

Smart Harbor Crane Ship의 저항 추정

신현경^{1,†} · 김민수¹ · 정원진¹ · 하용확¹
울산대학교 조선해양공학부¹

Estimation of Resistance of Smart Harbor Crane Ship

Hyunkyung Shin^{1,†} · Min-Su Kim¹ · Won Jin Jeong¹ · Yong Hwak Ha¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan¹

Abstract

Recently, with increasing container ships' volume continuously, the conceptual design "Smart Harbor" of newly logistics processing system has been suggested. It is necessary to estimate resistance and horsepower for the selection of an appropriate propulsor at the initial design stage of Smart Harbor. In this study, CFD and the circulating water channel of the University of Ulsan are employed for estimating the resistance of the Smart Harbor Crane Ship with 1/100 scaled model. Two turbulent models are used. One is realizable $k-\epsilon$ and the other is Reynolds stress turbulence model. In addition, the effects of the change in y^+ and the number of meshes are considered during analysing.

Keywords : Smart Harbor(스마트 하버), CFD(전산유체역학), Circulating Water Channel(회류수조), Resistance(저항), Crane Ship(크레인선)

1. 서론

최근 초대형 컨테이너선들이 증가함에 따라 이를 효율적으로 처리할 수 있는 새로운 항만물류 시스템이 미래 경쟁력의 요인이 될 전망이다. 최근 연구되고 있는 Smart Harbor 또한 한 예라고 할 수 있다. Smart Harbor는 육상의 부두를 해상으로 옮긴 것으로 수심이 얇은 항구나 지형적인 제약을 극복할 수 있고 고속양하역 시스템으로 인해 경쟁력을 키울 수 있다. 이러한 고속양하역이 가능한 Smart Harbor Crane Ship의 추진기관 선정에 저항 및 마력 추정은 Smart Harbor 기본설계를 위한 필수요건이다.

저항 추정을 위해서는 여러 가지 방법이 있는데, 모형 시험을 통하여 선박의 저항을 구하는 것이 가장 일반화 된 방법으로 사용되며, 최근에는 컴퓨터의 발전으로 CFD를 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.(Kim, et al. 2007) CFD는 경제적이고 시간적인 면에서 실험적 추정방법에 비해 이점을 지니고 있다. 이에 힘입어 본 연구에서 Smart Harbor의 Crane Ship 저항추정에 CFD를 이용하였다.

CFD를 이용한 저항추정에 있어서 격자민감도에 따라 벽 근처의 점성영향을 해석하기 위한 무차원 변수인 y^+ 의 크기 변화를 달리하며 저항을 측정하였고, 격자개수 변화, 속도변화에 따른 각각의 저항도 측정하였다.

CFD를 이용해 구한 저항 값을 회류수조에서 실험한 저항 값

과 비교하였다. 모형선 실험은 울산대학교 조선해양공학 시험동의 회류수조에서 1/100의 크기의 모형선을 제작, 실험하여 저항 값을 도출하였다.

Smart Harbor는 비교적 작업장까지 거리가 짧기 때문에 기본적인 바지선의 선수선미에 30° 경사각을 주어 저항을 줄여 주는 것으로 선형이 결정되었다.

2. Crane Ship의 제원

본 연구에서는 1/100의 축척비를 이용하였으며 제원은 Table 1과 같다. Fig. 1은 Smart Harbor Crane Ship의 개략적인 모습을 보여주는 것이다.

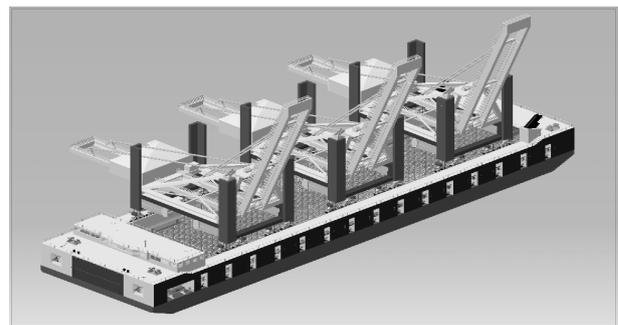


Fig. 1 Overview of the smart harbor crane ship concept

Table 1 Principal particulars of crane ship

	Ship	Model
Scale ratio	100	
Lpp (m)	150	1.5
B (m)	40	0.4
T (m)	4.2	0.042
Speed (m/s)	5.144	0.514
Wetted surface area (m ²)	7269	0.727
▽ (m ³)	23789	0.024
C _b	0.944	
Froude No.	0.1341	
Reynolds No.	6.774 × 10 ⁸	6.488 × 10 ⁵

3. CFD를 이용한 저항계수 추정

본 연구에서는 CFD를 이용한 저항 값 추정에 있어서 해석 모델에 따라 크게 2가지 Case로 구분하였으며 세부적으로는 y⁺의 크기, 격자개수, 속도의 차이에 따른 저항계수를 도출하였다.

3.1 수치해석

본 연구에서 Crane Ship의 저항계산을 위한 3차원 비압축성 비정상 유동에 관한 지배방정식인 연속방정식과 RANS(Reynolds Averaged Navier–Stokes) 방정식은 직교좌표계에서 다음 식으로 표현된다.

– 연속방정식(continuity equation)

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

– Reynolds Averaged Navier–Stokes equation

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \tag{2}$$

U_i, P등은 모두 시간 평균화된 항이며 아래첨자는 텐서표시법을 뜻한다.

본 연구에서는 설계목적으로 선체 주위의 유동해석 및 저항추정에서 좋은 결과를 주는 것으로 알려진 Realizable k-ε을 사용하였다.(Boo, et al. 2003) 그리고 계산시간은 좀 더 오래 걸리지만 정도 높은 결과를 도출하는 RSM(Reynolds stress model)을 사용하여 정도 높은 결과도 추정해 보았다.

속도와 압력연성 방법 (velocity–pressure coupling method)에 의한 운동량 방정식은 압력장이 주어지면 유체유동의 해를 계산

한다. 그러나 이때 사용되어질 입력장은 유체유동의 해를 계산하기 위한 알맞은 값이라고는 볼 수 없다. 따라서 간접적으로나마 압력장을 구하는 SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) 계열의 유한체적법을 본 연구에서는 사용하였다.(Kim, et al., 2000) 대류항 이산화는 2차 upwind method를 사용하여 유한체적들 간의 접합면에서의 미지량 ϕ에 대해 이산화하였다.

벽면조건에 대해서는 자유 수면을 고려하여 정체점, 분리점, 재부착, 고압력구배 유동이 생기는 유동에 결과를 향상시킬 수 있는 non-equilibrium wall function을 사용하였다.

난류 유동의 벽 경계의 성공적인 예측은 벽 근처 범위 유동을 정확하게 표현하는 것이 중요하다. 그러기 위해서는 벽과 “Fully Turbulent” 범위 사이의 점성영향을 해석하여야 한다. 이러한 해석을 위해 standard 또는 non-equilibrium wall functions를 사용하는데 이러한 함수를 사용하기 위해서는 벽에서의 첫 번째 격자 중심이 log-law layer y⁺ ≈ 30 ~ 300에 위치하여야 한다. 여기서 y⁺는 벽 근처의 점성영향을 해석하기 위해 벽근처의 국부적인 Re를 표현하는 무차원 변수로 y⁺를 기본으로 첫 번째 격자가 놓인 위치를 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \tag{3}$$

여기서 y는 벽으로부터 격자가 놓이는 첫 번째 위치,

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \text{ Frictional Velocity,}$$

$$\tau_w = \text{Shear Stress at the wall,}$$

$$\rho = \text{Density, } \nu = \text{Kinematic Viscosity}$$

3.2 선체 표면 모델링 및 격자 생성

선체 표면은 격자 생성 프로그램 Gambit을 이용하여 Modeling 하였다. Fig. 2는 CFD해석에 이용할 Crane Ship의 선체표면을 모델링 한 것이다.

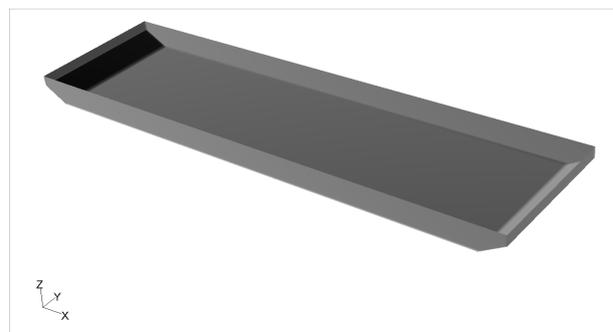


Fig. 2 Hull surface modeling

수치계산을 위한 기본 좌표로는 선체 길이 방향을 x축, 선체의 폭방향을 y축, 연직 상방향을 z축으로 사용하였으며, 좌표계의 원

점은 A.P., 선체 중심면, 수선면으로 정하였다. 격자계는 선체주위 유동 해석에 많이 사용되고 있는 O-H topology 형태를 사용하였고(Kim, et al., 2007) 계산 영역의 범위는 $-2.5L \leq x \leq 2.5L$, $0 \leq y \leq 1.5L$, $-1.5L \leq z \leq 0$ 로 하였다. 격자를 생성할 때에는 블럭을 여러 개로 나누는 다중블럭 격자계를 이용함으로써 블럭 interface에서의 수치해석 정도를 유지하였다.(Kim, et al., 2009)

CFD의 신뢰성을 보여주기 위해 종류를 달리하여 격자계를 구성하였다. 우선 CFD 해석에 있어서 영향을 끼치는 y^+ 를 비교하기 위해 y^+ 의 값을 60, 120으로 구분해서 격자를 구성하였다. 또한 $y^+(60, 120)$ 을 기준으로 격자수를 10만개, 28만개, 76만개, 214만개로 나누어 격자를 구성하였다. 자유수면의 처리방식은 수면 위 공기 영역까지 격자계를 생성하고 수렴성을 보장하기 위해 자유수면 근처의 격자 개수를 다른 곳 보다 좀 더 조밀하게 구성하였다.

Fig. 3은 자유수면을 고려한 격자계로 공기층까지 격자계를 구성하고 수선면 쪽으로 격자를 조밀하게 분포한 모습이다.

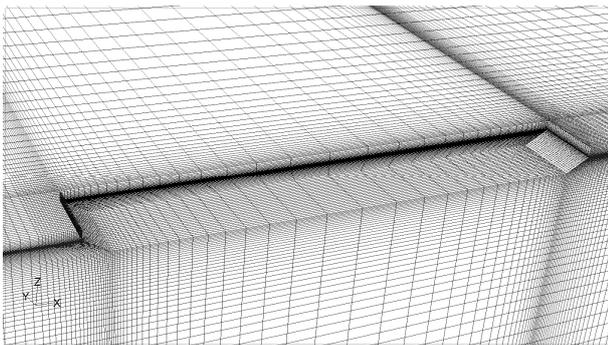


Fig. 3 Grid system with the free surface

3.3 경계조건

경계조건은 공기층의 상방향부분, 수직중심면, 바깥면에 대해 대칭조건(symmetry boundary condition)(Fig. 4에서 Top, Center, Side), 유체가 들어오는 면은 유입압력 조건(pressure inlet condition)(Fig. 4에서 inlet), 유체가 나가는 면은 똑같이 유출압력 조건(pressure outlet condition)(Fig. 4에서 Outlet)의 경계조건을 주었다.

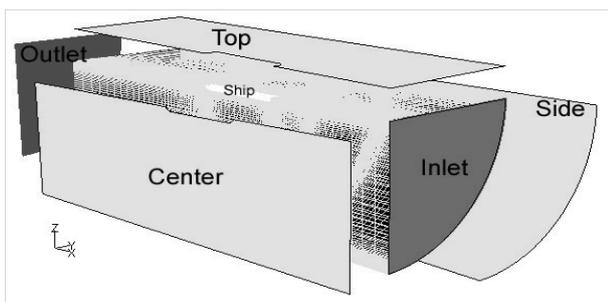


Fig. 4 Division face for boundary condition

4. 회류수조실험을 통한 저항값 추정

회류수조에서 모형선을 고정시키고 수조 내의 물을 일정속도로 회전시켜 유속 및 저항값을 측정하였다.

회류수조내 물의 흐름에 따라 생기는 유속분포는 표면으로 갈수록 유속분포가 느려지게 되는데 이를 보완하기 위하여 표면 가속장치 사용하였다. 또한 실선의 선속을 5Knot에서 13Knot까지 1Knot씩 증가시키면서 저항값을 측정하였다. Table 2는 회류수조의 기본적인 제원이다. Fig. 5는 울산대학교 조선해양공학시험동의 회류수조 시험장치 모습이다. 실험값은 실험의 반복성을 점검하기위해 5번 실험하여 실험의 반복성을 확인하였고, 실험결과에는 큰 오차가 없음을 확인하였다. 그리고 보다 정확한 실험결과를 위하여 반복 실험을 통하여 나온 측정값의 평균을 사용하였다.

Table 2 Principal particulars of circulating water channel(CWC)

Whole Body	1,150(W) × 5,110(H) × 10,700(H)mm app.
Measuring Body	1,000(W) × 1,250(H) × 3,000(H)mm app.
Water Velocity	1.5m/s max
Driving Motor	3phase 15.0kW × 2ea (1750RPM max.)



Fig. 5 Circulating water channel of the university of ulsan

5. 계산 결과

본 연구에서는 CFD의 결과와 울산대학교 회류수조에서 실험한 실험값과 비교하였다. CFD 계산에서 사용한 수렴 기준은 C_D 값이 일정한 값이 나올 때를 기준으로 하였다. 비정상유동으로 해석하였고 Core2 quad로 약 10일~30일 정도의 시간이 소요되었다. Realizable k-ε 모델을 사용한 경우에는 약 10일 정도 소요되었고, RSM을 사용한 경우는 약 30일 정도 소요되었다. 값의 비교를 위해 CFD와 회류수조 실험값을 무차원화 하여 전저항 계수로 비교하였다.

5.1 y^+ 와 격자수에 따른 저항값 비교

RSM에 비해 계산시간이 짧은 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용한 모델을 이용하여 y^+ 를 60, 120으로 구분하고 이 두 경우에 대해 해석 가능한 범위에서 격자수를 10만개, 28만개, 76만개, 214만개로 분류하여 값을 구하였다. 이는 x, y, z 방향으로 mesh 수를 $\sqrt{2}$ 배 증가시켜 전저항의 수렴성을 확인하고자 한 것이다.

이때의 선속은 모형선의 속도 0.5144m/s이다. $y^+=60$ 일 때와 $y^+=120$ 일 때 격자수를 달리하며 구한 결과 값은 Table 3, Table 4와 같다.

Table 3 Comparison between the total resistance coefficients with total grid number variation at $y^+=60$

$y^+=60$ (Total grid number)	Resistance (N)	$C_T \times 10^2$
10만개	1.3842	1.4712
28만개	1.0271	1.0916
76만개	0.9246	0.9827
214만개	0.9030	0.9597

Table 4 Comparison between the total resistance coefficients with total grid number variation at $y^+=120$

$y^+=120$ (Total grid number)	Resistance (N)	$C_T \times 10^2$
10만개	1.4721	1.5650
28만개	1.1115	1.1850
76만개	1.0223	1.0860
214만개	1.0132	1.0760

Fig. 6에서 보듯이 격자개수의 증가에 따라 저항값이 작아지고, 값이 수렴하려는 것을 볼 수 있었으며 y^+ 가 120일 때 보다 60일 때 작은 값을 보이는 것을 알 수 있었다. 보통 log-law layer $y^+ \approx 30 \sim 300$ 을 말하지만 100이하의 값을 이용하도록 권장한다. 따라서 RSM은 $y^+=60$ 일 때 그리고 계산하는 컴퓨터의 사양을 고려하여 격자개수는 76만개로 결정하였다.

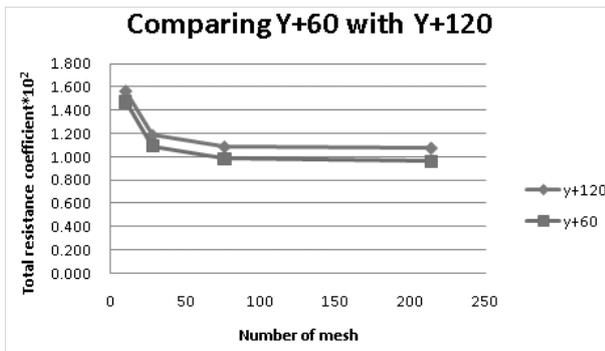


Fig. 6 Comparison of C_T with the number of meshes in $y^+=60$ and $y^+=120$

5.2 속도별 전저항계수 비교

5.1의 결과를 바탕으로 $y^+=60$ 일 때 격자수 76만개의 Case에 대해 실선의 속도 5knot~13knot를 모형선 속도로 변환하여 계산하였다. 회류수조실험에서 1~4knot에서는 측정된 저항값이 계속 오차 및 회류수조의 진동으로 인해 불균일하여 제외하였다. 실험 값은 속도 별로 5번씩의 실험을 통해 구한 평균값을 이용하였다. 구한 값으로는 Table 5와 같다. Fig. 7은 CFD와, 실험에서 구한 속도별 전 저항 계수를 그래프로 나타내어 비교한 것이다.

Table 5 Comparison of C_T with velocity

Velocity (m/s)	Exp $C_T \times 10^2$	CFD (Realizable $k-\epsilon$) $C_T \times 10^2$	CFD (RSM) $C_T \times 10^2$
0.2572	1.1320	0.9505	1.0893
0.3086	1.1330	0.9693	1.0590
0.3600	1.2180	0.9453	1.1000
0.4115	1.1360	0.9021	1.1056
0.4629	1.1410	0.9567	1.1158
0.5144	1.1280	0.9827	1.1179
0.5658	1.1500	0.9725	1.1235
0.6172	1.1830	0.9710	1.0040
0.6687	1.1930	0.9846	1.1580

실험 결과 값과의 오차 비율은 속도별로 오차를 보면 Realizable $k-\epsilon$ 의 경우 15%~29%, RSM의 경우 1%~18%로 RSM이 Realizable $k-\epsilon$ 보다 정도 높은 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

Figs. 8~9는 선속이 10knot일 때 CFD와 실험을 통한 선수 부근에서의 파형을 나타낸 것으로 비슷한 파형을 표현하고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig 9.에서는 선속에 계속적인 파가 생성되는 것을 볼 수 있는데 이는 회류수조의 Blockage 효과 때문일 것으로 추측된다. Fig. 10은 선속이 10knot일 때 선체주위의 유체 속도 분포를 나타낸 것이다. 붉은색이 10knot 이고 파란색이 0knot를 나타낸다. Fig. 11는 선속이 10knot일 때 선체주위의 파형을 좌표로 나타낸 것이다. 이번 실험에서는 선체 주위 파고를 측정하지 않아 실험과의 비교는 어려우나 Fig. 9에서와 같이 시각적으로는 비슷한 형상을 보이는 것을 알 수 있었다.

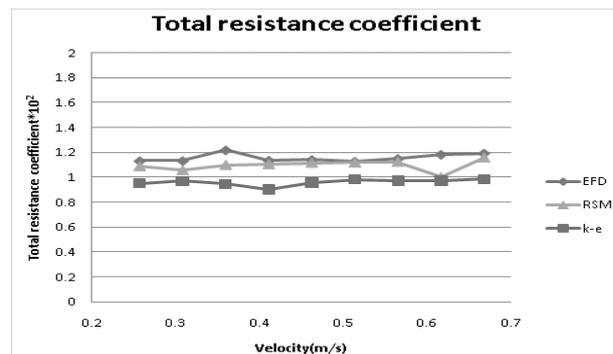


Fig. 7 Total resistance coefficient - Velocity

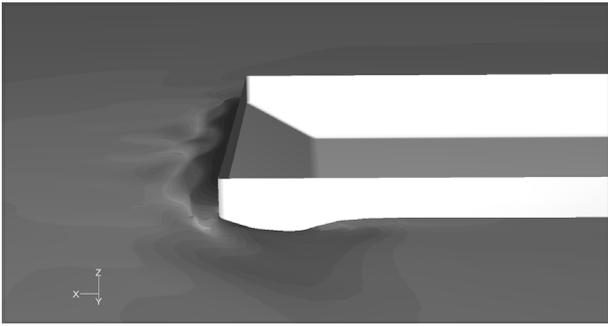


Fig. 8 Wave profile around the bow by CFD

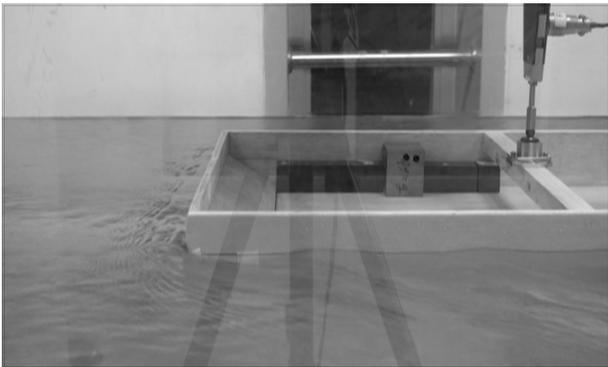


Fig. 9 Wave profile around the bow in the model test

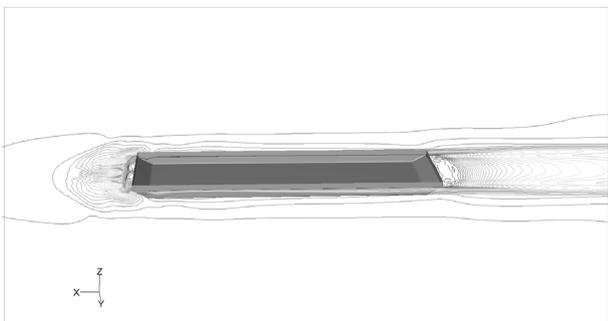


Fig. 10 Fluid velocity distribution on free surface by CFD

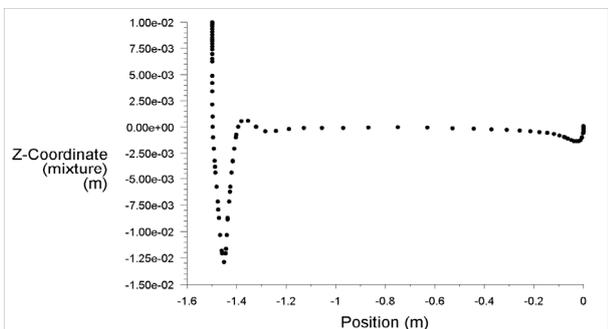


Fig. 11 Plot of wave profile around the hull by CFD

6. 결 언

본 연구는 고속 양하역을 위한 새로운 개념인 Smart Harbor Crane Ship의 저항을 도출하는데 의의가 있으며, 모형선 실험 및

CFD를 통한 저항추정을 해 보았다.

CFD 저항 추정에 있어서는 두 가지 난류모형을 이용해 해석 해 보았고 실험과의 비교를 위해 실선의 크기는 1/100 scale로 하고, y^+ , 격자개수, 속도를 달리하여 구하였다.

그 결과 난류모형을 Realizable $k-\epsilon$ 으로 해석한 경우 y^+ 값이 60일 때가 120일 때 보다 모든 격자 개수에서 작은 값이 나왔고, 격자 개수가 많아짐에 따라 저항과 C_T 가 수렴하는 것을 알 수 있었다. Realizable $k-\epsilon$ 으로 선 해석을 하여 y^+ 와 격자개수에 따른 경향을 확인하고, 격자개수 76만개와 214만개의 전저항계수값에 큰 차이가 없어 해석 컴퓨터와 속도를 고려하여 76만개의 격자개수로 RSM 난류모형을 해석하였다.

RSM 난류모형의 해석결과 실험값과 유사한 값을 얻을 수 있었으며, Realizable $k-\epsilon$ 난류모형보다 정도높은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 속도를 달리하며 저항을 추정하였을 때는 실험값과 오차가 거의 없는 것을 확인 할 수 있었다.

이렇게 도출한 신개념 Smart Harbor Crane Ship의 저항을 이용하여 실선의 저항을 추정하고 최종적으로 마력추정을 통하는 것이 최종목표라 하겠다. 마력추정을 함에 있어 Barge선의 선박 특성을 유념하여 실선의 저항값과 마력추정값을 생각해야 하며 앞으로 Crane Ship에 관한 추가연구가 필요할 것이라 생각한다.

참 고 문 헌

- Boo, K.T. Han, J.M. Song, I.H. & Shin, S.C., 2003. Viscous Flow Analysis for the Rudder Section Using FLUENT Code. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(4), pp. 30-36.
- Kim, B.N. Kim, W.J. Kim, K.S. & Park, I.R., 2009. "The Comparison of Flow Simulation Results around a K LNG Model Ship" *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(3), pp. 219-231.
- Kim, H.J. Chun, H.H. & Choi, H.J., 2007. Development of CFD Based Stern Form Optimization Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(6), pp. 564-571.
- Kim, W.J. Kim, D.H. & Van, S.H., 2000. Development of Computational Methods for Viscous Flow around a Commercial Ship Using Finite-Volume Methods. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(4), pp. 19-30.
- Kim, K.S. Park, I.R. & Van, S.H., 2007. RANS Analysis for Obliquely towed KVLCC tanker with free surface. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44, pp. 27-35.



신현경

김민수

정원진

하용확