

## 해수 유출입 시스템을 적용한 ballast-free 선형의 저항 및 추진 성능에 관한 연구

이순현<sup>1</sup> · 백광준<sup>†</sup> · 김상현<sup>2</sup> · 이영길<sup>3</sup>

(Received August 9, 2018 ; Revised November 15, 2018 ; Accepted November 23, 2018)

### A study on resistance and propulsion performances of a ballast-free ship with inlet and outlet system for sea water

Soon-Hyun Lee<sup>1</sup> · Kwang-Jun Paik<sup>†</sup> · Sang-Hyun Kim<sup>2</sup> · Young-gill Lee<sup>3</sup>

**요약:** 선박의 균형을 유지하기 위하여 사용되는 평형수는 연간 50억 톤 이상 사용되고 있으며, 선박의 평형수가 다른 해역으로 유입되는 과정에서 해양오염 및 생태계의 교란을 야기하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 초기 연구로써 기존의 평형수 탱크(Ballast tank)를 대신하여 평형수 트렁크(Ballast trunk)와 트리밍 탱크(Trimming tank)의 복합형인 발라스트 트렁크-트림 탱크(ballast trunk-trim tank)를 제시하였으며, 발라스트 트렁크-트림 탱크 내부 해수의 순환성을 평가하였다. 본 연구에서는 대상 선박으로 공시 선형인 KVLCC2를 사용하였다. 해수 유출입 시스템은 프로펠러면 전방에 해수를 토출하여 프로펠러에 유입 유동에 변화를 야기하게 되며, 그에 따라 저항 성능과 추진 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서 발라스트 트렁크-트림 탱크의 적용에 따른 유출구의 위치와 크기가 저항 성능과 추진 성능에 어떤 영향을 미치는지에 관하여 CFD 해석을 통하여 평가하였다.

**주제어:** 전산유체역학, 평형수, Ballast-free 선박, 해수 순환 시스템, 저항 성능, 추진 성능

**Abstract:** The ballast water used to maintain the balance of the ship is used more than 5 billion tons a year and causes the marine pollution and the ecosystem disturbance in the process draining the ballast water into the other sea. In order to solve this problem, instead of a traditional ballast tank, a new concept of the ballast-free ship with a ballast trunk-trim system combining a ballast trunk and a trim tank was proposed in previous research. It was also evaluated whether the ballast trunk-trim tank could secure the circulation of seawater. In this study, KVLCC2 is used as the target ship. The existence of the ballast trunk-trim tank system causes seawater to be discharged in front of the propeller plane causing a change in the inflow flow to the propeller, thereby affecting the resistance and propulsion performances. The CFD analysis was carried out to evaluate the effect of the position and size of the ballast trunk-trim tank outlet on the resistance and propulsion performances.

**Keywords:** Computational fluid dynamics (CFD), Ballast water, Ballast-free ship, Sea water circulating system, Resistance performance, propulsion performance

## 1. 서론

선박의 흘수나 트림을 조정하기 위하여 사용되는 평형수(Ballast water)는 연간 50억 톤 이상 사용되고 있다. 전 세계적으로 평형수를 통해 약 7천여종 이상의 해양 생물과 해양 미생물들이 이동하고 있으며 외래 해양생물의 유입으로 해양 생태계 교란문제가 점점 심각해지고 있다.

선박의 평형수 관리 정책은 1980년대 미국 오대호에서 얼룩무늬담치(Zebra mussels)의 발견으로 그 문제가 제기되

기 시작하였다. 1988년 국제 해사기구의 해양환경보호위원회(MEPC)에 선박의 평형수에 의한 외래 생물종의 악영향이 처음으로 보고되었으며, 2004년 2월 IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)에서 선박 평형수와 침전물 관리 국제 협약(International Convention for The Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediment)이 채택되었다. 이후 매년 평형수 배출 및 처리에 관한 규제가 강화되고 있으며, 그에 따라 평형수 배출 및

<sup>†</sup>Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4657-5806>): Assistant Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea, E-mail: kwangjun.paik@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7331

1 M.S Candidate, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, E-mail: vorl93@naver.com, Tel: 032-860-7331

2 Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, E-mail: kimsh@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7344

3 Professor, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, E-mail: younglee@inha.ac.kr, Tel: 032-860-7340

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.

처리를 위한 방안들이 제시되고 있다.

대표적인 평형수 처리 방안으로 기존 선박에 물리적 또는 화학적 방법의 평형수 처리 장치를 적용하여 평형수를 처리하는 방법이 있다. 그 예로 O. Y. Bag *et al.* [1]은 평형수 처리에 있어서 직접 전기분해식 평형수 처리장치를 제안하였으며, J. H. Park *et al.* [2]은 개선 필터를 이용한 방법을 제시 하였다. 하지만 평형수 처리 장치의 성능적, 비용적 한계가 존재하며 평형수에 대한 근본적인 해결이 어렵다. 평형수에 관한 근본적인 해결을 위해 R. Kashiro [3]는 선박의 형상을 역삼각형에 가깝게 만들어 평형수를 최소화한 선박(Minimal ballast water ship), 무평형수 선박(Non ballast ship)과 같은 기존의 평형수를 줄이거나 없애는 방법에 관하여 제안하였다. 또 다른 방법으로 기존의 선박의 형상을 유지하며 평형수를 대체할 장치를 탑재한 평형수를 사용하지 않는 선박(Ballast-free ship)의 개념이 제시되었다. K. Van *et al.* [4]은 선체에 부유식 탱크를 이용하여 평형수 없이 선체의 균형을 유지하는 방법을 제안하였으며, 그 외에도 선수에서 선미로 해수가 지나가는 트렁크 타입(Trunk type), 선저 출입구를 통해 평형수를 저장하는 부력 제어 타입(Buoyancy control type) 등과 같이 다양한 평형수를 사용하지 않는 선박(Ballast-free ship)의 개념이 제시되고 있다.

선행 연구에서 J. H. Park *et al.* [5]은 평형수 처리 문제를 근본적으로 해결하고자 무평형수 선박과 Ballast-free 선박의 개념을 도입하고자 하였다. 무평형수 선박의 경우 복원성을 얻기 위한 V-shape의 특이한 선형이 K. Nikolaos [6]에 의해 제안되었다. 하지만 이와 같은 선박을 건조하는 단계에서 형상을 구현하기 위한 외관 가공과 정도관리가 힘들 것으로 판단되어 기존 평형수를 대체할 수 있는 장치를 활용하는 개념을 선정하였다. 또한 평형수를 사용하지 않는 선박의 개념 중 2004년 발명된 선수에서 선미로 해수가 흘러가는 방식(US patent #6,694,908 2004)과 G. P. Michael *et al.* [7]의 유입구와 유출구(Outlet)를 관으로 연결하여 해수를 흘려주는 방식에 대한 연구를 응용하여 선수에서 선미로 해수가 흘러가는 평형수 트렁크(Ballast trunk)와 균형 유지를 위한 트리밍 탱크(Trimming tank) 두 가지가 통합하여 적용한 발라스트 트렁크-트리밍 탱크(Ballast trunk-trim tank) 선박의 개념을 제안하였다. 또한 J. H. Park *et al.* [8]은 평형수 트렁크 내부의 순환성을 실험과 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 검증하는 과정을 거쳤다.

본 연구에서는 공시선형인 KVLCC2를 이용하여 발라스트 트렁크-트리밍 탱크의 유무와 유출구의 위치, 크기, 유출구에서의 유량 증가에 따라 선박의 저항성능과 추진성능에 어떠한 영향을 끼치는지에 관한 연구를 CFD 계산을 통해 진행하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석 기법

### 2.1 지배방정식

본 연구의 수치해석에 적용된 좌표계는 선미에서 선수 방향이 X축의 양의 방향이고 선박의 좌현이 양의 Y축이며, 중력의 반대방향인 양의 Z축으로 하는 직교 좌표계를 이용하였다. 선박의 유동해석을 위해서 지배방정식으로 연속방정식과 3차원 비압축성 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하였으며 아래와 같이 표기할 수 있다.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2)$$

여기서,  $u_i$  는 i 방향 유속,  $\rho$ 는 밀도,  $P$ 는 압력,  $\nu$  는 점성계수를 의미한다. 지배방정식을 풀기위해서 각 유한체적별로 적분을 취하여 인접하고 있는 유한체적 내 그리드 점에서의 물리량들과 상관관계를 구성하여 근사해를 구하는 유한 체적법이 사용하였다.

### 2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 상용 수치해석 프로그램인 Star-CCM+ 12.06 버전을 이용하였다. 난류 모델은 Realizable  $k-\epsilon$  난류 모델을 사용하였으며,  $k-\epsilon$  난류 모델은 격자를 선체표면 가까이 분포시킬 필요가 없어서 합리적인 격자수로 계산을 진행할 수 있다. 또한 자유수면을 구현하기 위해 고정된 오일러(Euler) 격자계에서 상간 경계면을 추적하는 방법으로 두 종류 이상의 섞이지 않는 유체의 경계면을 형성할 때 주로 사용되는 VOF(Volume of Fraction)법을 사용하였다. 각 상은 하나의 운동량방정식 군으로 지배되고 각 상의 기포율이 해석영역 내에서 격자단위로 계산 된다. 저항 해석을 위해 가상 디스크(Virtual-disc) 모델을 이용한 물체력(Body force propeller) 방법을 사용하였다. 본 방법은 가상의 디스크에 입력조건으로 프로펠러 회전수와 전진비(Advance ratio)에 따른 추력계수(Thrust coefficient)와 토크 계수(Torque coefficient)를 입력해 줌으로써 전진속도에 맞는 추력(Thrust)과 토크(Torque)를 내어주는 방법이다.

## 3. 대상 선박 및 수치해석 조건

### 3.1 대상 선박

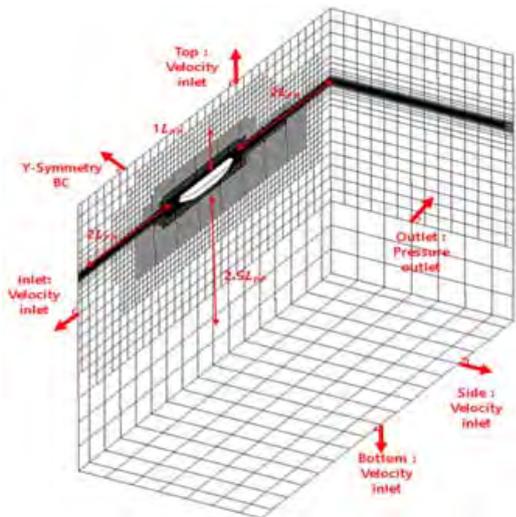
대상 선박은 공시선형인 KVLCC2를 사용하였다. 선박의 길이는 320m, 폭은 58m이며 모형선의 축척 비는 160이다. 주요 계원은 Table 1과 같으며 운항 속도는 설계속도인 15.5knots의 속도에서 계산을 수행하였다.

**Table 1:** Principal dimensions of ship and model

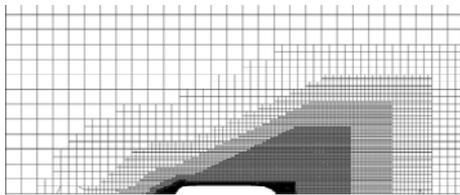
	Ship	Model
Lpp (m)	320	2
D (m)	30	0.1875
B (m)	58	0.3625
T (m)	20.8	0.13
S (m <sup>2</sup> )	27,194	1.08
Displacement (m)	312,622	0.032

3.2 격자계 및 경계 조건

본 연구의 계산에 사용된 격자 및 경계 조건은 **Figure 1**과 같으며 계산에 사용된 격자의 수는 **Table 2**와 같다. 발라스트 트렁크-트림 탱크가 적용되어 격자수가 증가하였으며, 저항 계산 시 가상 디스크 모델의 구현을 위하여 대칭(symmetry) 조건을 사용하지 않았기 때문에 격자수가 두 배로 늘어남을 볼 수 있다. 최소 격자 간격(Y+)는 두 경우 모두 30으로 맞추었다.



(a) Computational domain and boundary conditions



(b) top view

**Figure 1:** Computational domain, boundary conditions and grid structure

**Table 2:** Comparison of the number of cells

	resistance test	self propulsion test
Bare hull	2,000,000	4,000,000
With trunk trim tank	2,400,000	4,800,000

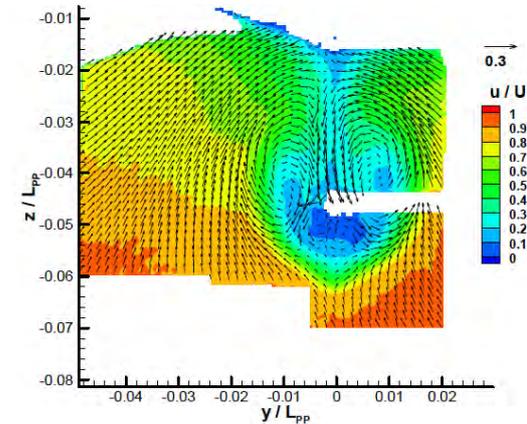
3.3 수치 계산 검증

사용된 선형에 대한 수치 계산의 타당성을 검증하기 위하여 인하대학교 선형수조(IUTT, Inha University Towing Tank)에서의 실험 결과와 비교 분석하였으며, **Table 3**과 같이 정수 중 KVLCC2의 저항, 트림각(trim), 침하량(sinkage)을 비교하였다. 각각 약 2.4%, 18%, 30% 정도의 오차를 가지며, 저항의 경우 큰 차이가 없으나 트림각과 침하량의 경우 작은 절댓값 비교로 인한 높은 오차로 판단된다.

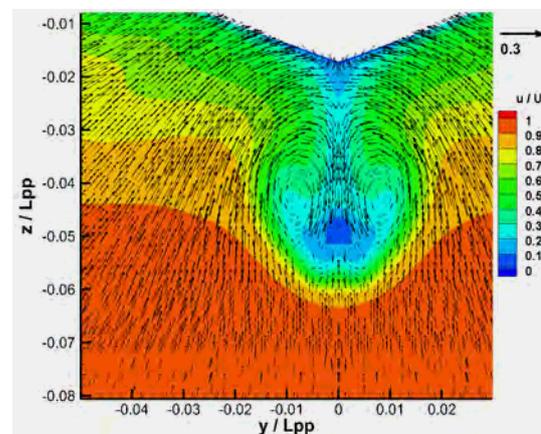
**Table 3:** Principal dimension of ship and model

	Exp. (IUTT)	Present cal.
Scale	1:160	1:160
$C_{TM}(\times 10^3)$	5.460	5.331
Trim (Degree)	0.096	0.118
Sinkage (mm)	0.0012	0.0009

또한 **Figure 2**와 같이 정수 중 프로펠러 면에서의 공칭 반류를 H. Kim *et al.* [9]의 실험결과와 비교하였다. 그 속도 분포와 갈고리 모양의 보오텍스(hook shape vortex)가 서로 유사하다고 판단함으로써 CFD 계산의 타당성을 검증하였다.



(a) Stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) measurement



(b) CFD (model)

**Figure 2:** Comparison of nominal wake and velocity vector

### 3.4 해석 조건

본 연구에서는 발라스트 트렁크-트림 탱크의 적용에 따라 유출구 주변의 유동변화가 선체의 성능변화에 영향을 미칠 것으로 판단하여 유출구의 위치와 크기를 변화 시켜 가며 해석의 조건을 선정하였다.

유출구의 위치는 발라스트 트렁크-트림 탱크의 크기를 고려하였으며, Figure 3과 같이 평형수 시스템(Ballast system) 적용하지 않은 선형에서 전체압력이 낮은 부분과 동압력이 낮은 부분을 확인하여 두 가지 유출구의 위치를 선정하였다. 압력이 낮은 부분에 유출구를 적용함으로써 선체의 압력회복이 빨라지는 효과를 기대하였다. 유출구의 크기는 지름 0.03m, 0.015m 두 가지로 선정하였다. 또한 지름이 0.015m인 경우에서 유출구에 유량을 증가시켜 주었을 때의 경우를 선정하여 총 네 가지 경우에서 저항 성능 해석을 진행하였다.

유출구의 위치에 의한 영향을 보기 위해 선미에서 동압력이 가장 낮은 곳을 고려하여 유출구의 위치를 선택하고 지름이 0.03m 인 경우를 Case1, 선미에서 전체 압력이 가장 낮은 곳에 유출구의 위치를 선정하고 지름 0.03m 인 경우를 Case2로 두었다. Case2와 동일한 유출구의 위치에서 지름이 0.015m인 경우를 Case3로 선정하였으며, Case3의 경우에서 유출구에 유량을 증가시켜주어 Case4를 선정하였다. 유량의 결정은 발라스트 트렁크-트림 탱크에 의해 느려진 유출구 유속을 설계 속도와 비슷한 값을 가질 수 있도록 유출유량을 유출구의 크기에 맞추어 0.314kg/s를 선정하였으며, 해당 유량만큼 유출구의 관에서 유체가 분사되도록 하였다.

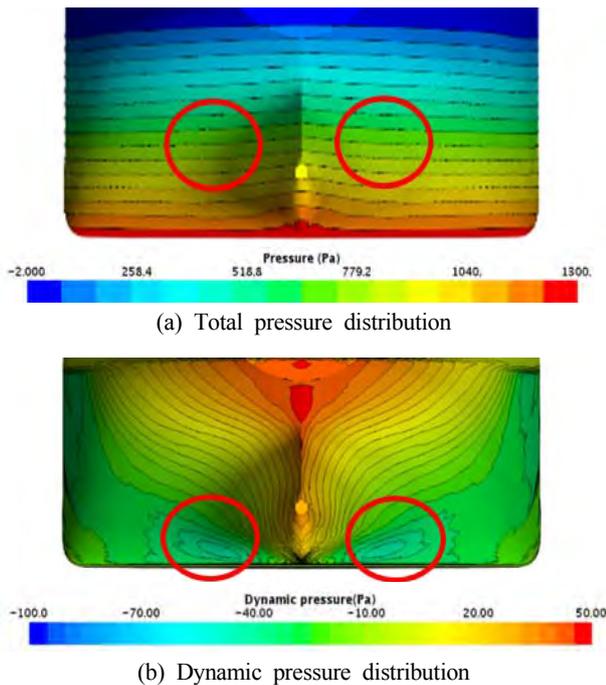


Figure 3: Distribution of total and dynamic pressures

## 4. 수치 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 저항 성능 해석

본 절에서는 앞서 수행한 수치계산 검증결과가 적절하다는 판단에 의해 각 Case별 저항 성능 해석 결과를 비교해 보았다.

각 Case별 전저항, 마찰저항, 압력저항은 Table 4와 같으며, 유출구를 적용함으로써 저항이 증가함을 확인 할 수 있었다. 또한 마찰저항에서는 큰 차이가 없었으며, 압력저항이 전저항의 차이에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 4: Comparison of total, friction and pressure resistances

	Bare hull	Case1	Case2	Case3	Case4
Friction resistance (N)	0.86	0.86	0.87	0.86	0.85
Pressure resistance (N)	0.28	0.65	0.45	0.33	0.31
Total resistance (N)	1.14	1.50	1.32	1.19	1.16
total resistance (%)		24	14	5	2

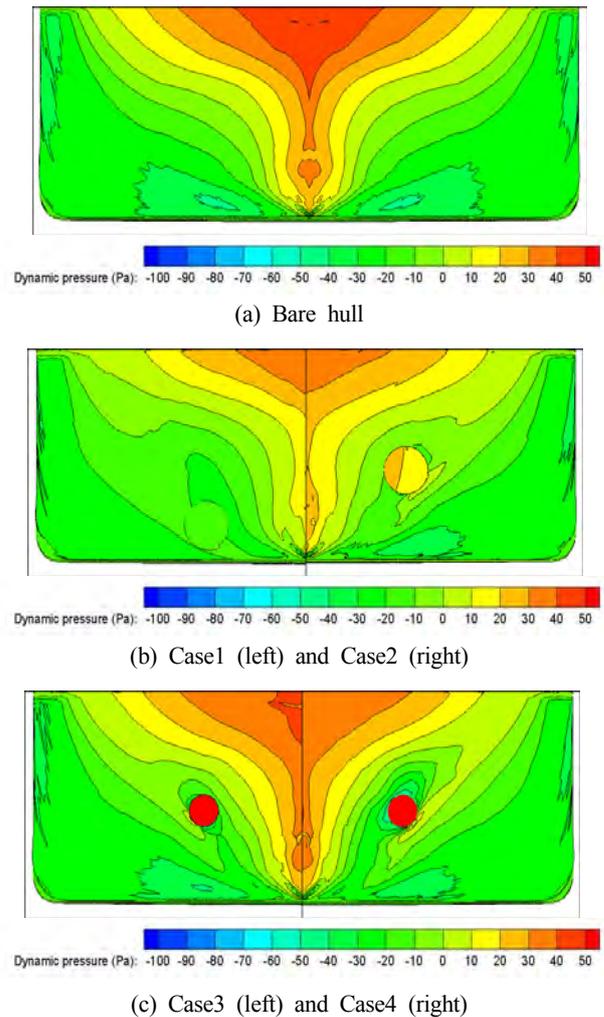


Figure 4: Comparison of pressure distribution

압력의 변화를 확인하기 위하여 **Figure 4**와 같이 각각의 조건별 압력분포를 비교해 보았으며, 유출구가 존재함으로써 압력의 회복이 bare hull에 비해 더더졌다.

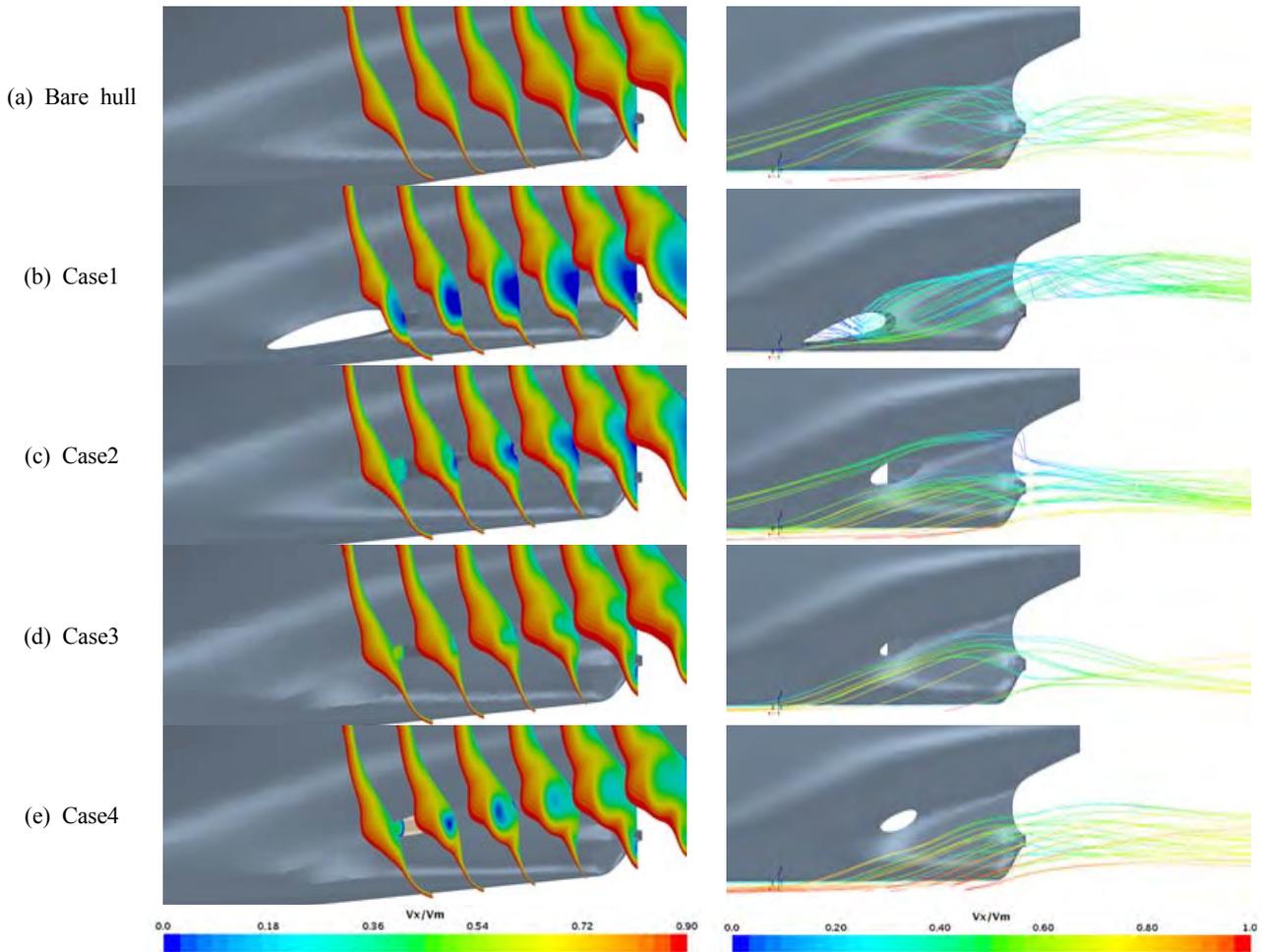
동압력이 가장 낮은 곳에 유출구를 선정된 Case1의 경우보다 전체 압력 중 압력이 가장 낮은 곳에 유출구를 선정된 Case2의 경우가 압력회복 측면에서 유리하였다. 이를 통해 유출구의 위치는 선저보다 상부에 존재할수록 압력회복이 빨라짐을 확인하였다. 또한 직경의 크기를 절반으로 줄인 Case3의 경우 압력회복이 더 빨라졌으며, 유출구의 유량을 증가시켜준 경우 유출구 주변에 압력이 오히려 낮아져 압력회복이 지연되고 있다. 이와 같은 압력회복이 지연되는 원인을 확인하기 위하여 선미부의 무차원화된 속도를 비교해 보았다.

**Figure 5**의 왼쪽 그림을 통해 무차원화된 속도 분포를 비교할 수 있으며, 압력회복이 느렸던 Case1, 2의 경우 선측에서 유출구에 의한 저속구간이 크게 존재하고 있다. 유출구의 직경을 줄여준 Case3의 경우 bare hull과 가장 유사한 속도분포를 보였다. 압력회복이 느렸던 Case4의 경우 유출구 주변에서 저속구간이 존재하였다.

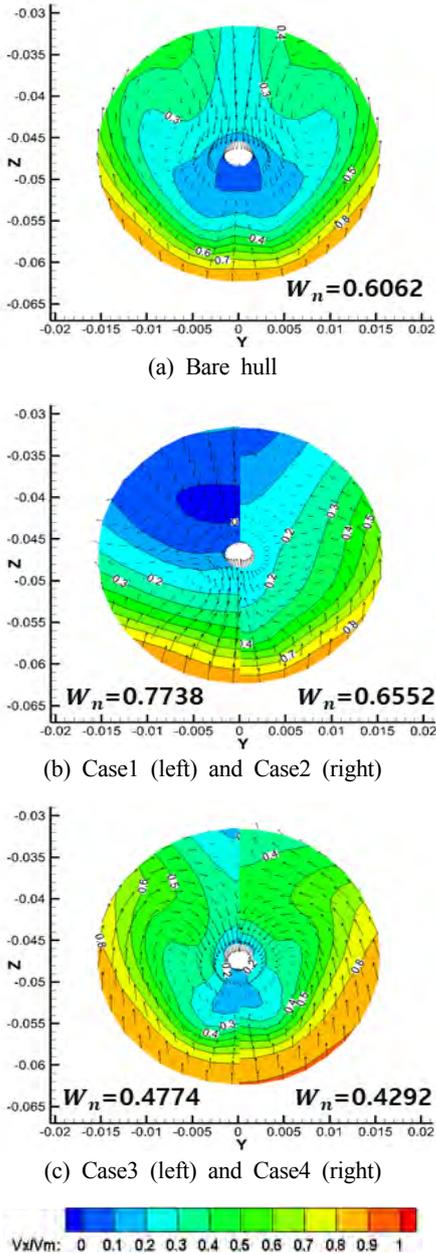
그 원인으로는 유출된 유체가 선체를 타고 흐르다가 주변의 유속이 느려져 역류하는 것과 같은 현상을 띄고 있을 것이라 분석하였다. 따라서 선체 근처에서는 유속이 빨라져 압력이 낮아지고, 그로 인해 유출구 주변에서의 압력회복이 느려져 앞서 보았던 압력분포를 띄는 것으로 판단된다.

**Figure 5**의 오른쪽 그림은 프로펠러 면을 지나는 유선을 나타낸 것이다. Case 별로 선미부를 지나는 유선 중 프로펠러 면으로 유입되는 유선들이 다르게 발생하고 있음을 보여준다. Case1의 경우 프로펠러 면으로 유입되는 유선들이 유출되는 유체의 영향을 가장 많이 받고 있으며, 유출구의 위치가 전압력이 가장 높은 곳과 지름이 작아지는 경우 각각 유출구의 영향이 점점 줄어들고 있다. 또한 Case4의 경우 유출구의 영향이 가장 적었으며, 선저를 타고 오르는 유체의 흐름이 프로펠러 면으로 유입되고 있다. 따라서 유출구의 영향이 줄어들수록 선저의 영향이 커짐을 알 수 있다.

**Figure 5**을 통해 프로펠러 면으로 유입되는 유선들의 분포를 확인한 결과 Case별 프로펠러 면으로의 유입되는 유속이 다를 것으로 판단되며, **Figure 6**과 같이 공칭 반류면과 속도 벡터를 비교해 보았다. 그림을 통해 유출구의 직경이



**Figure 5:** Comparison of non-dimensional velocity distribution (left) and stream line (right)



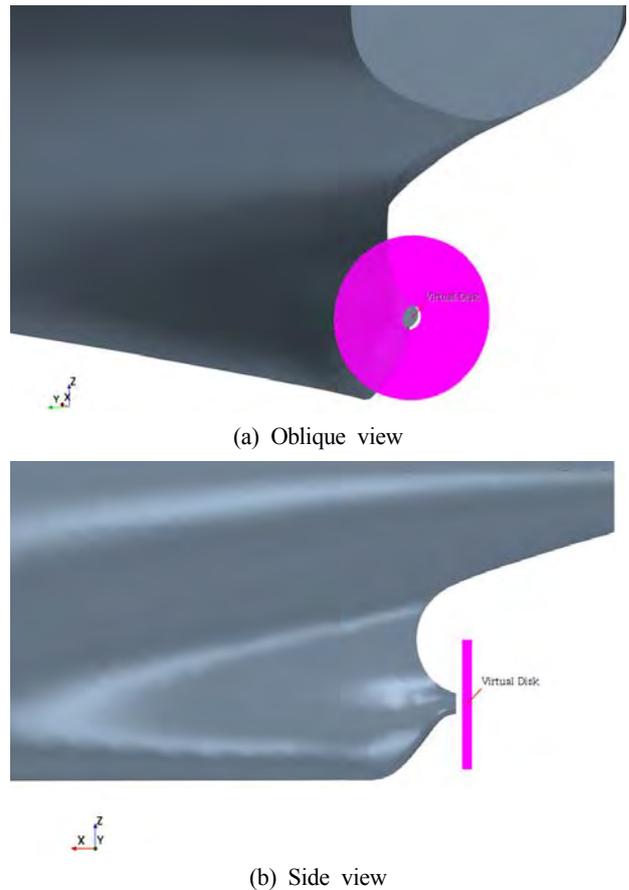
**Figure 6:** Comparison of nominal wake and velocity vector distribution

클수록 갈고리 모양의 보오텍스가 적게 관찰되며, 반류면으로 유입되는 유속이 느림을 확인하였다. 유출구의 위치가 선저에서 상부로 올라갈수록 반류면에서의 유속이 빨라짐을 보여준다. 또한 직경이 작아질수록 반류면에서의 유속이 가속되고 있으며, bare hull과 같이 갈고리 모양의 보오텍스가 관찰되어진다. 또한 반류면에서의 유속은 유출구에서 유속을 가속시켜준 Case4의 경우가 가장 빨랐다.

#### 4.2 저항 성능 해석

앞 절에서 저항 성능 및 유동분포를 통해 유체성능을 분석해보았다. 본 절에서는 발라스트 트렁크-트림 탱크를 적용함에 있어서 추진 성능의 차이를 보고자 하였다. 추진 성

능을 확인하기 위해 저항 해석을 수행하였으며, 저항 해석을 위해 프로펠러를 직접 모델링해주는 대신 프로펠러 위치에 가상의 디스크를 두고 물체력을 통해 전진비에 따른 추력계수를 계산하였다. 입력되는 전진비에 따른 추력계수의 값으로 Natinal Maritime Research Institute(NMRI)에서 실시한 KP458 프로펠러의 POW(Propeller Open Water) 실험값을 사용하였다. 가상의 디스크의 위치는 KVLCC2의 프로펠러의 위치와 동일하며 외경과 내경은 각각 프로펠러와 허브의 직경과 같게 적용하였다. **Figure 7**에 가상의 디스크를 도시하였다.



**Figure 7:** Position of virtual-disk

물체력의 입력 값으로 유입되는 속도를 정의할 면을 선정해주어야 한다. 유입되는 면은 가상의 디스크에서 X+ 방향으로 직경의 0.1배 떨어진 위치를 선정하였으며 그 크기는 직경의 1.1배 이다.

프로펠러 회전수 변경을 통해 저항점을 찾았으며, 저항 성능이 가장 유리했던 Case4의 경우와 bare hull과의 저항요소를 **Table 5**와 같이 비교하였다.

Bare hull과 Case4의  $R_{TM}$ 을 비교한 결과 저항의 증가가 있었으나 그 값이 크지 않으며, ITTC 1957 방법을 이용하여 유효마력(Effective Horse Power, EHP)를 추정한 결과 약 4% 정도 증가하였다.

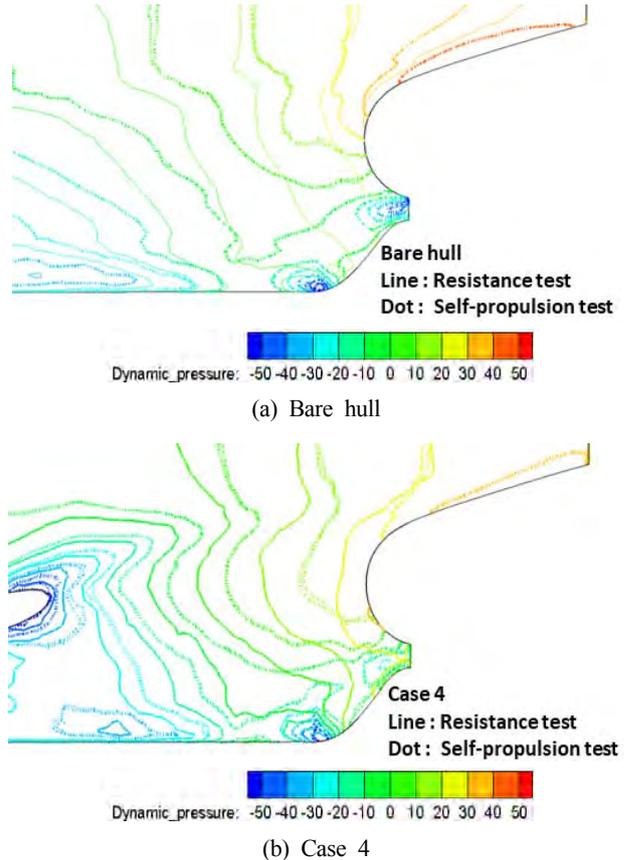
**Table 5:** Comparison of self-propulsion components

	Bare hull	Case4
$R_{TM}$	1.14	1.16
Difference of $R_{TM}$		1.72%
EHP (kW)	17,603	18,267
Difference of EHP		3.77%
$W_{TM}$	0.249	0.215
t	0.162	0.212
$\eta_O$	0.544	0.554
Difference of $\eta_O$		1.74%
$\eta_R$	1.000	1.000
$\eta_H$	1.070	1.004
Difference of $\eta_H$		-6.51%
$\eta_D$	0.582	0.556
Difference of $\eta_D$		-4.65%
DHP (kW)	30,108	32,803
Difference of DHP		8.95%
RPM	83.59	86.08

추진 성능 평가를 위해서 ITTC 1978 추진 성능 해석법을 통하여 저항요소를 추정하였다.  $\eta_R$ 은 물체력을 적용 시 토오크 값을 구하는데 어려움이 있어 토오크의 변화가 없다고 가정하여 1의 값을 사용하였다.

자항해석 결과 프로펠러 면에 들어오는 유속의 증가로 인해  $\eta_O$ 가 증가하였다. 하지만 자항상태에서 추력감소계수(Thrust deduction coefficient)의 증가와 반류계수(Wake fraction)값의 감소로 인하여 선체 효율,  $\eta_H$ 가 6.5% 감소하였고, 그로 인해 전달마력(Delivered Horse Power, DHP)의 차이가 약 9% 증가하였다. 전달마력 증가의 원인으로 추력감소계수의 증가가 하나의 원인으로 판단되며, 이는 bare hull에 비해 Case4의 경우 자항상태에서 선미부에 영향을 미치는 압력의 변화가 더 클 것으로 판단된다. 또한 프로펠러 회전수가 약 2 RPM 증가했음을 볼 수 있으며, 이는 프로펠러로 들어오는 유속의 증가로 인한 RPM 증가로 보여진다. 따라서 프로펠러로 유입되는 유속을 고려하여 프로펠러를 재설계함으로써 약간의 추진효율의 증가가 기대된다.

자항상태에서 선미부의 압력분포 차이를 확인하고자 Figure 8과 같이 자항 상태와 저항 상태의 동압력 분포를 비교해 보았다. 그 결과 Figure 8과 같이 자항 상태에서 프로펠러의 회전으로 인해 선미부의 압력이 더 낮아지게 하는 영향을 볼 수 있다. Case4의 경우 저항상태에서 선저부의 빠른 유속으로 인해 선저에서 낮은 압력분포를 보였으며, 자항 상태에서 선저부의 압력이 미치는 영향이 더 큰 점선과 실선의 비교를 통해서 확인하였다.



**Figure 8:** Comparison of dynamic pressure distribution between resistance test and self-propulsion test

## 5. 결 론

본 연구에서는 ballast-free 선박의 일환으로 발라스트 트렁크-트림 탱크를 공시선형인 KVLCC2에 적용함에 따라 저항과 추진 성능의 변화를 확인하고자 하였으며, 발라스트 트렁크-트림 탱크의 유무, 유출구의 위치, 크기와 유출구의 유량변화에 의한 영향을 살펴보았다.

발라스트 트렁크-트림 탱크를 적용함에 따라 유출구가 존재하게 되고 bare hull 상태에서 선미부를 지나가던 유체의 유량보다 유출구에서 유출되는 유량이 상대적으로 적어 느린 속도의 유체가 유출구를 통해 배출된다. 그에 따라 유출구에서의 유속이 느려 지게 되며, 동압력분포의 회복이 느려 지고 공칭 반류에서 유속이 확연히 느려졌다.

유출구의 위치가 선저부 보다 갑판에 가까워질수록 압력분포, 유속 및 저항에서 유리해졌으며, 유출구의 지름이 선체의 압력분포 회복과 반류면에서의 유속에 중요한 요인으로 작용하였다. 또한 유선분포를 통해서 반류면으로 유입되는 유선이 유출구의 영향을 적게 받을수록 반류면에서 유속이 빨랐다.

추가적으로 본 연구에서 유출구에 펌프를 설치해주어 유속을 증가시키는 효과를 관찰하기 위해 유출구에서 유량을 증가시켜주는 경우를 고려했다. 그 결과 유출구에서의 선

측에 가까운 부분의 유속이 빨라졌으며, 반류면에 유입되는 유속 또한 증가하였다. 또한 bare hull과 비교하였을 때 저항이 2% 증가함을 볼 수 있었으나 다른 경우에 비해 비교적 저항의 증가가 작았다.

추진 성능을 비교하기 위해서 저항 성능이 가장 유리했던 Case4의 경우를 발라스트 트렁크-트림 탱크를 적용하지 않은 경우와 저항 요소들을 비교하였고 9%의 전달마력 손실이 있었다. 그 원인은 추력감소계수의 증가, 반류계수의 감소로 분석되어진다. 또한 저항상태와 자항상태의 선미 압력분포를 비교해보았고, 발라스트 트렁크-트림 탱크가 적용된 경우 선저에서의 압력변화가 크게 나타났기 때문에 추력감소계수가 증가한 것으로 분석하였다.

앞서 CFD 계산을 통해 저항 및 자항 요소를 비교해본 결과 유출구의 위치와 유속이 유동에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 비록 발라스트 트렁크-트림 탱크 적용 한 경우 저항 성능과 추진 성능이 유리하지는 않았으나 평형수를 사용하지 않는다는 환경적인 측면에서 유리할 것으로 보이며, 성능 개선을 위해 유출구의 위치, 크기 및 유출유속을 최적화한 설계가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 산업자원통상부 그린카 등 수송시스템 산업핵심기술개발사업 ‘평형수가 필요 없는 선박의 개념 설계 개발’(과제번호: 10052420)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] O. Y. Bag, J. Moon, J. M. Park, and G. Y. Kong, “Development of the electrolysis ballast water treatment system and test,” *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 41, no. 3, pp. 79-86, 2017 (in Korean).
- [2] J. H. Park, S. H. Lee, and G. H. Kang, “A study on CFD of improved performance filter for BWMS,” *Proceedings of the Annual Autumn conference, Society of Naval Architects of Korea*, pp. 626-631, 2017 (in Korean).
- [3] R. Kashiro, “Innovative ship design with less ballast water and less GHG,” *TSCF Shipbuilders Meeting*, 2016. [Online]. Available: <http://www.tscforum.org/TSCF/bfile/s/2016/4.1%20Innovative%20ship%20design%20with%20less%20ballast%20water%20and%20less%20GHG.pdf>
- [4] W. Charlotte, M. Q. Silvio, S. Sander, P. Mike, S. Tim, V. Van, and K. Van, “Sailing without ballast water, using upthrusting air,” *Rotterdam Mainport University*, 2014. [Online]. Available: <http://www.maritimesymposium-rotterdam.nl/uploads/Route/ballastless%20sailing.pdf>
- [5] J. H. Park, S. H. Lee, Y. G. Lee, S. H. Kim, S. J. Chae, and U. H. Kang, “A basic research on the bal-

lasting method for ships without ballast tank,” *Proceedings of the Annual Autumn conference, Society of Naval Architects of Korea*, pp. 703-706, 2015 (in Korean).

- [6] K. Nikolaos, “Ballast-free concept designs,” *Posidonia 2016*, June, 2016. [Online]. Available: [http://conference9.diorama.gr/images/presentations/Nikolaos\\_Kakalis.pdf](http://conference9.diorama.gr/images/presentations/Nikolaos_Kakalis.pdf)
- [7] G. P. Micheal and K. Miliadis, “Hydrodynamic Optimization Testing of Ballast-Free Ship Design,” *Great Lakes Maritime Research Institute*, 2007. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/228908745\\_Hydrodynamic\\_Optimization\\_Testing\\_of\\_Ballast-Free\\_Ship\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/228908745_Hydrodynamic_Optimization_Testing_of_Ballast-Free_Ship_Design)
- [8] J. H. Park, S. H. Lee, Y. G. Lee, S. H. Kim, K. J. Paik, and I. T. Kim, “A study on the ship internal flow system for development of a ballast-free ship,” *Proceedings of the 13th International Symposium on PRACTical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS'2016)*, pp. 347-352, 2016.
- [9] H. Kim, J. H. Jang, S. H. Hwang, M. S. Kim, Y. Hayashi, and Y. Toda, “Nominal wake measurement for KVLCC2 model ship in regular head waves at fully loaded condition,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 53, no. 5, pp. 371-379, 2016 (in Korean).