

상륙돌격장갑차의 수상항주 시 트림조절을 위한 수중익에 의한 저항 및 자세변화에 대한 실험적 연구

이승재^{1,†} · 이태일² · 이종진³ · 남원기³ · 서정천^{1,2}
서울대학교 해양시스템공학연구소¹
서울대학교 조선해양공학과²
한화테크윈(주) R&D센터³

Experimental Study on Resistance and Running Attitude of an Amphibious Assault Vehicle with a Hydrofoil as a Trim-control Device

Seung-Jae Lee^{1,†} · Tae-il Lee² · Jong-Jin Lee³ · Wonki Nam³ · Jung-Chun Suh^{1,2}
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²
R&D Center, Hanwha Techwin Co.,Ltd.³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Amphibious assault vehicles have been used in the Marine Corps. In recent years, their ability to move faster is becoming one of the most important considerations. At high speeds, the vehicle tends to sink at the stern and sometimes the opposite occurs. Such dynamic trim plays a significant role in determining the vehicle's hydrodynamic performance. Furthermore, an excessive trim by stern upsets the viewing angle. We have thus considered a stern hydrofoil to reduce the dynamic trim of the amphibious assault vehicle. Laboratory-scale resistance tests were conducted in a towing tank at the Seoul National University (SNU). This study aims to make a preliminary assessment of the hydrodynamic performance of the vehicle with the stern hydrofoil and to investigate permissible speed range of the vehicle. The experimental results show that the stern hydrofoil can successfully achieve a reduction of both the dynamic trim and the hydrodynamic resistance at running speeds above 20 km/h.

Keywords : Amphibious assault vehicle(상륙돌격장갑차), Resistance(선체저항), Dynamic trim(동적트림), Hydrofoil(수중익)

1. 서론

한국형 상륙돌격장갑차 (KAAV, Korean Amphibious Assault Vehicle)는 상륙작전을 펼치는 해병대의 대표적인 무기체계 중 하나이다. 대한민국 해병대는 1974년 처음으로 상륙돌격장갑차의 원형으로 불리는 LVT(Landing Vehicle Tracked)를 도입하였으며 1998년부터 KAAV를 도입하여 운용하고 있다. KAAV는 선박형태 디자인과 워터젯 사용으로 수상에서 최고 속도 13.2 km/h로 이동할 수 있는 기동성을 갖추고 있다. 하지만, KAAV의 수명주기와 미래 전장 환경 변화에 대비한 한국형 차기 상륙돌격장갑차의 개발이 제기되고 있다. 최근 개발되는 상륙돌격장갑차는 보다 빠른 기동성을 요구하고 있으며, 해양 기반 공격에 대한 핵심 전력으로 개발이 시작된 미국 차세대 상륙장갑차인 EFV

(Expeditionary Fighting Vehicle)는 기동성에 대한 이러한 요구가 잘 반영된 것이다. EFV는 수상/지상 모드변화가 가능하며 차체 하부를 평판으로 설계하여 모터보트처럼 활주가 가능하도록 설계되었다. EFV는 활주형 차체를 채용하기 때문에 해수에 의한 조파저항을 크게 줄일 수 있으며, 현재 운용하고 있는 상륙장갑차들과 비교하여 월등한 기동성을 갖추고 있다. EFV의 수상 최대속도는 47 km/h로 알려져 있다. 하지만, EFV는 월등한 기동성을 확보하기 위해 발생하는 과도한 제작 및 유지비용으로 인해 개발이 2011년에 공식적으로 중단되었다 (Feickert, 2011).

본 연구는 한국형 차기 상륙돌격장갑차 개발에 대한 타당성 연구의 일환으로 시작되었다. 차기 상륙돌격장갑차의 차체는 기본적으로 EFV와 유사한 형태를 갖추고 있으나 상대적으로 낮은 속도에서 운용하는 것을 목표로 하고 있다. EFV의 경우에는 속도가 증가함에 따라 선체가 양력을 받아 부상하여 활주하게 되지

만, 본 연구의 대상인 차기 상륙돌격장갑차는 수상속도가 그리 빠르지 않음으로 인하여 선체가 완전히 부상하지 않는다. 특히, 사전 연구를 통하여 한국형 차기 상륙돌격장갑차에서는 과도한 동적트림(dynamic trim)이 발생함을 확인하였다. 과도한 동적트림은 유체역학적 저항성능뿐만 아니라 항주 중 시야 확보에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구는 선체저항 증가를 최소화하면서 항주 중에 발생하는 선체트림을 줄이는 것을 목표로 한다.

동적트림을 조절하는 장치로써 trim tabs, interceptors, stern wedges를 고속선에서 사용하지만 (Faltinsen, 2005), 이들은 차기 상륙돌격장갑차의 선미를 들어올리기에는 양력이 부족할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 상륙돌격장갑차의 선미트림을 줄이기 위해 수중익(hydrofoil) 적용을 고려하였다. 트림조절장치로써의 수중익은 수중익선에서 사용되는 것과 동일하게 수중익에서 발생하는 유체력을 이용한다. Hyun, et al. (2000)은 자유수면 아래에서 정속으로 움직이는 수중익에 대한 실험적 연구를 회류수조에서 수행한 바 있으며, Park, et al. (1998)은 수중익의 잠긴 깊이에 따른 양향력의 특성 변화를 수치적으로 연구한 바 있다. 또한, Na and Lee (1997)은 수중익 쌍동선에 대한 연구를 수치해석 및 모형시험에 의해 수행하였으며, 그들은 수중익의 형태와 각도에 따른 항주자세와 저항성능의 변화를 고찰하였다. Choi and Kim (2009)는 인력 수중익선의 안정성에 대한 연구를 수행한 바 있다. Matveev and Duncan (2005)은 수중익 선에서 수중익을 설계하기 위한 방법을 제안하였다. 하지만 대부분의 연구에서 수중익은 선체트림을 조절하기 위한 장치가 아니라 선체를 완전히 부상시키기 위한 장치로 사용된다.

본 연구에서는 수중익을 트림조절장치로써 사용하며, 수중익 설치가 선체저항과 동적트림에 미치는 효과에 대해 고찰하고자 한다. 본 논문은 다음과 같이 간단히 구성된다. 2장에서 상륙돌격장갑차의 모형과 시험 장치를 소개하고, 3장에서 선미 수중익 적용에 따른 선체저항과 동적트림의 변화에 대한 모형 시험 결과를 보여준다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결과를 정리한다.

2. 시험 장치 및 모형

한국형 차기 상륙돌격장갑차에 대한 저항시험(resistance test)은 서울대학교 예인수조(towing tank)에서 수행되었다. 예인수조의 크기는 110 × 8 × 3.5 m이며, 예인전차의 최고 속력은 5.0 m/s 이다. 시험모형은 FRP(Fiber-Reinforced Plastic)로 제작되었으며, 축척비 1/4.5인 모형선의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이, 모형선에는 실선에 근사하도록 궤도가 설치되었으며, 궤도에 의한 저항을 줄이기 위해서 궤도의 측면과 아래면은 덮개로 닫히게 되도록 구성되었다 (Kilgore, 1969). 저항 시험에서의 예인점은 길이방향으로 부력중심에 위치하며, 예인점 높이는 임펠러의 회전축 높이와 일치한다.

Table 1 Principle dimensions of the test model

items	symbol	unit	value
Length	L	m	1.854
Breadth	B	m	0.787
Draft	T	m	0.345
Displacement	Δ	ton	0.386

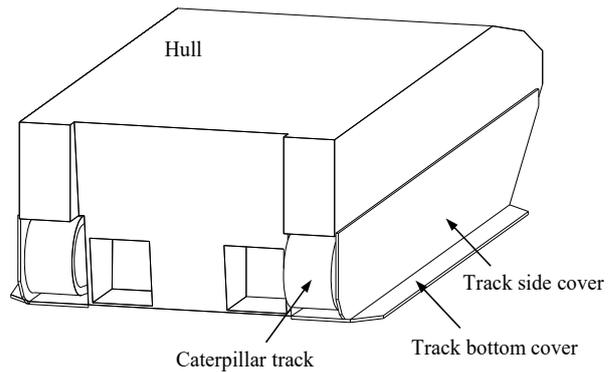


Fig. 1 Schematic overview of an experimental model

2.1 선수 파도막이

파도막이(bow plate)가 설치되지 않을 경우에는 모형선 선수가 수면 아래로 잠기게 되는 것을 사전 모형시험을 통해 확인하였으며, 본 연구에서는 선수 침하 및 선수에서 발생한 파도가 선체로 들어오는 것을 방지하기 위하여 Fig. 2와 같이 선체를 확장한 형태의 파도막이를 선수에 설치하였다. 설치된 파도막이의 각도는 모형선 선수 각도(35°)와 동일하며, 파도막이의 길이는 700 mm 이다. 본 연구에서는 단순한 형태의 파도막이를 사용하였으나, 파도막이를 포함한 선수 형상은 유체역학적 성능에 크게 영향을 미치게 되므로 추가적인 연구가 필수적이다.

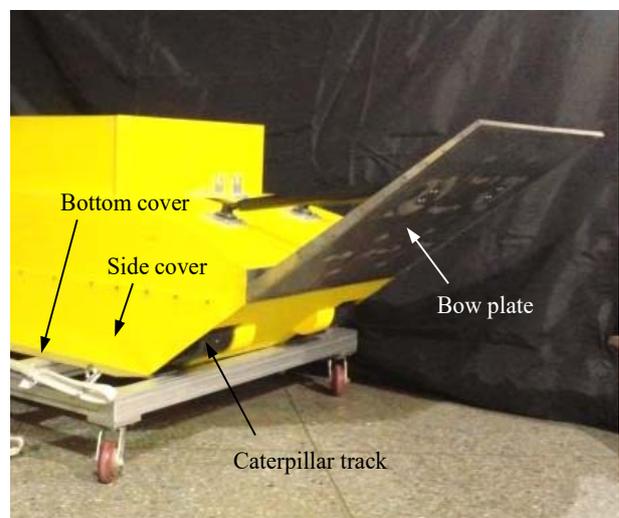


Fig. 2 Test model equipped with a bow plate

2.2 선미 수중익

Fig. 3과 같이, 수중익은 시험모형의 선미 종양에 단일 스트럿 (supporting strut)에 의해 지지된다. 스트럿 좌우에는 수중익의 각도조절장치(angle adjuster)가 설치된다. 수중익의 폭(span)은 약 790 mm 로서 선체 폭과 동일하다.

수중익의 적당한 코드길이(chord length)와 설치각도는 다음과 같은 방법으로 근사할 수 있다. 모형선을 직육면체로 가정하면 MCT 1cm (Moment to change trim one centimeter)는 아래 식과 같이 구할 수 있다 (Kemp & Young, 2001).

$$MCT\ 1\ cm = \frac{W \times GM_L}{100 \times L} \cong \frac{W \times BM_L}{100 \times L} \cong \frac{8.3 \times TPC^2}{B}$$

여기서, TPC(Tonnes per Centimeter)는 $TPC = \rho WPA / 100$ 이다. 시험모형의 수선면적(WPA, water plane area)은 약 1.4 m²이며, MCT 는 약 2.07 이다. 따라서, 선체 트림각(θ)를 보정하기 위해 필요한 수중익 양력은 $F_{L,req.} = 2 \times 981 \times MCT \times \tan\theta$ 이다. 수중익이 설치되지 않은 시험모형에 대한 저항시험 결과에 따르면 요구양력은 약 607 N 이다. 결과적으로 NACA 0012 단면을 기준으로 수중익의 코드길이를 220 mm로 선정하였다. 수중익의 코드길이가 과도하게 길어지는 것을 피하기 위해 수중익 각도 10°를 기준으로 수중익의 코드길이를 결정하였다.

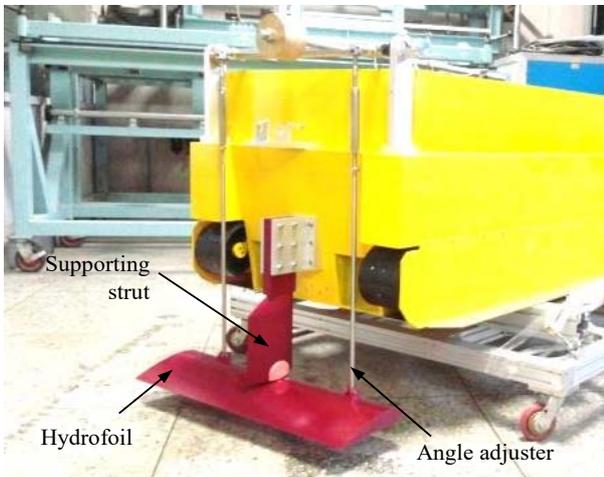


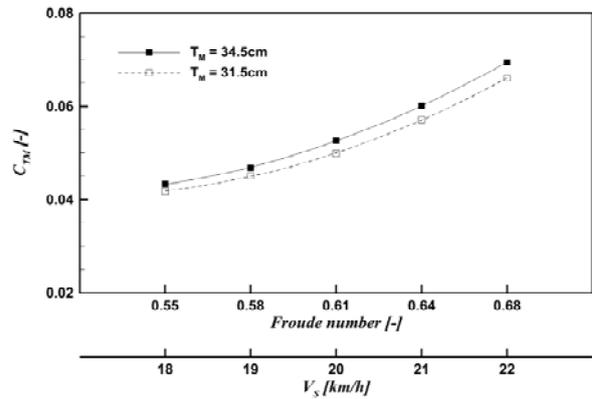
Fig. 3 Test model equipped with a hydrofoil

3. 모형시험 결과

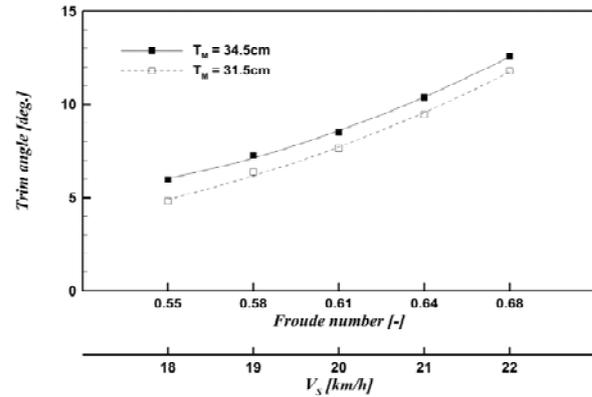
모형시험은 실선 속도를 기준으로 18, 19, 20, 21, 22 km/h 에 대응하는 2.36, 2.49, 2.62, 2.75, 2.88 m/s에서 수행되었으며, 이러한 속도는 0.55에서 0.68의 Froude 수 영역에 해당한다.

3.1 선미 수중익 미적용

Fig. 4는 선미 수중익이 부착되지 않은 시험모형에 대해 수행



(a) total resistance coefficient, C_{TM}



(b) trim angle

Fig. 4 Total resistance coefficient and trim angle of the test model without the stern hydrofoil



(a) T_M = 34.5 cm



(b) T_M = 31.5 cm

Fig. 5 Photographs taken during experiments of the test model without the stern hydrofoil at V_s = 20 km/h

한 모형시험 결과를 보여준다. 모형선의 전체 저항계수(CTM)와 선체 트림각(trim angle)은 선속이 증가함에 따라 모두 증가하며, Vs = 20 km/h에서 선체 트림각은 8.5°이다. 큰 입사각으로 인하여 Fig. 5와 같이 선수에서 쇠파(wave breaking)가 발생하였다. 흡수 감소는 선체저항 및 트림각 감소에 효과가 있으나, 흡수 변화에 따른 괄목할 만한 선체 주위 유동 변화는 관찰되지 않았다. Vs = 20 km/h에서 시험모형의 잉여저항은 전체저항의 93% 이상을 차지하며(저항 성분별 비율은 Table 2 참조), Fig. 6에서 보이는 바와 같이 계측된 전체저항과 트림각 간의 관계가 매우 선형적이다. 이러한 결과들은 흡수 차이가 마찰저항의 증가/감소에 직접적으로 영향을 미치지 보다는 트림각 변화량에 영향을 주는 것으로 해석될 수 있다. 결과적으로, 선체 트림각의 감소는 선체 저항 감소로 이어진다.

Table 2 Percentage of resistance coefficients

T_M	C_{RS}	C_{FS}	C_A	C_{AA}	C_{TS}
31.5 cm	93.2	3.5	3.2	0.1	100
34.5 cm	93.5	3.4	3.1	0.1	100

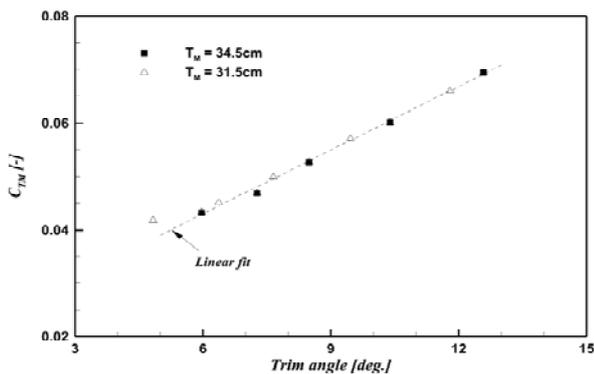


Fig. 6 Relationship between total resistance coefficient and trim angle for the test model without the stern hydrofoil

3.2 선미 수중익 적용

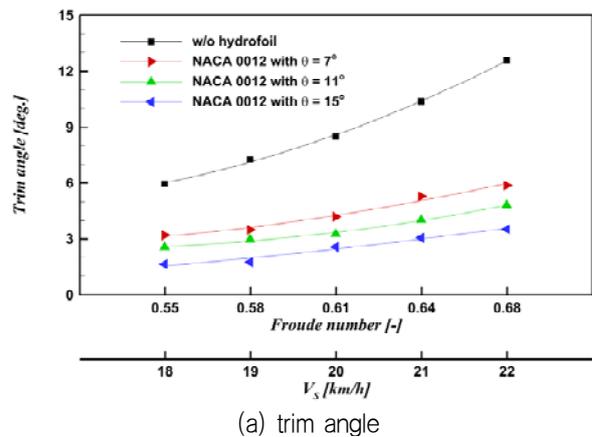
선미 수중익 적용에 앞서, 길이 200 mm의 선미판(stern plate)을 적용하여 모형시험을 수행하였으나 선체 트림각 및 저항성능에 효과적이지 못하였다. 선미판의 각도가 6°인 경우에 선체 트림각은 약 2° 감소하였으나 선체저항은 3% 이상 증가하였다. 이는 활주형 선형과 다르게 높은 선미 흡수(Fig. 7 참고)로 인하여 선미 유동을 정류시키지 못했기 때문이라고 생각된다.

선체 트림각을 줄이기 위하여 선미 수중익을 적용하였으며, 이때 시험모형의 흡수는 선미 수중익 설치 유무와 상관없이 동일하게 맞추었다. Fig. 8(a)는 선미에 설치한 NACA 0012 수중익이 선체 트림각 감소에 효과적임을 보여준다. Vs = 20 km/h를 기준으로 수중익 각도 7°, 11°, 15°에서 선체 트림각은 각각 4.2°, 3.3°, 2.6°로 계측되었으며, 수중익 각도가 증가함에 따라 선체 트림각은 선형적으로 감소하였다. 하지만, 선체저항 관점에서 수

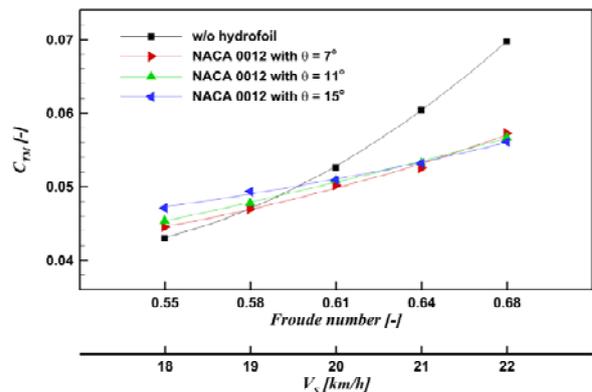
중익의 효과는 다소 복잡해진다. Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이, 저속구간에서는 수중익이 설치된 경우에 모형선의 전체 저항이 증가하는 반면 고속구간에서는 전체 저항이 감소하였다. 이는 수중익 자체의 저항에 의한 것으로 판단된다 (Lee, et al. 2017). 다시 말해서, 저속구간에서는 선체 트림각 감소에 의한 저항 감소량이 수중익에 의한 저항 증가량보다 작기 때문에 계측된 모형선의 전체 저항은 증가된다. 반면, 고속구간에서는 선체의 트림각 감소에 의한 저항 감소량이 수중익에 의한 저항 증가량보다 크기 때문에 계측된 선체저항은 감소하게 되는 것으로 생각된다.



Fig. 7 Photograph taken during resistance test at Vs = 20 km/h



(a) trim angle

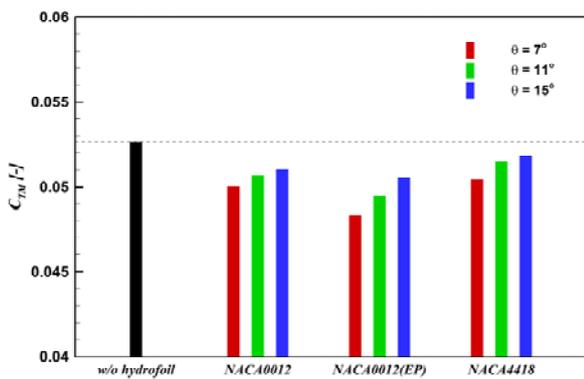


(b) total resistance coefficient, C_{TM}

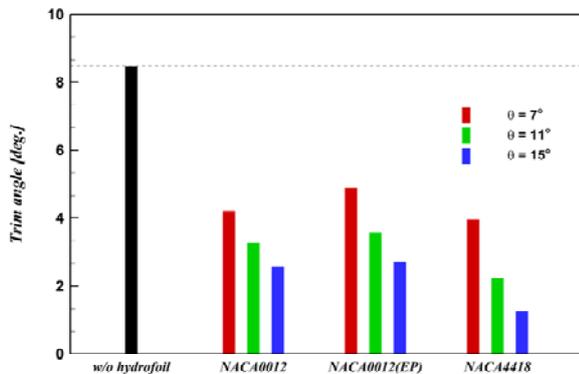
Fig. 8 Trim angle and total resistance coefficient of the test model with the NACA 0012 hydrofoil. Note that the figures were reprinted from Lee, et al. (2017)



Fig. 9 Different types of hydrofoils



(a) total resistance coefficient, C_{TM}



(b) trim angle

Fig. 10 Total resistance coefficient and trim angle of the test model with different hydrofoils at $V_s = 20$ km/h

또한, 본 연구에서는 end-plate가 부착된 NACA 0012 수중익과 NACA 0012 수중익에 비해 양항력비가 상대적으로 높은 NACA 4418 수중익에 대한 모형시험을 수행하였다. 11° 를 기준으로 NACA 4418 수중익은 NACA 0012 수중익에 비해 양항력비가 약 30% 높다. Fig. 9은 시험에 사용된 수중익의 모습이다. 모형시험은 $V_s = 20$ km/h 에서 수행되었으며, Fig. 10은 수중익에 따른 모형시험 결과이다. 시험된 세 가지의 수중익 중에서, end-plate가 부착된 NACA 0012 수중익은 선체저항 관점에서 성능이 가장 우수하였으나 선체 트림각 관점에서는 NACA 4418

수중익이 효과가 가장 뛰어났다. 수중익에서 양력이 크게 발생할 경우 선체 트림각은 감소하게 되지만, 양력 발생에 대응하는 수중익 항력 증가로 인해 저항의 감소량은 오히려 줄어들었다. 이러한 경향은 각각의 수중익에서 각도 증가에 따른 선체저항 및 트림각 감소량에서도 동일하게 나타났다. 결과적으로, 모형시험 결과는 선미 수중익만으로 선체저항과 트림각을 동시에 개선하는 것에 한계가 있음을 보여준다.

3.3 초기트림의 영향

선체저항과 트림각에 대한 추가적인 개선 방향을 도출하기 위하여, NACA 0012 수중익(설치각도 11°)를 부착한 모형선을 기준으로 초기트림(initial trim)의 효과에 대한 모형시험을 $V_s = 20$ km/h 에서 수행하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이, -5° 의 초기트림의 경우에는 최종적인 선체 트림각은 0.3° 이며 초기트림이 없는 경우의 트림각 3.3° 에 비해 크게 개선되었다. 주목할 점은 선체 트림각이 낮아짐에 따라 선체저항이 초기트림이 0° 인 모형선 대비 약 7% 감소되었다는 것이다. 이는 차기 상륙돌격장갑차의 중량 배치의 최적화를 통하여 추가적인 선체저항 감소가 가능하다는 것을 의미한다.



(a) initial trim of 0°



(b) initial trim of -5°

Fig. 11 Experiments of the test model with different initial trims

4. 결론

본 연구는 한국형 차기 상륙돌격장갑차 개발의 타당성 연구의 일환으로 수행되었으며, 연구의 주된 목적은 선체저항 증기를 최소화하면서 선체트림을 감소시키는 방안을 도출하는 것이었다. 본 연구에서는 선체트림 감소를 위한 방안으로 선미 수중익의 설치를 제안하였으며, 선미 수중익을 이용하여 선체트림을 크게 감소시킬 수 있음을 모형시험을 통해 확인하였다. 주목할 점은 트

림조절장치로서 수중익을 활용할 경우에는 수중익의 양력뿐만 아니라 항력 관점에서도 충분히 고려되어 한다는 것이다. 결과적으로, 본 연구에서 수행한 모형시험 결과는 선체저항의 증가 없이 수중익을 이용하여 선체트림을 개선하기 위해서는 선속이 실선기준으로 20 km/h 이상 되어야 한다는 것을 보여준다.

본 연구에서는 단순한 형태의 선수 파도막이를 적용하여 트림 각과 저항과의 관계를 고찰하였으나, 선수 형상은 유체역학적 성능에 크게 영향을 미치게 되기 때문에 파도막이 형상 및 설치 각도에 대한 면밀한 고찰이 필요하다.

후 기

본 연구는 한화테크윈(주)의 지원으로 수행되었으며, 많은 지원에 감사드립니다. 또한, 모형시험 수행에 많은 도움을 주신 서울대학교 유극상 님과 김창희 님께 감사드립니다.

References

Choi, J.K. & Kim, H.T., 2009. Evaluation of longitudinal static stability of human powered hydrofoil boat. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(4), pp.391-397.

Faltinsen, O.M., 2005. *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press: New York.

Feickert, A., 2013. *Marine corps amphibious combat vehicle (ACV) and marine personnel carrier (MPC): background and issues for congress*. Congressional research service report No. R42723. Congressional Research Service: Washington, DC.

Hyun, B.S. Choi, K.S. & Doh, D.H., 2000. Quantitative measurements of complex flow field around a hydrofoil using particle image velocimetry. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(3), pp.37-44.

Kemp, J. & Young, P., 2001. *Ship stability: notes & examples*. Butterworth-Heinemann: Oxford.

Kilgore, U., 1969. *Hydrodynamic aspects of tracked*

amphibians, Technical report no.020. The University of Michigan: Michigan.

Lee, S.J. Lee, T.I. Lee, J.J. Nam, W. & Suh, J.C., 2017. Hydrodynamic characteristics of a hydrofoil-assisted amphibious vehicle. *Journal of Ship Research*, 61(1), pp.15-22.

Matveev, K. & Duncan, R., 2005. Development of the tool for predicting hydrofoil system performance and simulating motion of hydrofoil-assisted boats. *High Speed and High Performance Ship and Craft Symposium, Everett/WA:ASNE, USA, July 19-20 2005*.

Na, Y.I. & Lee, Y.G., 1997. Analysis of the flow field around a hydrofoil catamaran by using model experiment and numerical analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(4), pp.61-71.

Park, I.R. Chun, H.H. Kim, S.H. & Ha, D.D., 1998. Analysis of three-dimensional water waves created by a hydrofoil using a higher-order boundary element method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 35(3), pp.1-13.

