

# 일반상선의 선수 개구부가 저항 및 자항성능에 미치는 영향

박동우\*†

\* 동명대학교 조선해양공학과

## Effects of Opening Condition of the Fore Body on the Resistance and Self-Propulsion Performance of a Ship

Dong-Woo Park\*†

\* Division of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University, Busan, 608-711, Korea

**요 약 :** 일반상선 중 액화천연가스(LNG) 재기화 선박은 기존의 LNG 운반선에 액화된 LNG를 다시 기화할 수 있는 추가설비를 갖춘 선박이다. 이 선박은 해상에서 천연가스를 해저 터미널을 통해 이송하는 수중 터렛 시스템을 보유한다. 하역작업을 완료한 선박이 운항 시에는 수중 터렛이 없음으로 인해 선수부 바닥이 열려 있는 개구부 즉, 오프닝 상태가 발생한다. 본 연구의 주 목적은 오프닝 상태로 운항 시 발생하는 속도손실을 CFD를 이용한 유동해석과 예인수조에서의 모형시험을 통하여 정확하게 파악하였다. 모형시험에서는 나선 상태와 오프닝 상태에서 저항 및 자항성능을 평가하였다. 실험에서는 터프트 법에 의한 유선조사시험을 이용하여 오프닝 내부 유동의 변화를 정량적 또는 정성적으로 보다 더 상세한 조사를 하였다.

**핵심용어 :** 액화천연가스 재기화 선박, 개구부, 전산유체역학, 모형시험, 유동 가시화

**Abstract :** LNG-RV has the additional equipments that enable to re-gasify liquefied LNG in LNG carrier. This vessel has Submerged Turret Loading(STL) system which transports gas through submarine terminal. When LNG-RV is operating at sea, the opening condition is formed by detaching STL equipment from a vessel. The primary objective of the current work is to estimate accurate speed loss for the opening condition of the LNG-RV employing numerical calculations and model tests. In the model tests, resistance and self-propulsion tests are carried out for the bare-hull and the opening condition without STL. In addition to these, flow visualization utilizing tuft is used to make the flow patterns visible, in order to get a qualitative or quantitative information for inner part in case of detaching the STL.

**Key Words :** LNG-RV, Opening condition, CFD, Model test, Flow visualization

### 1. 서 론

액화천연가스 재기화 선박(LNG Re-gasification Vessel, 이하 "LNG-RV"라고 함)으로 불리는 LNG-RV는 기존의 LNG 운반선에 액화된 LNG를 다시 기화할 수 있는 추가설비를 갖춘 선박이다. 이 선박은 해상에서 직접 기화된 천연가스를 해저 터미널을 통해 이송하는 수중 터렛 시스템(Submerged Turret Loading System, 이하 "STL"이라고 함)을 보유한다. 최근 이러한 선박이 국내 타 조선소에서 인도된 적이 있다. Fig. 1은 STL이 장착된 실제 선박의 모습을 보여 주고 있으며, Fig. 2는 STL 장비가 분리된 선박을 모델링한 상태를 보

여 준다. 하역 작업을 마친 선박이 운항 시에는 STL이 없음으로 인해 Fig. 2에서 보여주듯이 선수부 바닥이 열려 있는 개구부(이하 "오프닝 상태"라고 함)가 발생된다. STL장비의 제원은 윗면과 아랫면 지름이 각각 4m와 8m이며, 높이는 약 5.6m이다. 본 연구의 주 목적은 오프닝 상태로 운항 시 발생하는 속도손실을 수치해석을 통한 유동분석과 예인수조에서의 모형시험을 통해서 파악하고자 한다.

초기단계에서는 나선(Bare-Hull) 상태와 오프닝 상태에 대한 점성유동해석을 수행하였다. 점성유동계산에서는 STL이 분리된 경우, 내부유동의 변화와 이로 인한 저항성능 변화 그리고 유동변화에 따른 프로펠러 면에서의 반류분포를 비교 분석 하였다.

† dwpark@tu.ac.kr, 051-629-1654



Fig. 1. General arrangement of a LNG-RV attached the STL.

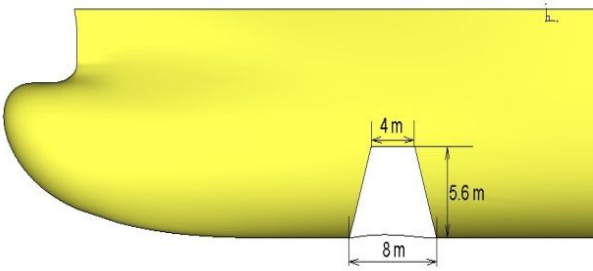


Fig. 2. The modeling of ship according to existence of the STL.

그 다음 단계에서는 모형시험을 통하여 나선 상태와 오프닝 상태에서 저항 및 자항성능을 평가하였다. 그 결과 선수부 바닥에 오프닝이 있음으로 인해 선속 별로 저항성능에 차이를 보여 주었으며, 최종적으로는 속도성능에 영향을 주었다. 실험에서는 터프트(Tuft) 법에 의한 유선조사시험(이하, 터프트 법)을 이용하여 오프닝 내부유동의 변화를 정량적 또는 정성적으로 보다 더 상세한 조사를 하였다. 모형시험은 예인수조에서 수행하였다.

유사연구사례는 다음과 같다. Kim et al.(2006a)은 바우 스테어의 개구부에 의한 선체 저항 증가는 선형, 선속, 개구부의 위치와 크기 등 다양한 변수가 영향을 준다고 하였다. 그리고 저항 감소를 위해 개구부에 그리드 설치 시 그리드 유무 및 형상에 대하여 다음과 같은 몇 가지 결론을 내렸다. 첫째, 형상과 무관하게 터널 개구부에 그리드를 설치함으로써 선체 저항을 일부 억제할 수 있다. 그리고 개구부에 의한 선체에 작용하는 부가저항 감소 측면을 살펴보면 그리드를 선체 외벽 가까이에 설치하더라도 선체 곡면을 충분히 반영하지 못하면 빠른 유속에 의한 저항증가를 억제하는데 한계가 있다고 하였다.. 둘째, 저항증가를 최소화 하기 위하여 선중, 개구부 위치에 따른 그리드 각도 및 개수 등에 대한 조사가 필요하다는 결론을 언급하였다. 본 연구는 운항 시 STL이 분리(오프닝 상태)됨으로 인해 나선상태 대비 속도성능을 CFD와 모형시험을 통하여 분석하였다.

## 2. 수치계산에 의한 유동해석

### 2.1 좌표계 및 지배방정식

본 계산을 위하여 적용된 좌표계는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 유동방향이 양(+)의 x축이고 선박의 우현이 양의 y축이며 중력의 반대방향을 양의 z축으로 하고 선박의 중심면과 자유표면이 만나는 점을 원점으로 하는 우수좌표계 이다.

본 연구에 사용된 모든 물리량은 배 길이( $L_{pp}$ ), 선속( $V_S$ ) 그리고 밀도( $\rho$ )로 무차원화 하였다. 유동의 지배방정식인 연속 방정식과 운동량 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_l \frac{\partial U_i}{\partial x_l} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_l} \left( \frac{1}{R_N} \frac{\partial U_i}{\partial x_l} - \overline{u_i u_l} \right) \quad (2)$$

여기서,  $U_i=(u, v, w)$ 는 각 좌표축  $X_i=(x, y, z)$  방향의 평균 속도 성분이고,  $p, R_N$  그리고  $\overline{u_i u_l}$  는 정압, 레이놀즈 수 그리고 Reynolds Stress를 나타낸다.

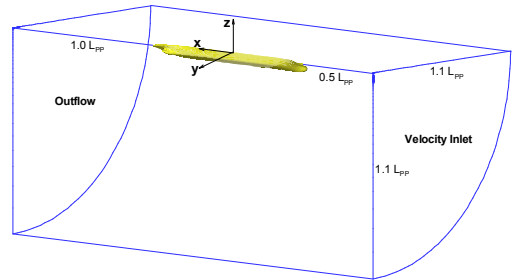


Fig. 3. Computational domain and coordinate system.

### 2.2 난류모델과 이산화

난류모델은 선체주위의 유동을 정확하게 예측하는데 중요하다. 본 연구에서는 선체주위 유동의 정확한 추정에 적합하다고 알려진 Reynolds Stress Model(RSM)을 사용하였다(Hino, 2005). Reynolds Stress는 RAN로 부터 유도될 수 있으며 다음의 편미분 형태로 표현된다(Hino, 2005).

$$\begin{aligned} \frac{D\overline{u_i u_j}}{Dt} = & \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left( C_k \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_\ell} + \frac{1}{R_N} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_\ell} \right) \\ & + G_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon - C_1 \frac{\epsilon}{k} \left( \overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) \\ & - C_2 \left( G_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} G_k \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$G_{ij} = - \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_\ell} u_i u_\ell + u_j u_\ell \frac{\partial U_i}{\partial x_\ell} \right) \quad (4)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다. 식(3)에서 첫번째 항은 확산을 나타내며,  $G_{ij}$ 는 생성항으로 식(4)로 표현되며, 마지막 두 항은 pressure strain을 나타낸다.  $C_k$ ,  $C_1$ 과  $C_2$ 는 난류모형 계수이다.  $k$ 와  $\epsilon$ 은 각각 난류에너지(Turbulent Kinetic Energy)와 난류에너지 소산율(Turbulent Dissipation Rate)을 나타내며, 다음의 식(5)와 식(6)으로 표현된다.

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left( C_k \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial k}{\partial x_\ell} + \frac{1}{R_N} \frac{\partial k}{\partial x_\ell} \right) - \frac{\partial U_i}{\partial x_\ell} u_i u_\ell - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left( C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_\ell} + \frac{1}{R_N} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_\ell} \right) - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial U_i}{\partial x_\ell} u_i u_\ell - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

여기서,  $C_\epsilon$ ,  $C_{\epsilon 1}$  그리고  $C_{\epsilon 2}$ 는 난류모델상수이다.

지배방정식을 풀기 위해서 유동영역은 유한개의 격자로 나누었으며, 이산화 과정을 통해서 대수방정식의 형태로 바뀌었다. 지배방정식의 대류항은 3차정도의 QUICK 방법으로 확산항은 2차 정도의 중심차분법으로 보간하고, 2차 정도의 수치적분을 사용하여 이산화하였다(Kim et al., 2006b).

### 2.3 대상선, 수치격자 및 계산조건

대상선은 대형 액화 천연 가스 운반선으로 주요요목은 Table 1에 나타내었다. 선체표면 및 공간격자 생성을 위해서는 상용코드인 Gridgen V15를 사용하였다. 격자는 약 110만 개를 사용하였으며,  $y^+$ 는 50 이하를 유지하였다(Kim et al., 2007; Kim et al., 2005). Fig. 4는 STL 장비가 분리된 상태, 즉 오프닝 상태에서의 격자 모습을 보여주고 있다. 유동장 계산은 상용코드인 FLUENT를 사용하였으며, 자유표면을 고려하지 않은 이중모형 유동에 대하여 계산을 수행하였다. FLUENT에서 사용된 유동장 계산조건은 Table 2에 나타내었다(Park et al., 2007).

Table 1. Principal dimension

Objective Ship	
LPP(m)	303.0
B (m)	50.0
T (m)	12.0

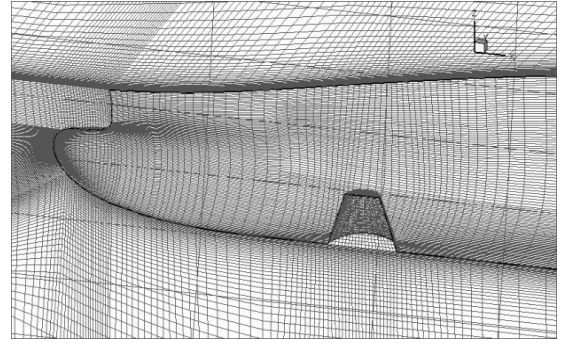


Fig. 4. Numerical grid for the fore-body of the opening condition detached the STL.

Table 2. Computational conditions

Contents		
Computational Domain	$-1.0L_{pp} \leq x \leq 1.5L_{pp}$ , $0 \leq y \leq 1.1L_{pp}$ , $0 \leq z \leq -1.1L_{pp}$	$L_{pp}$ : Model ship length
$R_N$ (Model)	$10.574 \times 10^6$	Design speed
Boundary Condition	Inlet region: velocity Inlet Outlet region: outflow Hull surface: wall Remaining region: symmetry	
Turbulence Model	Reynolds stress	Near wall, standard wall function is used
Velocity-Pressu	SIMPLE	

### 2.4 결과 및 토의

유동해석에서는 STL이 없으므로 인하여 발생하는 내부유동, 오프닝 주위의 압력 및 유선분포, 저항성능 그리고 반류 분포 변화에 관하여 분석하였다.

STL 장비가 분리되면 선수부 바닥에 오프닝이 생기며,

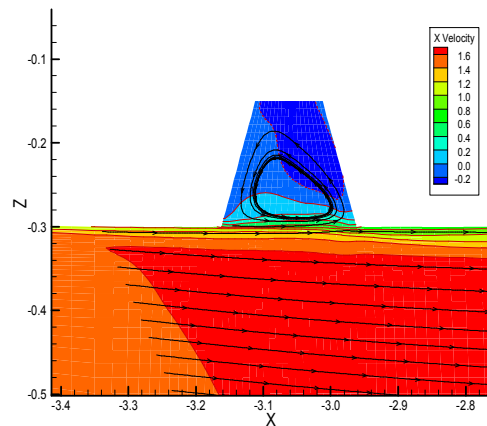


Fig. 5. Flow patterns of the inner part of the opening condition detached the STL from a vessel (Computation).

일반상선의 선수 개구부가 저항 및 자항성능에 미치는 영향

Fig. 5에서 보여 주듯이 내부에 캐비티 흐름(Driven Cavity Flow)이 발생된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 나선과 선수부 바닥에 오프닝이 있는 경우에 대한 압력과 유선분포를 나타낸 것이다. 오프닝의 위치가 기하학적 형상변화가 거의 없는 바닥면에 위치하기 때문에 나선과 비교했을 때 전체적인 압력과 유선분포는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 단지 Fig. 7의 오프닝 주위의 유선분포를 살펴보면 보오텍스가 형성되는 것을 알 수 있다. Fig. 8의 오프닝 내부의 압력분포를 살펴보면 Zone I 영역에 압력저항의 증가분이 발생하는 것을 알 수 있다.

Table 3는 저항 계수를 비교한 것으로 마찰저항은 나선과 오프닝 상태 모두 비슷한 값을 보여주었으며 압력저항은 오프닝 상태가 나선보다 약 4% 증가된 결과를 보여주었다. 전 저항의 증가는 0.5% 내로 나타났다.

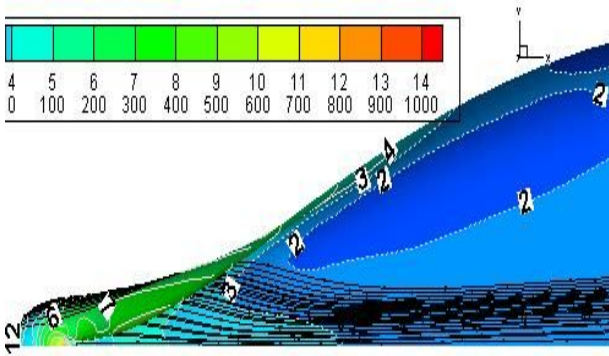


Fig. 6. Limiting streamlines and pressure distribution for the bare-hull (Computation).

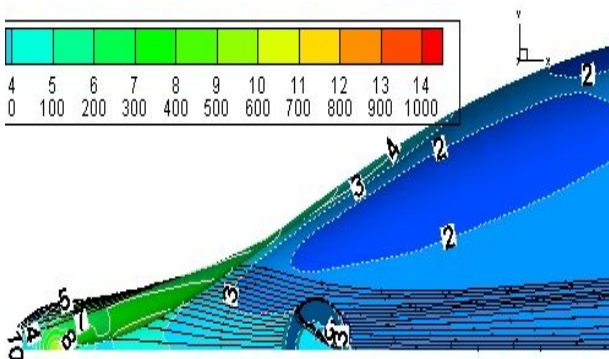


Fig. 7. Limiting streamlines and pressure distribution around a hole at the opening condition detached the STL from a vessel (Computation).

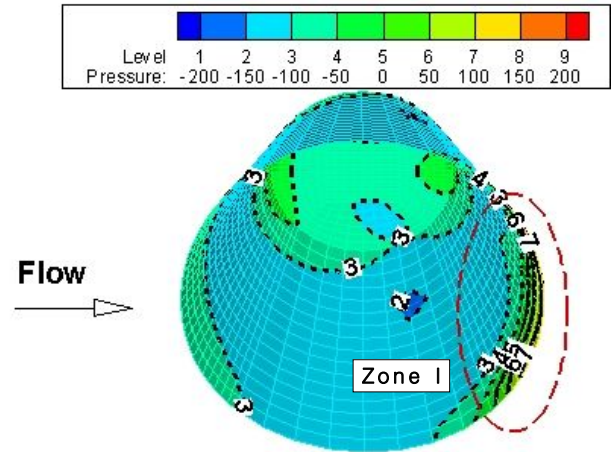


Fig. 8. Detailed cause analyses for the resistance increase using pressure distributions at the opening condition detached the STL from a vessel (Computation)

Table 3. Comparison of resistance coefficients

	Bare-Hull	%	Opening Condition	%
$C_F \times 10^{-3}$	3.2434	100.0	3.2287	99.5
$C_P \times 10^{-3}$	0.6932	100.0	0.7202	103.9
$C_T \times 10^{-3}$	3.9366	100.0	3.9489	100.3

Fig. 9는 나선과 오프닝 상태에 대한 프로펠러 면에서의 반류분포를 비교한 것이다. 점선의 원은 프로펠러 위치를 나타낸 것으로 모형 프로펠러의 직경은 190 mm 이다. 오프닝의 경우 스케그 내부에서 유입되는 유속이 조금 느려짐을 보여주나 자항성능을 크게 바꿀 만큼의 양은 아니라고 판단된다.

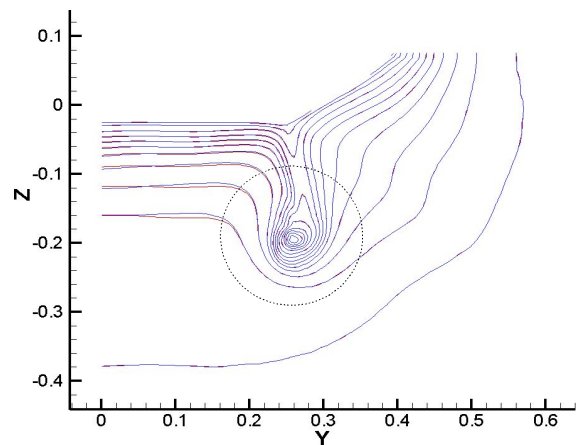


Fig. 9. Comparison of computational velocity components in the propeller plane(Blue: Bare Hull, Red: Opening Condition).



### 3. 모형시험

나선 상태와 오프닝 상태에서 저항과 자항시험을 수행하였다. 시험은 오프닝 상태를 재현하기 전인 나선상태에 대하여 먼저 수행을 한 후에, Fig. 10과 같이 오프닝 상태를 재현하여 동일 항목에 대한 모형시험을 수행하였다. 저항과 자항 해석은 ITTC-1978 해석법을 사용하였다.

Fig. 10은 시험에 사용된 모형선이며, STL이 없는 오프닝 상태를 재현한 것이다. 모형선은 1/40의 축척비로 제작되었다. 개구부의 형상은 Fig. 2의 실선치수를 모형선 크기로 재현하였다. Fig. 10의 튜브(tube)는 개구부 내에 형성된 공기층을 제거하기 위하여 설치하였다.



Fig. 10. A ship model.

속도영역 구간 별로 저항성능의 변화를 정성적으로 예측하기 위해서 오프닝 부분은 투명한 아크릴로 제작하였다. 아크릴 내부에는 터프트를 부착하여 유동현상을 가시화 하였다. 터프트는 Fig. 11과 같이 유체 유입부와 반대편을 포함하여 총 6군데에 흡수 방향으로 부착하였다.

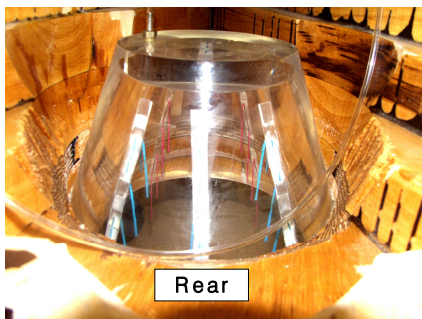


Fig. 11. Tuft adhered to the inner of the opening for flow visualization.

#### 3.1 유동가시화

나선 상태와 오프닝 상태에 대한 저항성능의 간접적 평가를 위해서 유동가시화를 수행하였다. 붉은색 터프트는 유입

유동의 움직임을 보기 위해서 부착하였고, 푸른색 터프트는 회전흐름을 분석하기 위해서 부착하였다. Fig. 12는 설계속도 근처에서 터프트 법을 사용하여 내부유동을 촬영한 것이다. 중심면의 Zone I은 교란 없이 직선에 가까운 유동이 유입되는 것을 확인하였다. Zone II와 III은 유동이 오프닝의 끝단에 부딪쳐서 회전류가 발생하는 것을 보여주고 있다. 푸른색 터프트의 치짐 정도로 볼 때 회전유동의 강도는 작은 것으로 예상된다.



Fig. 12. Flow patterns of the inner part at the opening condition detached the STL from a vessel (Experiment).

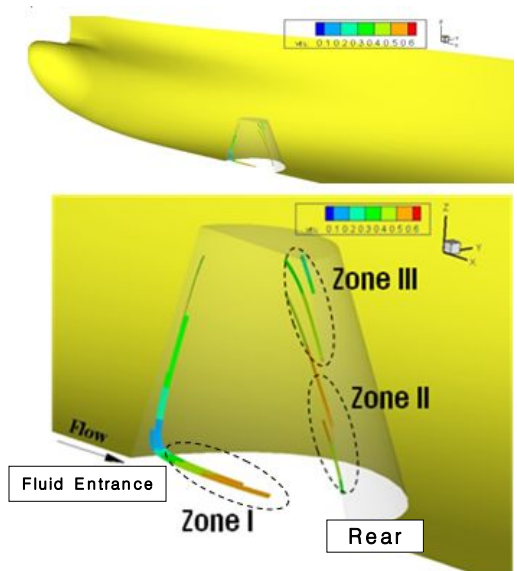


Fig. 13. Flow patterns of the inner part at the opening condition detached the STL from a vessel (Computation).

Fig. 13은 수치해석에 의한 것으로, 시험결과와 비교목적으로 수행되었다. Zone I에서는 시험결과와 동일한 현상을

## 일반상선의 선수 개구부가 저항 및 자항성능에 미치는 영향

보여주었다. Zone II와 III은 회전흐름이 발생되며, Zone I의 유속세기 보다는 약해진 흐름을 보여주었다. 특히, Zone III에서는 유속의 세기가 많이 작아진 결과를 나타내었으며, 이는 Fig. 11에서 터프트의 처짐 정도와 정성적으로 일치함을 보여주었다.

### 3.2 저항시험

저항시험 중에는 오프닝에 의한 자세변화를 조사하기 위해서 선수미에서의 침하(Sinkage) 량을 계측하였다. Fig. 14에서는 나선 상태와 오프닝 상태에서의 침하량을 비교 하였다.(+는 정수상태에서 침하, -는 부양을 나타냄) 저속에서 고속영역까지 오프닝 상태에서의 선수부 침하량이 나선 상태보다 다소 작은 값을 보여주고 있다. 그러나 이 정도의 차이는 시험오차 범위라고 본다. 결론적으로 두 가지 조건에서의 선수미 침하량은 차이가 없는 것으로 판단된다.

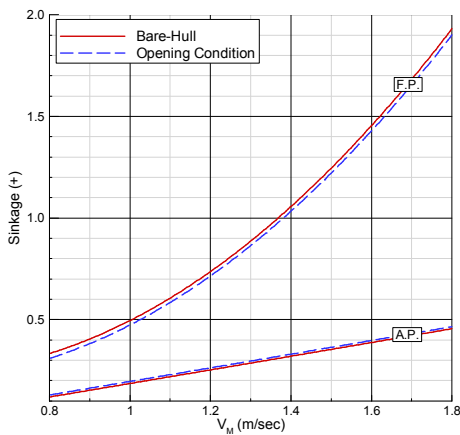


Fig. 14. Comparison of the sinkage at the fore and aft part for the two conditions.

Fig. 15는 나선상태와 오프닝 상태에 대한 모형선에서의 전 저항 계수를 나타낸 것이다. 중요한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 전속도 영역에서 나선상태 보다 오프닝 상태에서 저항이 증가하는 것을 보여주었다.
- 두 가지 조건에서 속도영역 별로 저항 증가량은 차이를 보였다. 특히, 설계속도 근처에서 오프닝에 의한 저항이 가장 큰 차이를 보여주었다.

Fig. 16은 저속에서 고속영역까지 유효마력(EHP)을 비교한 것이다. 전 속도 영역에서 나선 상태보다 오프닝 상태에서 저항이 증가하는 것을 보여준다. 그리고 속도영역 별로 저

항의 증가량이 차이를 보이는 것이 특징이다. 즉, 오프닝으로 인한 저항의 증가량은 저속, 중속 그리고 고속영역에서 상대적으로 다른 차이를 보였으며, 그 양은 0.5%에서 3% 사이로 추정되었다.

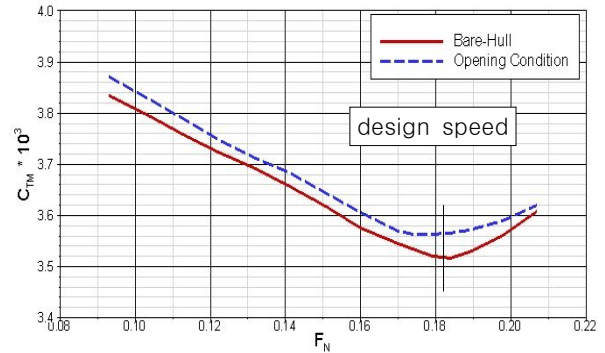


Fig. 15. Comparison of the total resistance coefficient for the two conditions.

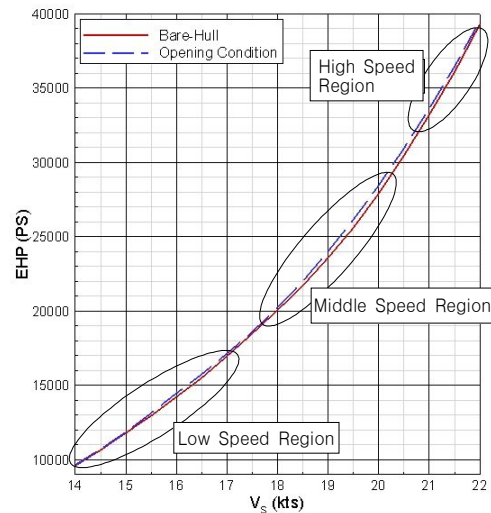


Fig. 16. Comparison of the EHP for the two conditions.

### 3.3 자항시험

Fig. 17은 두 가지 조건에 대한 자항요소를 비교한 것이다. 선체 효율(ETAH), 프로펠러 상대회전 효율(ETAR) 그리고 프로펠러 효율(ETAO) 세가지 모두  $\pm 1\%$  내에서 유사한 결과를 보여주었다. 이는 Fig. 9의 프로펠러 면에서의 유속분포가 나선과 오프닝 상태에서 크게 변하지 않은데 기인한 것으로 판단된다. 최종적으로 전달효율(ETAD) 역시 시험오차 범위 내에서 동일한 결과를 나타내었다.

Fig. 18은 제동마력(BHP)을 비교한 것이다. 자항성능이  $\pm 1\%$

내에서 거의 동일함으로 인해 Fig. 16에서 보여준 대로 오프닝으로 인한 저항증가량 만큼 제동마력도 증가함을 알 수 있다.

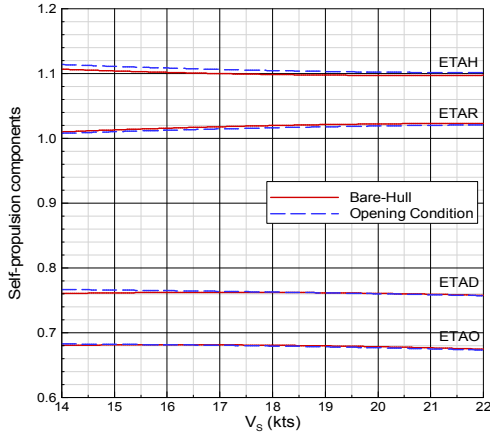


Fig. 17. Comparison of the self-propulsion components for the two conditions.

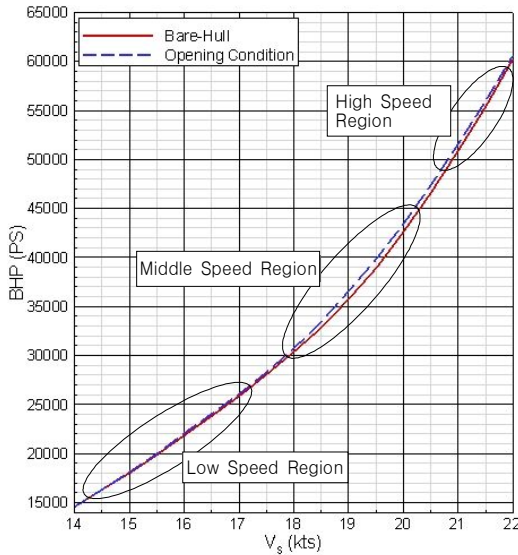


Fig. 18. Comparison of the BHP for the two Conditions.

Fig. 19는 선속 별로 오프닝 상태와 나선 상태에서의 속도 성능 차이를 나타낸 것이다. 즉 세로축의 (-)는 나선 상태 대비 오프닝 상태에서의 속도 성능 손실량을 나타낸 것이다. 오프닝으로 인해 저속, 중속 및 고속영역 별로 손실량의 차이가 있음을 알 수 있다.

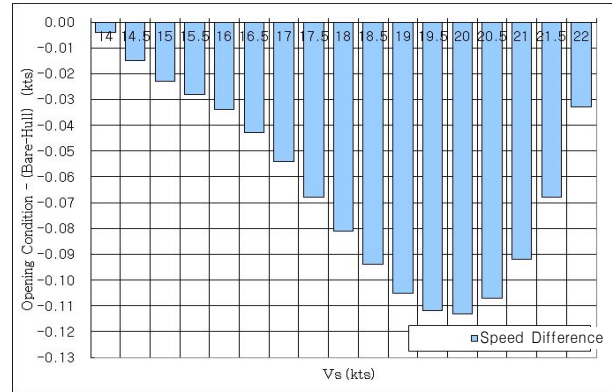


Fig. 19. Comparison of the speed loss for the two conditions.

#### 4. 결론

본 논문에서는 선저바닥이 오프닝이 된 경우에 대하여 수치해석과 모형시험을 통해서 속도성능을 평가하였다. 수치해석에서는 오프닝 주위의 유동특성과 저항 값을 비교분석하였다. 모형시험에서는 나선상태와 오프닝 상태에 대하여 각각 저항과 자항시험을 수행하여, 저항과 자항요소 변화에 대한 분석을 하였다. 본 연구를 통해서 내린 결론은 다음과 같다.

- 1) 수치해석과 모형시험 결과 오프닝으로 인한 속도 손실량은 예상했던 것보다 적었다.
- 2) 본 선박과 같이 선저 바닥에 오프닝이 있는 경우 나선상태 대비 속도 영역 별로 마력 증가량 추정이 가능하였다.
- 3) 크기가 다른 선박의 경우에도 선저 바닥에 오프닝이 있는 경우 마력증가량을 고려한 속도성능 추정이 가능하였다.
- 4) 나선 상태와 오프닝 상태의 자항시험 결과 자항요소들은 거의 유사하여 최종 값인 준 추진효율 계수는 거의 동일하였다.

#### References

[1] Kim, H. T., H. T. Kim and S. H. Van(2007), Numerical Analysis of Flow Characteristics of a Twin-Skeg Container Ship with Variation of Stern Hull Shape, Journal of SNAK, Vol. 44, No. 6, pp. 551-563.

[2] Kim, J., I. R. Park, K. S. Kim, and S. H. Van(2005), RANS Computation of Turbulent Free Surface Flow around a Self Propelled KLNG Carrier, Journal of SNAK, Vol. 42, No. 6, pp. 304-312.

[3] Kim S. P., J. J. Park, D. S. Jun, Y. S. Kim and C. J.

일반상선의 선수 개구부가 저항 및 자항성능에 미치는 영향

- Lee(2006a), A Development of New Device for Bow Thruster Tunnel Grids, Journal of SNAK, Vol. 43, No. 3, pp. 583-592.
- [4] Kim, J. J., K. J. Paik, Y. C. Lee and H. T. Kim(2006b), A Numerical Study of Turbulent Viscous Flow around a Self Propelled Ship, Proceeding of the Annual Spring Meeting, SNAK, pp. 548-557.
- [5] Hino, T.(2005), Proc. Of CFD Workshop 2005, Tokyo, Japan
- [6] Park, D. W., M. K. Kim, S. H. Chung and Y. K. Chung (2007), Stern Flow Analysis and Design Practice for the Improvement of Self-propulsion Performance of Twin-skeg ships, PRADS 2007, Houston, Vol. 2, pp. 981-988.

---

원고접수일 : 2013년 10월 01일

원고수정일 : 2013년 12월 30일 (1차)

2014년 01월 28일 (2차)

게재확정일 : 2014년 02월 25일