

워터젯 추진 고속선의 부가물이 침로안정성에 미치는 영향

박한솔¹·김동진^{2,†}·이성균²·박종용²·이기표²
(주)삼성중공업 조선해양연구소¹
서울대학교 조선해양공학과²

The Effect of Appendages of a Water-Jet Propelled High Speed Vessel on the Course Keeping Ability

Han-Sol Park¹·Dong-Jin Kim^{2,†}·Sung-Kyun Lee²·Jong-Yong Park²·Key-Pyo Rhee²
Samsung Heavy Industry Co. Ltd., Marine Research Institute¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University²

Abstract

It has been often reported that a water-jet propelled high speed vessel lost the course keeping ability in seaway. In this study, model tests of a high speed vessel were performed to measure the running attitude and to check the course keeping ability. The model ship may lose the course keeping ability due to bad running attitudes such as bow drop. So model tests were carried out to improve the running attitude by changing the position of longitudinal center of gravity and using appendages at the bow and the stern of a model. The position of lateral center of pressure moved toward stern and the course keeping ability was improved by modifying the transom wedge angle.

Keywords : Water-jet propelled high speed vessel(워터젯 추진 고속선), Course keeping ability(침로안정성), Running attitude(항주 자세), Appendage(부가물)

1. 서론

고속선은 일반 배수량형 선박에 비해 항주 속도에 따라 침수표면적과 수면아래 선체 형상, 그리고 선체에 작용하는 동압력이 크게 변화한다. 이는 고속선의 침로안정성에 큰 영향을 미친다.

한편 워터젯 추진기는 고속에서 효율성이 높고 진동 및 소음 억제에 유리하며 조종성능이 우수하기 때문에 최근에 고속선에 많이 장착되는 추세이다. 워터젯 추진선의 경우 프로펠러 축, 타와 같은 구조물들이 없기 때문에 저항 감소에도 유리하다. 그러나 선미가 거의 평판에 가까운 형상을 가지고 있으므로 일반적으로 침로안정성이 좋지 않다.

고속선의 수평면 및 수직면 불안정성에 대한 연구는 Cohen and Blount (1986)에 의해 이루어졌으며, Jensen and Latorre (1992)는 stern wedge가 고속선의 자세 및 소요동력에 미치는 영향을 이론 및 실험적 방법으로 연구하였다. Park, et al. (2004)와 Heo and Lee (2004)는 각각 sprary strip과 stern flap의 형상이 저항에 미치는 영향을 연구하였다. Yasukawa, et al. (2006)에 의해 워터젯 추진 고속선의 조종성 및 침로안정성이 연구된 바 있다.

그리고 최근에 Lee, et al. (2010)는 round bilge를 가진 고속 반활 주선의 저항, 조종성능 추정 및 부가물 설계 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 워터젯 추진 고속선을 대상으로 침로안정성 판별을 위한 시험을 수행하였다. 먼저 Froude 수에 대한 고속선의 항주 자세를 계측하고 계측된 항주 자세로 모형선을 구속한 후 미소 사향각에 대한 사향시험을 수행하였다. 그리고 침로안정성을 저해하는 요인을 규명하고 침로안정성을 높이기 위한 방법들을 적용한 개선 시험을 수행하여 그 효과를 분석하였다.

2. 침로안정성 판별식

본 연구에서는 먼저 대상 고속선의 수평면 3자유도 운동에 대한 조종운동방정식을 구성하였으며 사용된 좌표계는 Fig. 1과 같이 지구고정 좌표계 $O-x_0y_0$ 와 물체고정 좌표계 $G-xy$ 로 구성된다. 물체고정 좌표계는 대상선의 무게 중심을 원점으로 하며 편류 각 β 는 전진할 때 선수 좌현으로 들어오는 편류가 발생할 경우, 즉 횡속도 $-v$ 가 발생할 경우를 양으로 정의한다.

선박의 좌우 대칭을 가정할 때 선형화 된 수평면 운동방정식은 식 (1)과 같다.

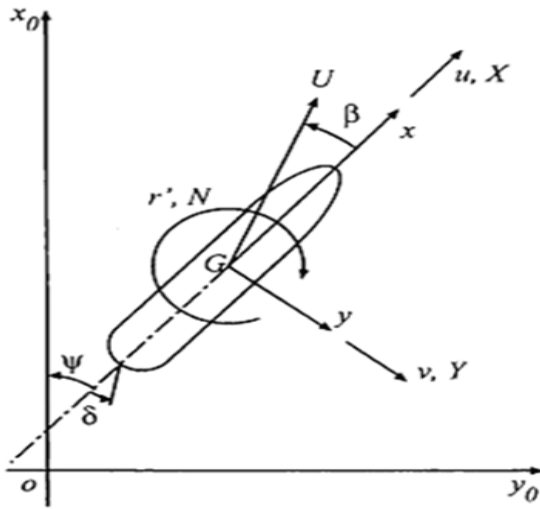


Fig. 1 Coordinate system

$$\begin{aligned} (X_u - m)\dot{u} + X_u u &= 0 \\ (Y_v - m)\dot{v} + Y_v v + Y_r \dot{r} + (Y_r - mU)r &= 0 \\ N_v \dot{v} + N_v v + (N_r - I_{zz})\dot{r} + N_r r &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

전후동요 방정식을 제외하고 좌우동요, 선수동요 연성 운동방정식에서 미지수 v, r을 식 (2)와 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} v &= v_1 e^{\sigma_1 t} + v_2 e^{\sigma_2 t} \\ r &= r_1 e^{\sigma_1 t} + r_2 e^{\sigma_2 t} \end{aligned} \quad (2)$$

좌우동요와 선수동요 연성 방정식에 식 (2)를 대입하여 안정성 지수 σ 에 대한 2차 특성 방정식을 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} A\sigma^2 + B\sigma + C &= 0 \\ \text{where, } A &= (Y_v - m)(N_r - I_{zz}) - Y_r N_v \\ B &= (Y_v - m)N_r + (N_r - I_{zz})Y_v \\ &\quad - Y_r N_v - N_v(Y_r - mU) \\ C &= Y_v N_r - (Y_r - mU)N_v \end{aligned} \quad (3)$$

안정성 지수 σ 가 0보다 작으려면 A, B, C가 모두 0보다 커야 한다. 유체력 미계수의 물리적 특성을 고려할 때 A와 B는 항상 0보다 크며 C의 부호가 0보다 크려면 식 (4)를 만족해야 한다.

$$\frac{N_r}{(Y_r - mU)} - \frac{N_v}{Y_v} = l_r - l_v > 0 \quad (4)$$

식 (4)의 두 항은 각각 물리적으로 선수동요 감쇠모멘트와 좌우동요 감쇠력의 압력중심 위치이다. 모형 시험을 통해 좌우동요 속도와 선수동요 각속도에 관련된 감쇠력과 감쇠모멘트를 구하고 이를 식 (4)에 대입하여 각 압력중심 위치를 구할 수 있다. 첫 번째 항의 분자, 분모는 둘 다 큰 음의 값이므로 양이다.

한편 두 번째 항의 분모는 큰 음의 값인데 비해 분자는 작은 양, 혹은 음의 값이 될 수 있다. 분자 Nv가 양으로 커지는 것이 침로안정성에는 유리하다. 결국 좌우동요 감쇠력의 압력중심 위치가 무게 중심에서 뒤쪽에 위치할수록 침로안정성이 향상된다.

3. 모형 시험의 개요

3.1 모형선

본 연구에서는 대상 모형선으로 워터젯 추진 고속선 선형을 채택하였으며 semi-displacement round bilge타입의 선형이다. 모형선의 body plan은 Fig. 2와 같다.

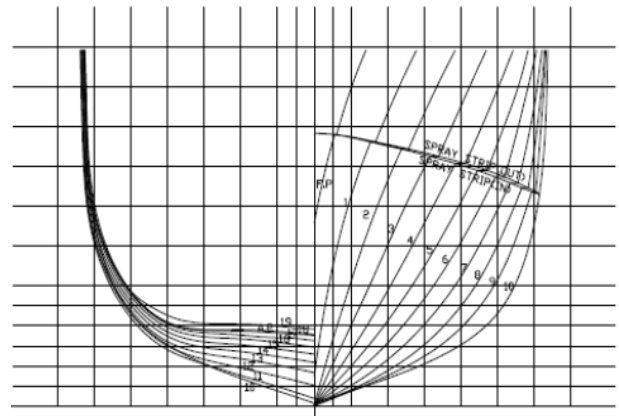


Fig. 2 Body plan

워터젯 추진 고속선이기 때문에 선미가 거의 평판에 가까운 형상을 지니고 있다. 선형의 주요 무차원수는 Table 1과 같다.

Table 1 Main particulars of a model

Particular	Value
L/B	6.21
B/T	2.7
Design Froude No.	1.19
C_B	0.468

3.2 시험 조건

고속예인시험은 서울대학교 선형시험수조의 고속예인전차를 이용하여 정수 중에서 실시하였다. 우선 기존 설계 선형에 대한 자세 계측 및 사항 시험을 수행하였다. 이어서 침로안정성을 저해하는 선수 드랍(bow drop) 현상을 개선하기 위해 길이방향 무게 중심(LCG)을 변경하거나 선수부 부가물을 장착하여 자세 계측 시험을 각각 실시하였다. 마지막으로 transom wedge를 제거하여 선수 드랍 현상을 개선한 후 자세 계측 및 사항 시험을 수행하여 침로안정성이 향상되었음을 검증하였다.

Table 2에 transom wedge가 있는 경우와 없는 경우 자세계측시험 및 사항시험 조건을 정리하였다. Froude 수 0.2 - 1.3 영역에서 속도 별 자세 계측 시험을 실시하고, 설계 속도인 Froude 수 1.19 에서 사항각 0, 1, 2도에 대해 사항시험을 수행하였다. 모형선 길이가 2미터이므로 FP 위치는 고정하고 AP 지점을 좌측으로 각각 35mm, 70mm 이동하여 사항각 1, 2도를 맞추었다.

Table 3과 같이 LCG변경 시험에서는 Design LCG를 기준으로 전후 5%씩 변경하여 자세 계측 시험을 수행하였다. Table 4는 transom wedge가 있는 본래의 선형에 선수부에 부가물을 설치하여 수행한 자세 계측 시험 조건이다.

Table 2 Test conditions for original hull and hull w/o transom wedge

Transom wedge angle(°)	Vertical motion measurement	Static drift test	
	Froude No.	Froude No.	Drift angle(°)
0 (w/o transom wedge)	0.2	1.19	0
	0.4		
	0.6		
	0.8		
13 (original hull)	1.0	1.19(design)	1
	1.19(design)		
	1.3		

Table 3 Test conditions for the variation of LCG

Vertical motion measurement	
Froude No.	Longitudinal center of gravity (LCG)
0.2	LCG (Design) LCG moved to F.P.(+5%) LCG moved to A.P.(-5%)
0.4	
0.6	
0.8	
1.0	
1.19(design)	
1.3	

Table 4 Test conditions for appendages at bow part

Vertical motion measurement	
Froude No.	Appendages at bow part
1.19	Bow wedge
	Spray strip(1)
	Spray strip(2)
	Spray strip(3)

4. 모형 시험 결과 및 분석

4.1 기존 설계 선형 시험

기존 설계 선형의 Froude 수 0.2~1.3 영역에 대한 항주 자세계측시험 결과는 Fig. 3과 같다. 트림은 모형선의 종경사

각 변위이며 선수가 들리는 경우를 양으로 정의하였다. 부상량은 모형선의 무게 중심 위치에서의 상하 변위로 정의하고 모형선 길이로 무차원화 하였으며 모형선이 위쪽으로 떠오르는 경우가 양이다.

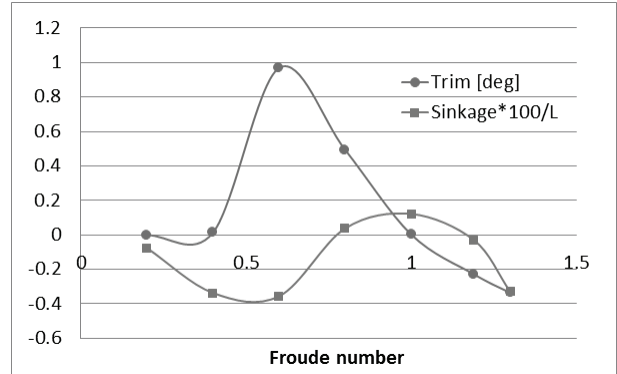


Fig. 3 Running attitudes of original hull with Froude No.

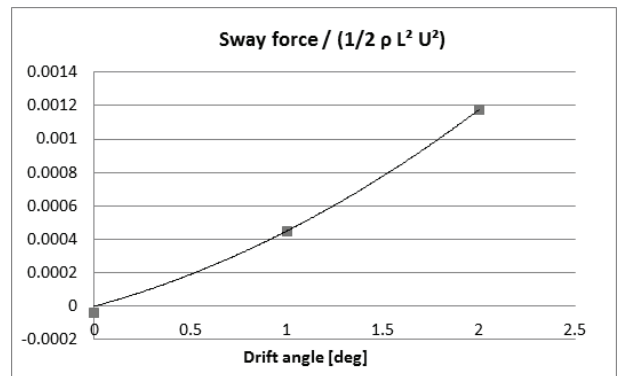


Fig. 4 Sway forces for original hull

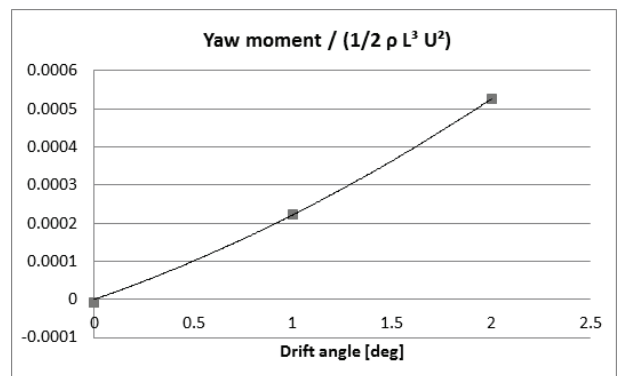


Fig. 5 Yaw moments for original hull

자세계측결과 Froude 수 0.6부터 트림이 작아지는 선수드랍 현상이 발생하고 Froude 수 1.0부터는 선수트림이 생긴다. 선수드랍은 속도가 증가하면서 곡면 형상의 선수부에 낮은 동압력이 분포하고 이로 인해 선수가 더욱 침하하는, 즉 트림각이 감소하는 현상이며 선수트림은 선미에 비해 선수가 더 잠겨있는 경우이다. 선수드랍은 선수부분의 침수면적을 넓게 하기 때문에 횡방향 압력중심을 선수방향으로 이동시킨다. 따라서 선수드랍은 침로 안정성을 저해하는 주요한 원인이다.

대상 선형의 경우 선수드랩에 의해 설계 Froude 수 이상에서 선수트림 및 심한 spray가 발생하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 기존 설계 선형의 사항시험에서 계측된 사항각에 대한 좌우동요 힘과 선수동요 모멘트이다.

사항 시험 결과 설계 Froude 수 1.19에서 항주할 때 횡방향 압력중심은 무게중심으로부터 선수방향으로 1163mm, 대략 F.P.에 위치하는 것을 확인하였다. 횡방향 압력 중심이 무게 중심보다 앞에 위치하여 양의 값으로 커질 경우 식 (4)가 음으로 증가하고 침로안정성을 잃게 된다. 따라서 침로안정성을 향상시키기 위한 시험들이 수행되었다.

4.2 무게중심 위치 변화 시험

길이 방향 무게중심 위치를 변경한 방법에 대한 자세 계측시험 결과는 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

LCG가 선미쪽으로 이동할수록 트림 및 부상량, 즉 자세 변화가 커진다는 것을 알 수 있다. 그러나 여전히 Froude 수 0.60이상의 영역에서 선수드랩 현상이 생기고 Froude 수 1.19 이상에서는 spray가 강하게 발생하였다.

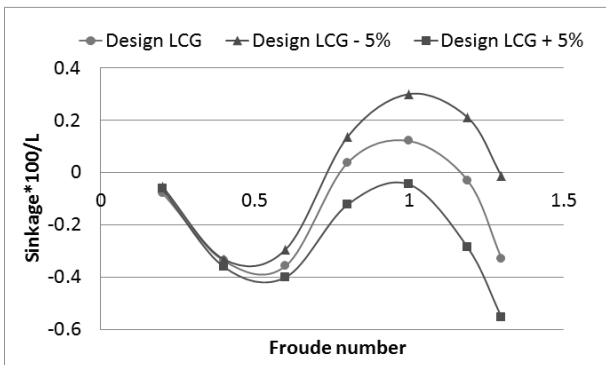


Fig. 6 Sinkages with the position of LCG

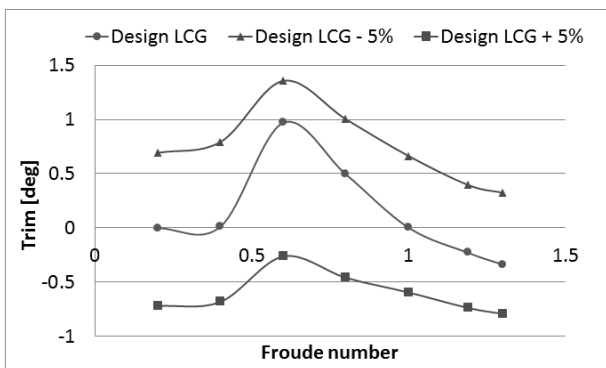


Fig. 7 Trims with the position of LCG

4.3 선수부 부가물 시험

다음은 선수부의 부가물을 이용하여 항주 자세 개선을 위한 시험을 수행하였다. 부가물들의 부착 위치와 단면모양은 Fig. 8 - Fig. 11과 같다.

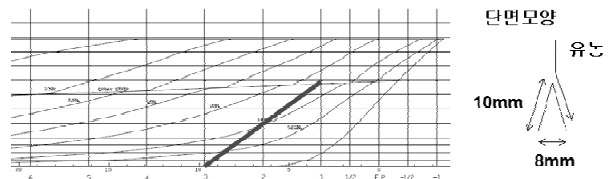


Fig. 8 Position and cross section of bow wedge

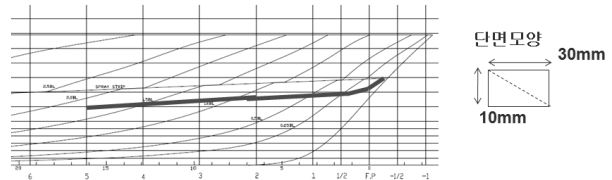


Fig. 9 Position and cross section of spray strip(1)

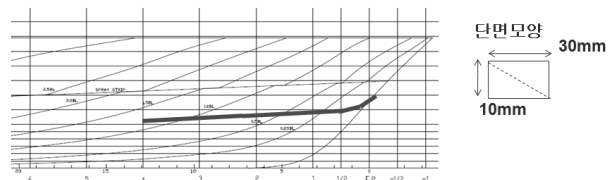


Fig. 10 Position and cross section of spray strip(2)

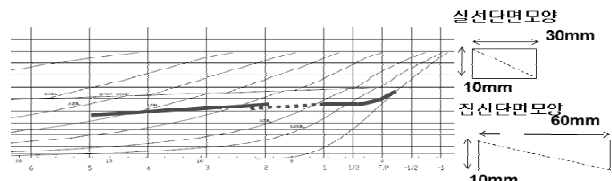


Fig. 11 Position and cross section of spray strip(3)

Fig. 8과 같은 bow wedge를 붙이고 실험하였으나 오히려 선수트림이 커지고 항주 자세가 개선되지 않아서 Fig. 9와 같은 spray strip을 부착하였다. 하지만 spray가 strip의 아래쪽에서 이미 선체와 분리되어 발생하기 시작하여 부가물의 효과가 거의 없어서 Fig. 10과 같이 strip을 더 아래로 옮겼다. 이 역시 항주 자세에 큰 영향을 주지 못해서 마지막으로 Fig. 11처럼 spray를 최대한 많이 받을 수 있도록 station 1, 2번 사이의 strip 너비를 두 배로 증가시킨 후 항주 자세를 계측하였다.

부가물을 이용한 자세계측시험은 설계 Froude 수인 1.19에서 수행되었다. 구체적인 부상량 및 트림 결과는 Fig. 12와 Fig. 13과 같다. Bow wedge를 부착할 경우 bow wedge에 의한 동압력이 무게중심을 기준으로 선수를 내리는 방향으로 모멘트를 생성하여 오히려 트림이 작아지는 결과를 보였다. Spray strip의 시험 결과, 30mm의 폭을 갖는 spray strip으로는 효과가 없었고 60mm의 폭을 갖는 spray strip이 선수를 올리는, 즉 선수드랩 현상을 개선시키는 효과가 있었다. 그러나 60mm의 폭을 갖는 spray strip을 부착하면 Froude 수 1.3에서 porpoising현상이 발생하였다. 또한 폭 60mm의 spray strip은 실선으로 확장할 경우 폭이 1미터가 넘기 때문에 저항이 크게 증가하여 부가물로 적합하지 않다. 따라서 본 모형 시험에서 선수부 부가물은 항주자세 개선을 위한 적절한 대안이 아니다.

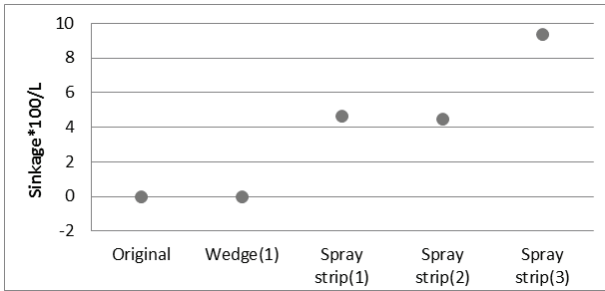


Fig. 12 Sinkages for appendages at bow part

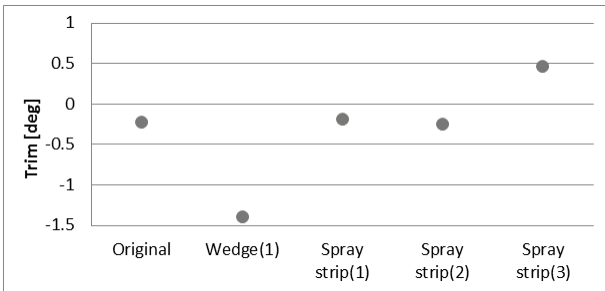


Fig. 13 Trims for appendages at bow part

4.4 선미부 부가물 시험

다음 방법으로 Trim tab 등의 선미부 부가물을 부착하여 항주 자세를 변화시킬 수 있다. 부가물의 효과를 알아보는 시험을 각각 독립적으로 수행하기 위해 trim tab 설치 이전에, 우선 기존 설계 선형에 존재하는 transom wedge를 제거하였다. Transom wedge는 center line에 대해서 13도로 설치되어 있었고 제거 후에는 0도이며 Fig. 14는 transom wedge 제거 전후의 측면 형상 사진이다.

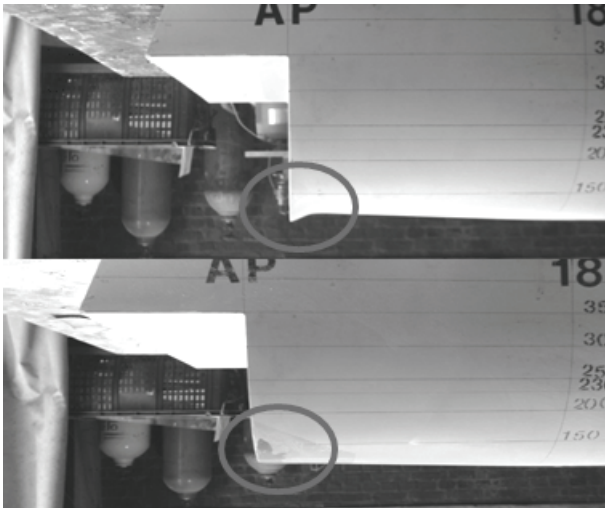


Fig. 14 The stern part with/without a transom wedge

Fig. 15는 transom wedge를 제거하기 전과 후의 속도 별 트림 결과 비교이다. Transom wedge에 작용하는 동압력의 수직성분이 사라지면서 선수를 내리는 모멘트 성분이 사라졌기 때문에, 트림각이 transom wedge 제거 후에 증가하였다.

Froude 수 0.6부터 있었던 선수드래피 개선되었고 그 결과로 설계 속도인 Froude 수 1.19 근처에서 선수트림 및 심한 spray가 사라졌다. 다만 Froude 수 0.6~1.0영역에서는 선수드래피 현상이 미미하게 존재한다.

Fig. 16은 transom wedge를 제거하기 전과 후의 속도 별 부상량 비교 그래프이다. 저속 영역에서는 두 경우 모두 트림각은 0에 가까우나 transom wedge가 없을 때 transom wedge에 작용하는 유체 동압력의 수직성분이 사라졌기 때문에 부상량이 약간 더 작다. 고속에서는 transom wedge가 있을 때보다 제거한 경우의 트림각이 훨씬 더 크므로 유체 동압력의 수직성분이 더 크다. 따라서 고속 영역에서는 transom wedge가 있을 때보다 제거한 경우의 부상량이 더 크다.

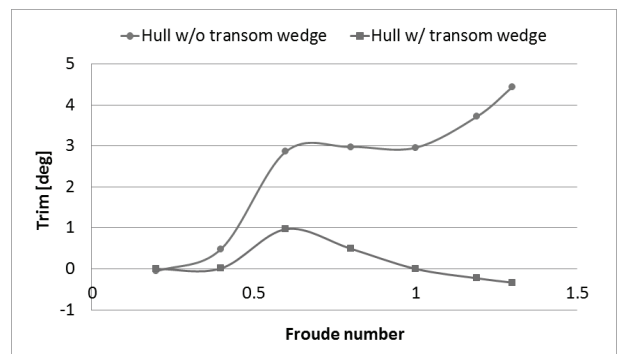


Fig. 15 Trims of hull with/without transom wedge

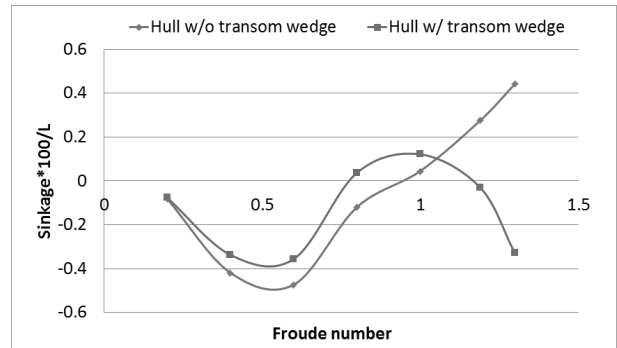


Fig. 16 Sinkages of hull with/without transom wedge

Fig. 17과 Fig. 18은 transom wedge를 제거하기 전과 후의 사향시험 결과 비교이다. 각각 미소 사향각에 대한 좌우동요 힘과 선수동요 모멘트 결과이다. Transom wedge가 없을 때 트림각과 부상량이 증가하였기 때문에 침수표면적이 줄어들고 이에 따라 좌우동요 힘이 감소하였다. 그리고 선수부분의 침수면적이 줄어들어 따라 계속된 선수동요 모멘트의 방향이 바뀌었다. Transom wedge가 있을 때와 제거하였을 때의 횡방향 압력중심 위치를 비교하면 Table 5와 같다.

Transom wedge가 있을 때에는 횡방향 압력 중심이 무게중심으로부터 선수방향으로 1163mm, 대략 F.P.에 위치했지만 transom wedge 제거 후에는 선미방향으로 363mm, 다시 말하면 무게중심에서 선박 길이의 18%만큼 뒤쪽으로 떨어진 곳에 위치한다. 즉, Transom wedge를 0도로 수정하여 항주자세를 개선하고 그 결과로 침로안정성을 개선할 수 있었다.

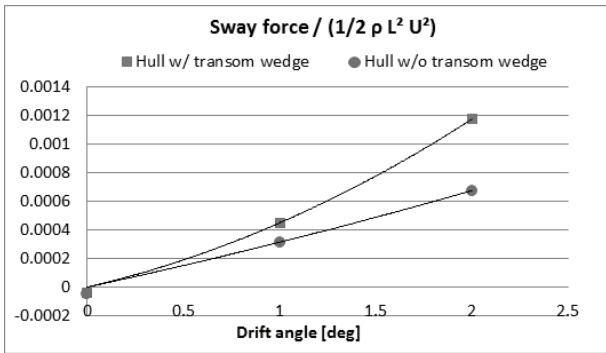


Fig. 17 Sway forces of hull with/without transom wedge

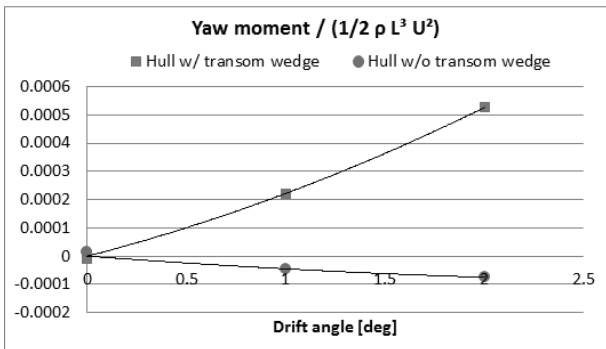


Fig. 18 Yaw moments of hull with/without transom wedge

Table 5 Positions of lateral center of pressure of hull with/without transom wedge

Condition	Lateral COP (mm, from LCG)
Hull w/ transom wedge	1163
Hull w/o transom wedge	-363

5. 결론

본 연구에서는 워터젯 추진 고속선형을 대상으로 침로안정성 판별을 위한 모형 시험을 수행하였다. 침로안정성을 저해하는 요인을 분석하고 항주자세를 변화하여 침로안정성을 개선하기 위한 시험들을 수행하였다. 항주 자세를 변화시키기 위해 무게중심의 위치를 변경하는 것과 선수부 및 선미부에 부가물을 이용하는 방법을 적용하여 시험을 수행하였다.

기존 설계 선형의 자세 계측시험 결과 Froude 수 0.6부터 트림각이 작아지는 선수드림이 발생하였다. 그리고 선수드림의 결과 설계 Froude 수 이상의 속도에서 선수트림 및 심한 spray가 발생하였으며 사항시험결과 측면압력중심의 위치가 LCG에서 선수방향으로 1163mm에 위치하는 것을 확인하였다.

선수드림이 심한 고속정에서는 무게중심의 위치를 변경하는 방법과 선수부 부가물을 이용하는 것보다는 선미부 부가물이 더 효과적이라고 판단된다. 본 고속정에서는 transom wedge를 0도로 수정하는 것만으로 항주자세를 개선할 수 있었고 그 결과로 횡방향 압력중심이 무게중심에서 선미방향으로 363mm에 위치하는 것을 확인하였다. 결국 기존 설계 선형에 비해 침로안정성이 향상되었다.

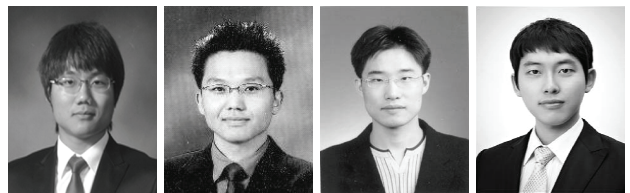
앞으로 trim tab 등을 고속선에 장착하여 실제 운항 목적에 맞는 적절한 항주 자세를 구현하고 skeg 등을 이용하여 침로안정성을 보다 개선시킬 수 있는 연구가 필요하며, 부가물에 의한 저항 증가 등까지 고려하여 최적의 부가물 형상을 설계하는 방안이 필요하다.

후 기

본 연구의 일부는 서울대학교 BK21 해양기술양성사업단, 해양시스템공학연구소(RIMSE) 및 해군본부 전력분석시험평가단의 지원으로 수행되었습니다. 위 기관들의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cohen, S.H. & Blount, D.L., 1986. Research Plan for the Investigation of Dynamic Instability of Small High-speed Craft. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 94, pp.197-216.
- Heo, J. & Lee, J.K., 2004. An Experimental Study on Resistance Decrease due to the Stern Flap of a Large Warship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(1), pp.70-74.
- Jensen, N. & Latorre, R., 1992. Prediction of Influence of Stern Wedges on Power Boat Performance. *Ocean Engineering*, 19(3), pp.303-312.
- Lee, J.G. et al., 2010. A Study on the Hull Form Design of Semi-Planing Round-Bilge Craft. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 24(4), pp.59-65.
- Park, C.H. Shim, S.M. & Jin, S.H., 2004. A Study on Resistance Performance for Planing Hull with Spray Strip. *Proceedings of the Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, pp.60-64.
- Yasukawa, H. Hirata, N. & Kose, K., 2006. Improvement of Course-keeping Ability of a High Speed Mono-hull by Skegs. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, pp.125-131.



박한솔

김동진

이성균

박종용



이기표