 결과와 비교하여 정확도 수준을 확인했다. 그리고 이를 기반으로 부가물을 장착한 선형의 수상성능 예측에 CFD를 활용하고 모형시험을 수행하여 해석 결과를 검증하였다.

2장에는 개념형상과 성능분석 이론에 대한 설명을, 3장에는 기본선형에 대한 저항시험과 CFD해석 결과를 기술하고 4장에는 부가물 최적화를 통한 수상성능 개선을 기술하였다.

2. 개념형상과 성능평가 개요

2.1 개념형상 개요

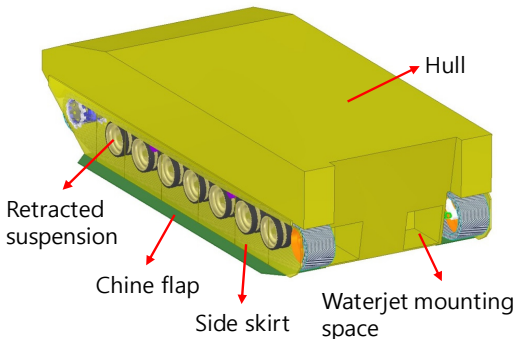


Fig. 1. Schematic overview of an conceptual model

한화지상방산은 자체적인 선행연구를 통해 차기 상륙돌격장갑차의 형상을 Fig. 1과 같이 개념설계 했다.

개념형상은 수상저항을 줄이기 위해 장갑차의 현수장치가 수상에서는 상승된 상태로 운행하는 것을 반영했으며^[2], 상승된 현수장치의 바닥을 막도록 측면플랩(chine flap)을 설치했다. 수륙양용장갑차에서의 측면플랩은 폭을 증가시키는 것과 함께 차체바닥의 거칠기를 개선하는 것으로 알려져 있다^[3]. 현수장치의 측면은 방호용 사이드스커트(side skirt)가 덮여있는 형상이고, 차체의 후방 하단은 수상추진기의 노즐부가 장착되는 구조물 형상을 반영했다.

2.2 저항시험과 CFD해석 기법

2.2.1 저항시험 개요

실선과 모형선의 역학적 상사를 갖기 위해 모형시험에서는 프루드 수(Froude number)를 일치^[4]시켜 수행한다. 이에 따라 실선 속도에 대응하는 모형속도에서 축소모형을 예인하여 측정된 값을 통해 실선의 성능을 예측한다. 저항시험에서 측정된 모형선의 저항은 식 (1)과 같이 모형선의 전체저항계수로 변환할 수 있으며, 이는 국제 선형수조 회의(ITTC, International Towing Tank Conference)에서 제시하는 실선의 저항을 추정하는 실선확장법에 활용된다. 여기서 C_{TM} 은 모형선 전체저항계수, R_{TM} 은 모형선 전체저항, ρ_M 은 모형유체의 밀도, S_M 은 모형선 침수표면적을 나타낸다.

$$C_{TM} = \frac{R_{TM}}{1/2\rho_M V_M^2 S_M} \quad (1)$$

상기 Fig. 1의 개념형상을 예인수조(towing tank)에서 저항시험을 수행하기 위해 FRP(Fiber-Reinforced Plastic) 소재를 이용해 1:4.5 축척의 모형으로 제작했다. 저항시험은 서울대학교 예인수조에서 수행하였으며 예인수조의 크기는 110 m × 8 m × 3.5 m(길이×폭×깊이)이고, carriage의 최고 예인속력은 5.0 m/s 이다.

2.2.2 CFD해석 기법

선체 유동해석은 주로 난류운동의 지배 방정식인 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 기반으로 이동 격자계를 적용하여 선체의 운동을 모사하게 된다. 선체에 작용하는 힘과 모멘트를 계산하여 자유도 운동방정식에 대입하여 운동변위에 대한 저항성능 평가가 가능하게 된다. 본 연구에서는 현재 조선분야에서 널리 사용되는 상용코드인 STAR-CCM+ Ver. 10.02를 사용하여 해석을 진행하였다.

수치해석을 위한 격자계는 STAR-CCM+에서 제공하는 트리머 격자(trimmer)와 경계층 격자(prism layer)를 사용하였다. 생성된 도메인의 전체 격자 수는 100만 ~ 140만개 수준으로 구성했으며 Fig. 2와 같다. 선체 표면은 전단력의 정확한 계산을 위해 경계층 격자와 벽 함수^[5]를 적용하였다.

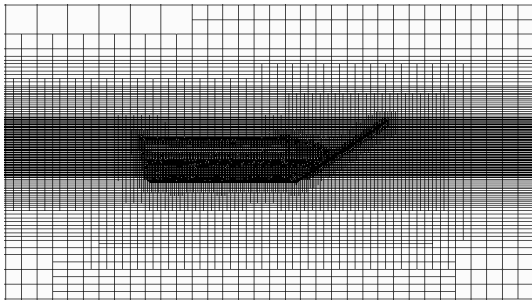


Fig. 2. Numerical grid system

계산 영역의 크기(domain size)는 선체 길이를 L이라고 했을 때 Fig. 3과 같이 선미의 중앙부를 기점으로 선수부 방향으로 2L, 선미부 방향으로 2L, 폭 방향으로 1.5L이다. 바닥 방향은 2L이며, 높이 방향은 1L로 설정했으며 모든 해석 케이스의 도메인 크기는 동일하게 적용하였다.

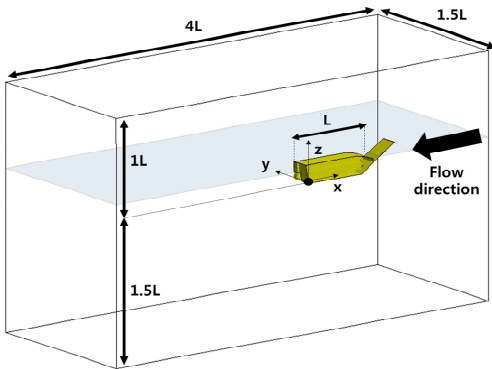


Fig. 3. Size of computational domain

자유수면을 고려하기 위한 다상모델(multiphase model)은 VOF(Volume Of Fluid) 방법을 사용하여 모델링하였다. VOF 함수 Q 는 유체의 체적율로서 $0 \leq Q \leq 1$ 의 범위를 가지고 있으며 $Q = 1$ 의 경우 유체셀, $Q = 0$ 의 경우 기체셀, $0 < Q < 1$ 의 경우 표면셀로 각각 구분하여 자유수면을 추적하게 되고 식 (2)와 같

이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} Q) = 0 \quad (2)$$

선체의 동적 변화를 평가하기 위해 적용된 기법은 DFBI(dynamic fluid body interaction) 기법^[6]이며, DFBI 기법은 선체에 작용하는 힘과 모멘트에 의한 자세 변화에 따라 계산 영역 전체가 이동 및 회전 하는 방법이다. 해석에 사용된 주요 수치기법 및 경계조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Numerical method and conditions

Item	Value	
Time	Implicit Unsteady	
Governing Equation	RANS	
Turbulent Model	Realizable k-ε model All y+ Wall Treatment	
Multiphase Model	Volume of Fluid	
Physical Time	100 s	
Time step	0.02 s	
Boundary Conditions	Velocity Inlet	2.357 ~ 2.750 m/s
	Pressure Outlet	Atmosphere Pressure

3. 기본선형 모델의 수상성능

3.1 기본선형의 구성

기존 KAAV는 수상 주행 시의 해상과고를 극복하고 선수(bow)에 발생하는 선수파를 막기 위해서 차체 전면에 플랩(flap)형태의 판(plate)을 장착한다. 차기 상륙돌격장갑차는 기존 KAAV보다 더 높은 수준의 해상상태(Sea state)에서 운용할 것으로 예상되고, 수상 속도도 더 빠르기 때문에 이러한 선수 플랩의 장착은 필수이다. 따라서 과고와 선수파에도 안정적인 수상주행이 가능하도록 각도 35°로 길게 뻗어 일(一)자 형태의 단일각도를 이루는 선수플랩을 개념형상에 장착하고 이를 초기 성능을 평가하기 위한 기준이 되는 기본선형(bare hull)으로 설정했다. Table 2에 기본선형의 제원을, Fig. 4에 기본선형의 형상을 나타냈다.

Table 2. Dimension of the scale model

Item	Value
Length (L)	1.854 m
Width (W)	0.800 m
Draft (T)	0.345 m
Displacement (Δ)	386 kg

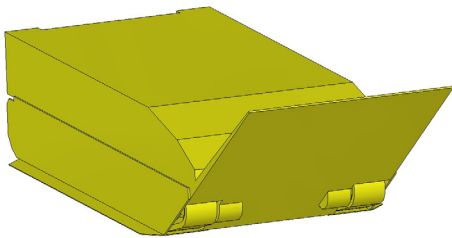


Fig. 4. Bare hull with a straight-type bow flap

3.2 기본선형 저항시험과 CFD해석

본 논문에서는 20 km/h를 기준으로 속도 영역을 설정했으며, 앞서 설정한 격자계 및 해석조건을 검증하기 위해 기본 선형의 CFD해석용 모델링을 구성하여 수상성능 분석을 수행하였다. 저항시험 모형과 CFD해석 모델은 치수와 형상 측면에서 동일하게 구성했다. 실선 속도(ship speed, 이하 Vs) 18~21 km/h에 대응되는 구간에서 기본선형의 CFD해석과 저항시험 결과의 수상저항과 트림 성능을 Fig. 5에 비교했다.

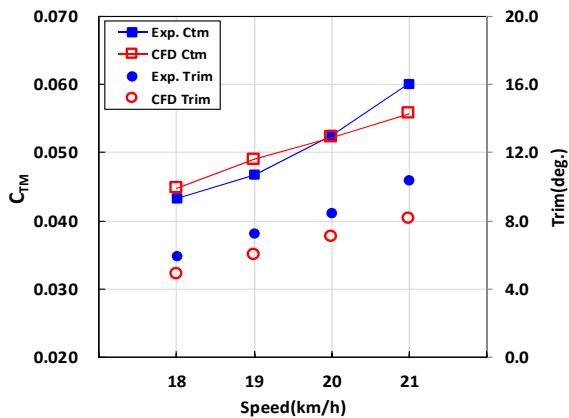


Fig. 5. Comparison of computed total resistance coefficients and trim angles with experimental data for bare hull

저항시험과 CFD해석 결과를 비교해 볼 때 속도에 따라 차이를 보였으나 저항계수의 경우 약 $\pm 5\%$ 오차 수준의 정확도를 보이고 트림 변화의 정성적인 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 단, 트림은 속도가 증가할수록 정량적인 차이가 증가하는 경향을 보이고 있어 향후 추가로 CFD해석을 수행하여 정밀하게 분석할 필요가 있다. 이러한 결과를 근거로, 이후 수행되는 CFD해석에 동일한 수치해석 기법과 격자계를 적용하여 수상성능 평가를 수행하기로 했다.

4. 부가물을 적용한 선형의 수상성능 평가

4.1 부가물의 적용

기본선형의 전반적인 자세와 저항의 개선이 필요할 것으로 판단됨에 따라 모형의 선미부에 부가물(appendage)을 적용하고, 선수플랩의 형상 변경을 시도하여 그 효과를 확인해 보기로 했다.

4.1.1 후방수중익 부가물

차기 상륙돌격장갑차의 개념설계는 저항이 크게 발생하는 box형상이기 때문에 양력을 최대화하고 자세와 저항성능을 개선하기 위한 선미 부가물로서 수중익(hydrofoil)이 적합할 것으로 예상되었다⁷⁾. 수중익 부가물의 효과를 확인하기 위해 기본선형에 수중익을 적용하여 수상성능을 분석하였다. 적용된 수중익 단면은 NACA 0012이며 수중익 단면의 형상과 장착형태를 Fig. 6에 나타내었다.

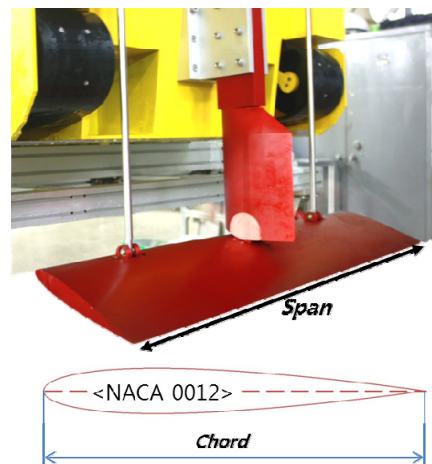


Fig. 6. Hydrofoil system and section profile

수중익의 길이(chord)는 차체의 자세를 조정하기 위한 충분한 양력이 발생할 수 있도록 수선길이의 약 11 %로 선정했으며 폭(span)은 모형의 전폭과 일치시켜 고정인자로 설정했다.

4.1.2 전방 2단형 선수플랩

실제 상륙돌격장갑차의 운용을 고려할 때 기본선형의 1단형 선수플랩은 길이가 길어 안정성 측면에서는 우수하나 전면에서의 저항을 증가시키는 요소로 판단되어 선수플랩 형상 변경에 따른 수상성능 개선을 시도하였다. 이를 위해, 기존의 1개의 각도로 연장되는 형태에서 15-45도의 각도를 가지는 2단형 선수플랩(double angled bow flap)으로 변경했다. 또한 선수 플랩의 양 끝단 모서리를 구부려 저항 감소를 유도했다. Fig. 7에 2단 선수플랩과 수중익을 적용한 모델의 형상을 나타내었다.

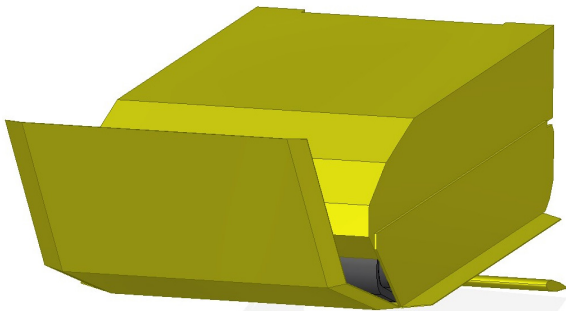


Fig. 7. Model equipped with double angled bow flap and hydrofoil

4.2 CFD해석을 이용한 부가물 성능 평가

기본선형에 후방 수중익을 적용한 모델(이하 CASE 1)과 2단형 선수플랩에 후방 수중익을 적용한 모델(이하 CASE 2)의 수상성능을 기본선형의 CFD해석 결과를 기준으로 하여 평가했다. 기준속도 20 km/h에서 수중익의 받음각(angle of attack) 7,11,15도 3종에 대해 CFD해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8(a)에서 CASE 1과 2의 수중익 적용으로 인한 전체저항계수의 정량적 비교를 위해 기본선형의 침수 표면적을 이용하여 무차원화 하였다. 받음각 7도 11도에서 2단형 선수플랩을 적용한 모델이 기본선형과 1차형 선수플랩을 적용한 모델보다 현저한 저항개선 효과를 나타내고 있으며 받음각이 커질수록 저항이 증가하는 경향은 CASE 1과 2에서 동일하게 나타났다.

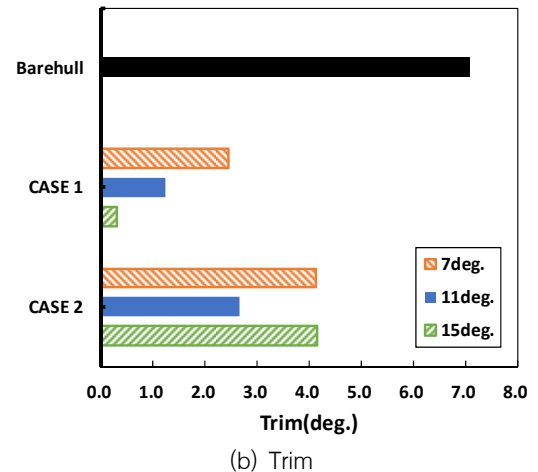
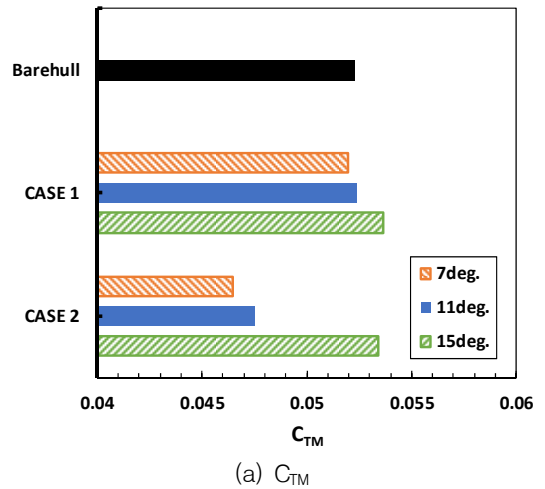
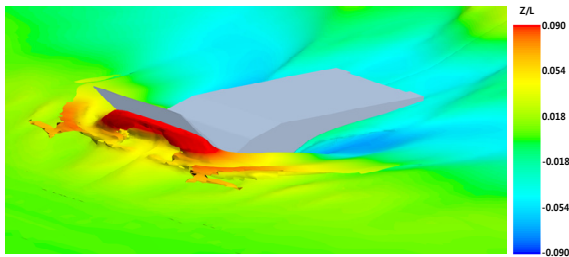


Fig. 8. Comparison of computed total resistance coefficients and trim angles for different types of model at Vs = 20 km/h

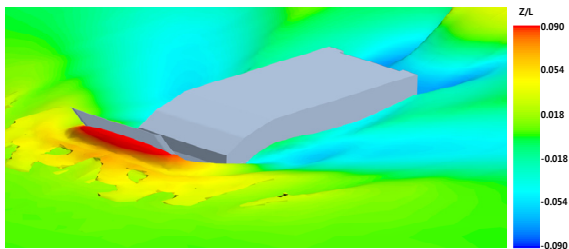
Fig. 8(b)의 트림계산 결과에서 확인할 수 있듯이 수중익을 적용한 모델이 기본선형보다 차체 자세가 개선되었음을 확인할 수 있다. 그리고 모든 받음각에서 2단형의 선수플랩의 트림이 기본선형의 1차형 선수플랩의 경우보다 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 2단형 선수플랩이 1차형보다 선수 전면에서 차체를 부양시키는 힘이 더 크게 발생하기 때문으로 생각된다.

저항과 차체 자세의 종합적인 개선을 고려할 때, 기본 선형에 수중익을 적용한 선형이 수상성능에 더 유리하며 차체의 전방에서 선수파와 파고를 막아주는 플랩은 1차형 보다 2단형이 더 유리한 것으로 확인되

었다. CFD해석을 수행한 선형 중에서는 CASE 2의 받음각 11도가 가장 적절한 것으로 판단되는데, CASE 2의 받음각 7도의 경우 저항개선은 더 유리하지만 트림이 커지므로 실제 장비에서 탑승자의 승차감이나 해상 안정성 측면에서는 불리할 것으로 예상된다. 선체유동 측면에서 분석하고자 기본선형과 CASE 2의 받음각 11도에 대해서 선체와 선체 주변 자유수면의 높이(wave elevation) 차이(Z)를 선체 길이(L)와의 비율로 Fig. 9와 같이 비교했다. Fig. 9(a)의 기본선형은 선수부에 높은 wave가 형성되어 선수부가 상승하도록 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 선측부의 유동 접촉 면적은 선미로 갈수록 트림의 영향으로 인해 증가되며 이는 표면의 저항요소로 작용하는 것으로 판단된다. Fig. 9(b)의 CASE 2 받음각 11도 선형은 상대적으로 선수에서 낮은 wave가 형성되고, 수중익에 의한 트림 증가 억제 영향으로 선측부의 유동접촉 면적이 비교적 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Barehull



(b) Case 2

Fig. 9. Computed wave elevations around the vehicle at $V_s = 20\text{km/h}$

4.3 저항시험을 통한 부가물 성능 평가

CFD해석 결과에서 선정된 CASE 2의 받음각 11도를 적용한 선형과 기본선형에 대하여 기준 속도를 포함한 속도 영역에서 저항시험을 수행한 결과를 Fig.

10에 함께 비교했다. 저항계수는 Fig. 8의 경우와 같이 기본선형의 침수표면적을 이용하여 계산하였으며, 기준속도에서 측정된 저항은 기본선형 대비 약 3.4% 감소한 수준이었다. 기준속도 보다 낮은 속도 영역에서는 기본선형의 저항이 유리했으나 기준속도를 포함한 그 이상의 속도 영역에서 CASE 2의 저항 성능이 유리한 것으로 확인되었다. 한편, 앞서 수행한 2단형 선수플랩과 수중익을 함께 적용한 모델의 CFD해석 결과는 저항시험 결과의 약 93.4%의 수준에 근접했다.

CASE 2 선형의 트림 계측 결과는 모든 시험 속도 영역에 걸쳐 기본선형 대비 약 50% 수준으로 감소하여 안정적인 자세를 취하고 있다. Fig. 8의 CFD 해석 결과와 함께 고려할 때, 수중익 적용을 통해 차체 자세를 효율적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다.

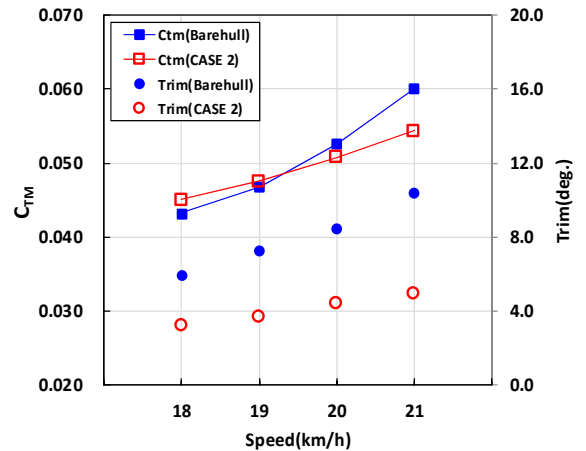


Fig. 10. Effect of hydrofoil and double angled bow flap on the total resistance coefficient and trim angle

저항시험 결과를 분석해보면, 선미부의 수중익 자체의 항력 증가보다는 수중익 양력 발생에 의한 차체 자세 개선에 따른 장갑차 전체 저항의 감소가 더 효과적임을 알 수 있다. 또한, 본 논문에서는 저항시험의 결과만을 언급하였으나 워터젯을 이용한 자항시험 (self-propulsion test)에서는 물 분사에 의한 수중익과 차체와의 긍정적인 상호작용이 발생하여 수중익의 효과를 더욱 증대시킬 수 있을 것^[8]으로 기대된다.

Fig. 11에 축소모형의 저항시험 모습과 자유수면에서의 CFD모델의 모습을 비교하여 CFD로 실제 현상과 가깝게 모사할 수 있음을 확인할 수 있다.

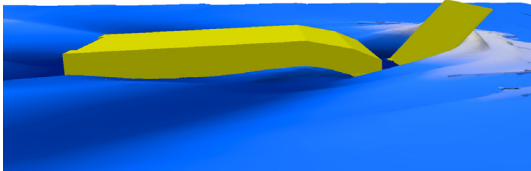
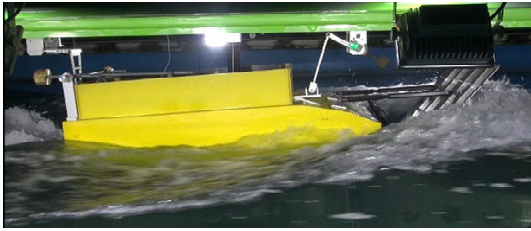


Fig. 11. Comparison of wave profiles around the vehicle at $V_s = 20$ km/h(Top: Experiment, Bottom: CFD)

5. 결론

육상 기동성을 반영한 장갑차의 형상은 box형태로 정형화되어 있기 때문에 수상용 부가물 적용을 통한 성능 개선이 선형설계의 주요 방안이 될 것으로 예상된다. 이러한 부가물 성능 평가를 위한 저항시험을 수행하기 전에 CFD해석으로 다양한 설계인자를 평가하고 효율적인 성능의 비교 우위를 판단할 수 있다. 저항시험 결과에 대한 CFD해석의 수상저항 정확도가 기준 속도에서 90 % 이상의 수준을 보여, 차기 상륙돌격장갑차의 초기 연구단계에서 CFD해석의 유용성은 충분한 것으로 판단된다. 단, 수상저항 예측에 비해 트림 등의 차체 자세의 정량적인 정확도가 감소하고 고속영역으로 갈수록 전체저항계수가 저항시험결과 대비 오차가 증가하는 부분에 대해서는 향후 해석모델과 해석 조건의 보완이 필요하다.

끝으로, 본 연구에서 평가된 선미부의 수중익 부가물과 2단형 선수플랩의 효과는 향후 차기 상륙돌격장

갑차의 선형 설계에서 중요한 가이드가 될 것으로 예상된다.

References

- [1] Y. S. Choi, "A Study on a New Flotation System for Amphibious Operation of a Armored Combat Vehicle," *Defense & Technology*, pp. 58-60, 2003.
- [2] P. W. Brown and W. E. Klosinski, "Experiments with Track Ventilation for Amphibious Tracked Vehicles and With Track Covers And Retraction," *Technical Report SIT-DL-81-9-2208*, 1981.
- [3] J. G. Hoyt III, B. D. Abramson and D. D. Hayden, "Correlation of the USMC High Speed Technology Demonstrator and Propulsion System Demonstrator," *Proc. of 23th America Towing Tank Conference*, 391, 1992.
- [4] The Society of Naval Architects of Korea, "Ship Resistance and Propulsion," *Jisungsa, Korea*, pp. 102 -104, 2009.
- [5] J. K. Choi and H. T. Kim, "A Study of Using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 47, No. 5, pp. 647-655, 2010.
- [6] STAR-CCM+ V10, User's guide, SIEMENS, 2016.
- [7] J. P. Hackett, J. C. St. Pierre, C. Bigler, T. J. Peltzer, F. Quadvlieg, F. and Van Walree, "Computational Prediction vs. Model Testing for a High Speed Vessel with Lifting Bodies," *Proc. of SNAME Annual Meeting*, Nov, 2007.
- [8] R. J. Walling and R. Datla, "Hydrodynamic Development of a Jet-Assisted Hydrofoil Craft," *The Fourth of Chesapeake Power Boat Symposium*, June, 2014.