

# CFD를 이용한 표면 거칠기에 따른 선박의 저항 성능 추정에 관한 연구

석준<sup>1</sup>·박종찬<sup>2,†</sup>·신명수<sup>3</sup>·김성용<sup>4</sup>  
중소조선연구원<sup>1</sup>  
부산대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트 연구소<sup>3</sup>  
Approval Center Korea, DNV-GL<sup>4</sup>

## A Study on Predicting Ship Resistance Performance due to Surface Roughness Using CFD

Jun Seok<sup>1</sup>·Jong-Chun Park<sup>2,†</sup>·Myung-Soo Shin<sup>3</sup>·Sung-Yong Kim<sup>4</sup>  
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding(RIMS)<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>2,†</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO)<sup>3</sup>  
Approval Center Korea, DNV-GL<sup>4</sup>

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.

In recent, shipping companies have made an enormous effort to improve the operation of vessel in various approaches, due to recession of shipping market and increasing competition among shipping companies. One of important parameters for improving the efficiency of vessel is the resistance performance that consist of friction and residual resistance. Especially, it is recognized that the friction resistance tends to be affected by conditions of vessel's surface and occupies approximately 70~90% of the total resistance for slow speed ships. In general, the surface of vessel is covered with various type of paint to reduce fouling and corrosion. As time goes by, however, it is so hull roughness would be increased by fouling over the wetted surface that anti-fouling paints, such as CDP(Controlled Depletion Paint), Tin-Free SPC(Self Polishing Co-polymer) or Foul Release, are applied evenly on the hull surface. Nevertheless, these anti-fouling paints could not prevent fouling absolutely. A fundamental study on evaluating ship resistance performance variation due to hull roughness has been performed using a commercial software, Star-CCM+, which solves the continuity and Navier-Stokes equations for incompressible and viscous flow. The results of present simulation for plate are compared with some experimental data available and the effect of surface roughness to ship resistance performance is discussed.

**Keywords** : CFD(전산유체역학), EEDI(선박제조연비지수), Friction resistance(마찰저항), Ship resistance(선체저항), Surface roughness (표면거칠기)

## 1. 서론

최근 해운 경기 침체와 더불어 해운사들간의 경쟁 심화로 인해 해운사들은 운항비 절감을 위한 방법들을 모색하고 있다. 또한 최근 EEDI(Energy Efficiency Design Index) 그리고 EEOI(Energy Efficiency Operational Indicator) 등 이산화탄소 배출과 관련된

국제적 환경 규제가 시작됨에 따라 이를 만족하기 위한 다양한 친환경 선박의 수요가 증가하고 있다 (Seok, et al., 2015).

운항비 절감과 환경 규제를 만족하기 위한 대표적인 방법으로는 선형 최적화를 통해 바람 및 파도의 영향을 최소화하는 방법, 선체 및 프로펠러에 부가물을 설치하는 방법, 선박의 건조 시 구조 최적화를 통해 선박의 무게를 감소시키는 방법, 운항 중 발생하는 폐열을 이용하는 방법 그리고 최적 항로 개발 등을 통한 에

너지 절감 방법 등이 있다 (ABS, 2013). 그러나 상술한 다양한 에너지 절감 방법을 적용하여 운항비 절감 효과를 얻기 위해서는 우선 선박의 성능을 정확히 파악하는 것이 중요하며, 특히 연료 비용 증가에 직접적인 영향을 끼치는 선박의 저항 성능은 중요한 요소 중 하나이다.

일반적으로 선박의 저항은 마찰저항과 잉여저항으로 구분할 수 있으며, 이 중 마찰저항은 선박의 선형에 따라 차이를 보이지만 일반적인 저속비대선의 경우 전체저항의 약 70~90%로 대부분을 차지한다 (ABS, 2013). 통상적으로 선박의 표면은 부식방지 및 저항감소를 위해 도장을 하여 선체가 매끈한 상태이지만 해수 중에 부양되어 있는 선박은 시간이 지남에 따라 Fig. 1과 같이 다양한 해양생물체들이 부착되는 오손(fouling)현상이나 선체 도장면의 부분적인 손상으로 인해 표면 거칠기(surface roughness)가 증가하며 이로 인해 마찰저항이 증가하게 된다 (<http://www.harsonic.net/professional-marine-offshore/>). 이런 마찰저항 증가는 선박의 유류비를 증가시키는 원인으로 이를 파악하기 위해 국내외에서 이론적 방법, 실험적 방법 그리고 수치 시뮬레이션을 이용한 방법 등을 통해 다양한 연구가 수행되고 있다. Kwon, et al. (1996)은 선박의 표면 거칠기에 관한 연구로 선박의 표면 거칠기를 통계 분석하여 표면 거칠기가 선박의 성능에 미치는 영향을 분석하고 표면 거칠기와 저항증가에 관한 추정식을 제안하였으며, Candries, et al. (2001)은 도료에 따른 표면 거칠기에 대한 연구로 알루미늄 평판과 SPC(Self Polishing Copolymer) 및 Foul Release가 도장된 알루미늄 평판의 표면 거칠기를 측정하고 예인수조를 이용한 평판 실험을 통해 도료에 따른 마찰저항 변화를 분석하였다. 또한, Schultz (2004; 2007)는 도료의 종류에 따른 오손의 영향에 관한 연구로 장기간 해수에 노출시킨 평판을 이용한 실험을 수행하여 오손으로 인한 저항 증가와 이로 인한 선박의 마력증가를 파악하였고, Izaguirre Alza, et al. (2010)은 평판의 저항성능에 관한 연구로 실리콘 페인트로 도장된 평판을 이용한 실험을 통해 평판의 저항 변화를 분석하였다. Jang, et al. (2010)은 표면 거칠기에 따른 평판의 마찰저항에 대한 연구로 SPC와 Foul Release가 도장된 각각의 평판에 대하여 표면 거칠기를 측정하고 이를 이용한 평판 실험을 통해 도료에 따른 평판의 마찰저항 증가를 파악하였으며, Park, et al. (2013)은 도료에 따른 평판의 항력 성능에 대한 연구로 방오 도료가 도장된 평판을 이용한 실험을 통해 도막 표면의 난류 경계층을 계측 및 분석하였다. 한편, Usta and Korkut (2013)는 다양한 종류의 알루미늄 플레이트를 이용한 실험과 수치 시뮬레이션을 통해 표면 거칠기에 따른 저항성능 변화를 비교 및 검증하였고, Demirel, et al. (2014)는 표면 거칠기 고려 방법에 관한 연구로 상용 수치 시뮬레이션 프로그램을 이용해 Schultz (2004)의 평판 실험과의 저항성능 비교를 수행하였다.

상술한 다양한 선행연구들 중 실험의 경우 표면 거칠기 재현 등의 문제로 모형선 실험을 이용한 표면 거칠기에 따른 저항성능 변화에 대한 연구는 미미하며, 일부 실선의 표면 거칠기 통계치 및 실선을 이용한 측정이 이루어지고 있다. 또한 수치 시뮬레이션의 경우 대부분의 수치 시뮬레이션이 평판을 이용한 수치 시물

레이션에 머물고 있으며 산업용 펌프 등과 같은 기계 장비들의 표면 거칠기를 고려한 해석 (Yun & Kim, 2014)이 시도되고 있지만 표면 거칠기를 고려한 선박의 저항성능 변화에 대한 연구는 미미하다.



Fig. 1 Fouling on hull surface

따라서, 본 연구에서는 표면 거칠기에 따른 선박의 저항성능 변화를 파악하기 위한 방법으로 수치 시뮬레이션의 적용 가능성을 확인하기 위해 상용 유동해석 프로그램 Star-CCM+를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 표면 거칠기를 고려한 평판 실험 (Jang, et al., 2010)의 결과와 비교하였다. 또한 실험과의 비교를 통해 검증된 방법을 이용하여 KCS(KRISO Container Ship 3600TEU) 선형의 표면 거칠기에 따른 저항성능 변화를 추정해보았다.

## 2. 선체 표면 거칠기

### 2.1 개요

일반적으로 국내 중-대형 조선소들은 도크(dock) 회전틀을 높이기 위해 도크에서 선박의 건조를 도크에서 완벽히 끝내지 않고 진수 후 안벽에서 의장품 공사 등의 마무리 작업을 하고 있다.

특히 액화가스운반선(LNG carrier), 시추선(drill ship) 등과 같은 특수선의 경우 진수 후 화물창 공사 혹은 의장장비 설치를 위하여 안벽기간이 약 1년 정도로 길며, 이로 인해 선체 및 프로펠러에 광범위한 오손이 발생한다. 오손의 발생은 기후 및 지역에 따라 차이가 크며, 특히 기온이 높은 여름철의 경우 겨울철에 비해 해양생물체가 많이 번식하기 때문에 오손이 많이 나타난다.

오손으로 인한 선박의 표면 거칠기 증가는 마찰저항을 증가시켜 선속을 저하시키는 요인이 되며, 특히 시운전 시 발생할 수 있는 선속저하를 막기 위해 시운전을 실시하기 전 선체 및 프로펠러에 발생한 오손을 제거해야한다 (ISO 15012, 2002).

또한 해양생물 부착으로 인한 오손의 발생을 줄이기 위해 선체에 다양한 방오 도료(anti-fouling paint)를 도포하며, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 환경호르몬으로 인한 생태계 교란 등의 이유로 유기주석화합물(TriButylTin, TBT)이 함유된 방오 도료를 규제함에 따라 TBT를 함유하지 않은 CDP(Controlled Depletion Paint) 및 Tin-Free SPC 방오 도료가 이용되고 있다. 또 최근에는 선박이 운항할 때 선체 표면에 발생하는 전단력에 의해 선체 표면에 부착된 해양생물체들이 제거되는 Foul Release 형 실리콘이 함유된 방오 도료가 개발되어 이용되고 있다 (ABS, 2007; Candries & Anderson, 2001; Paik, et al., 2013). 그러나 이런 방오 도료 역시 오손현상을 완벽히 해결할 수 없으며, Sulaiman, et al. (2010)의 연구에 의하면 CDP 도료의 평균 거칠기 증가량은  $40\mu\text{m}/\text{year}$ , SPC 도료는  $20\mu\text{m}/\text{year}$  그리고 Foul Release 도료는  $5\mu\text{m}/\text{year}$ 로 도료의 종류에 따라 차이는 있지만 시간이 경과함에 따라 표면 거칠기가 증가하는 경향을 보인다고 한다. 이처럼 시간이 지남에 따라 증가하는 오손을 제거하기 위해 선박은 주기적인 건선거(dry dock)가 필요하며, 오손을 줄일 수 있다면 건선거 기간을 최소화하여 유지보수 비용을 절감할 수 있을 것이다.

## 2.2 표면 거칠기 보정법

선박의 표면 거칠기에 따른 선속 저하 효과는 전술한 다양한 선형연구자들에 의해 연구되었으며, 특히 VLCC(Very Large Crude-oil Carrier)의 경우 표면 거칠기에 따라 선속이 0.35 ~ 1.07 노트까지 감소한다 (Kwon, 2003).

이처럼 선속에 영향을 주는 표면 거칠기를 고려하기 위해 ITTC-57 방법에서는 식 (1)과 같이 실선의 전체저항( $C_{TS}$ )을 계산 시 마찰저항( $C_{FS}$ )과 잉여저항( $C_{RS}$ ) 그리고 거칠기를 고려한 수정계수( $C_A$ )를 이용하며, 이 때 거칠기 수정계수는 배수량에 따라  $\pm 6.0E-4$ 의 범위 내의 값을 사용한다. 또한 ITTC-78 방법에서는 모형선-실선 상관관계로 식 (2)를 이용하여 거칠기를 고려하지만, 식 (2)는 모형선과 실선의 저항 차이를 보정하기 위해서 사용되는 모형선-실선 상관관계식으로 거칠기로 인한 저항 변화만을 고려하기에는 적합하지 않다. 반면 Townsin (1985)에 의해 제안된 식 (3)은 레이놀즈수( $R_e$ )의 영향을 포함하는 표면 거칠기 보정을 위한 식으로 거칠기 측정결과가 있다면 거칠기로

인한 마찰저항 증가량을 추정 할 수 있다. 식 (3)을 이용하여 거칠기 보정을 하는 경우에는, 거칠기에 대한 중복 보정을 피하기 위해 식 (2) 대신 식 (4)를 사용해야 한다.

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS} + C_A \quad (1)$$

$$C_A = \left[ 105 \left( \frac{k_s}{L_{PP}} \right)^{1/3} - 0.64 \right] \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$C_{\Delta f} = \left\{ \left[ 44 \left( \frac{k_s}{L_{PP}} \right)^{1/3} - 10 \times R_e^{-1/3} \right] + 0.125 \right\} \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$C_A = (5.68 - 0.61 \log R_e) \times 10^{-3} \quad (4)$$

이 때,  $L_{PP}$ 는 수선간장,  $k_s$ 는 Fig. 2와 같은 표면 거칠기 측정기 등을 이용해 측정된 평균 거칠기를 나타내며, 국제수조협회(International Towing Tank Conference, ITTC)에서는 별도의 거칠기 측정값이 없다면  $150\mu\text{m}$ 를 사용하도록 권장한다.



Fig. 2 Hull roughness analyzer(BMT)

선체 표면의 거칠기를 측정할 경우 측정된 거칠기를  $R_{t(50)}$ 이라 하며, 이는 Fig. 3과 같이 50 mm 구간에서 최대값과 최소값의 차이를 나타낸다. 또한 각각의 위치에서 측정된  $R_{t(50)}$ 의 평균을 MHR(Mean Hull Roughness)라 하며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, MHR은 다시 식 (6)과 같이 선체의 거칠기를 나타내는 대푯값인 AHR(Average Hull Roughness)로 나타낼 수 있다. 이 때,  $n$ 은 측정횟수,  $m$ 은 측정 지점의 수,  $w$ 는 가중치 함수(weight function)로 선체의 측정부분에 따라 가중치를 고려할 수 있지만 일반적으로 1이 이용된다 (Carlton, 2012).

$$MHR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{t(50)i} \quad (5)$$

$$AHR = \frac{\sum_{j=1}^m w_j (MHR)_j}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (6)$$

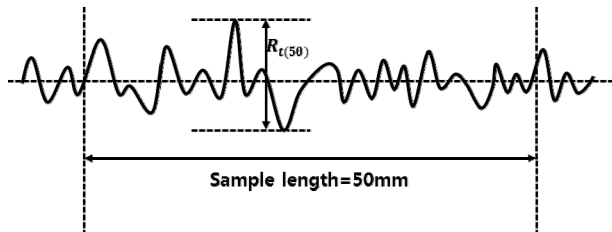


Fig. 3 Schematic of hull roughness parameter  $R_{t(50)}$

### 3. 수치 시뮬레이션 방법 및 조건

#### 3.1 수치 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 3차원 비정상, 비압축성의 점성 유동을 고려하기 위해 식 (7), (8)과 같이 연속 방정식과 운동량 방정식을 지배 방정식으로 이용하였다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial (U_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + B \quad (8)$$

여기서  $U$ 는 평균속도벡터,  $x$ 는 좌표계,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 밀도,  $p$ 는 압력,  $\mu$ 는 점성계수,  $\overline{\rho u_i u_j}$ 는 난류전단응력으로 난류모델에 의해 결정되며  $B$ 는 체적력이다. 본 연구에서는 다양한 난류 모델 중  $SST k-\omega$  난류모델 (Menter, 1994)을 이용하였으며, 이 모델은  $k-\epsilon$  난류모델과 더불어 공학문제에 널리 이용되는  $k-\omega$  난류모델을 변형한 형태로 경계층 내부유동은  $k-\omega$  난류모델을, 경계층 외부유동은  $k-\epsilon$  난류모델을 이용하여 수치 계산을 수행한다.

상술한 지배방정식은 유한체적법(Finite-Volume method, FVM)에 의해 이산화되며 확산항 및 대류항은 2차 상류차분법(upwind)이 각각 적용되었으며, 시간 적분은 2차의 음해법이, 그리고 압력과 속도의 연성(pressure-velocity coupling)에는 SIMPLE-type (semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 알고리즘이 각각 적용되었다.

표면 거칠기의 경우 식 (9)와 같이 Star CCM+에서 제공하는 Roughness height를 고려하는 방법을 이용하였으며, 이 때  $\kappa$ 는 Von Karman 상수로 0.42,  $E'$ 는 벽함수 계수로 9.0 그리고  $f$ 는

거칠기 함수로 식 (10)과 같이 거칠기에 따라 구분되며,  $B$ 는 0,  $C$ 는 0.253,  $R^+$ 는 거칠기 매개 변수로  $R_{smooth}^+$ 는 2.25,  $R_{rough}^+$ 는 90 그리고  $a$ 는 식 (12)와 같다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E' Y^+) \quad (9)$$

$$E' = \frac{E}{f} \quad (10)$$

$$f = \begin{cases} 1 & \text{for } R^+ < R_{smooth}^+ \\ \left[ B \left( \frac{R^+ - R_{smooth}^+}{R_{rough}^+ - R_{smooth}^+} \right) + CR^+ \right]^a & \text{for } R_{smooth}^+ < R^+ < R_{rough}^+ \\ B + CR^+ & \text{for } R^+ > R_{rough}^+ \end{cases} \quad (11)$$

$$a = \sin \left[ \frac{\pi}{2} \frac{\log(R^+ / R_{smooth}^+)}{\log(R_{rough}^+ / R_{smooth}^+)} \right] \quad (12)$$

#### 3.2 초기 조건 및 경계 조건

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 Jang, et al. (2010)의 실험과 동일한 길이 6.5 m, 두께 0.1 m 그리고 깊이 1.5 m의 평판을 이용하였으며, 상세 제원은 Table 1과 같다. 선수미부분에 포물선 형태의 물가름부(선수)와 물모음부(선미)가 존재하며 각각의 길이는 0.25 m로 동일하다. 다만 수치 시뮬레이션 시 격자수 증가로 인한 계산 시간 증가를 고려하여 평판과 동일한 크기로 두께의 절반을 모델링 한 뒤 대칭(symmetry) 조건을 적용하였다.

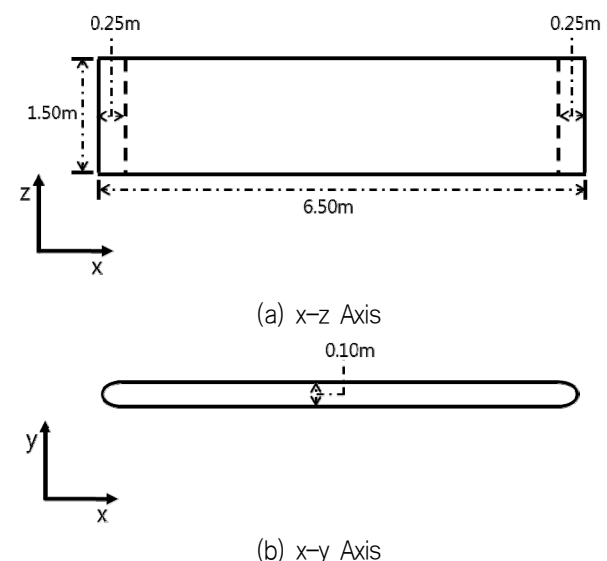


Fig. 4 Schematic geometry of plate

Table 1 Computational parameter for numerical simulation of plate

Item	Scale ratio	Reynolds number			Length (m)	Breadth (m)	Depth (m)	Draft (m)
		3	4	5				
Plate	1.0	1.95E+07	2.60E+07	3.25E+07	6.5	0.1	1.5	1.0

수치 시뮬레이션을 위한 계산영역은 Fig. 5(a)와 같이 길이 방향  $3.5L$ , 두께 방향  $1.5L$  그리고 높이 방향  $2.5L$ 을 각각 설정하였으며, 이 때  $L$ 은 평판의 길이이다. 각 영역의 경계조건은 상용소프트웨어 STAR-CCM+에서 제공하는 경계조건을 이용하여 Fig. 5(b)와 같이 입구경계에는 속도유입조건인 Velocity inlet 조건을, 출구경계에는 유출조건인 Pressure outlet 조건을, 중심면은 Symmetry 조건, 평판은 Wall(No-slip) 조건 그리고 나머지 부분은 Wall(free-slip) 조건을 이용하였으며 벽함수가 이용되었다.

표면 거칠기의 경우 일반적으로 선박에 널리 사용되고 있는 Ti n-free SPC 방오 도료의 실험값을 이용하였다. 단, 실험값으로 명시된  $R_q$ (root mean square)의 평균값을  $R_t$ (peak to Valley)로 추정 변환하여  $16.5\mu\text{m}$ 를 사용하였으며(<http://frictioncalculator.com/surface-roughness>), 추가적으로 매끄러운 선박도료의 표면 거칠기 값으로 알려진  $50.0\mu\text{m}$ 를 고려하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다 (Mollad, et al., 2011).

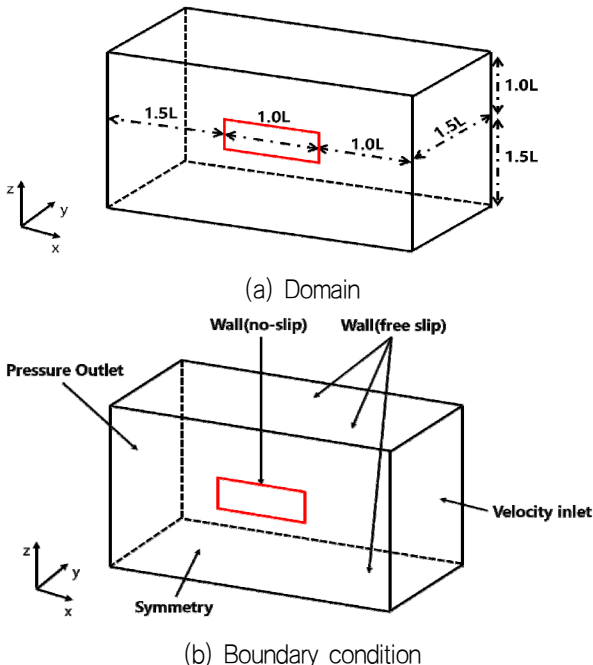


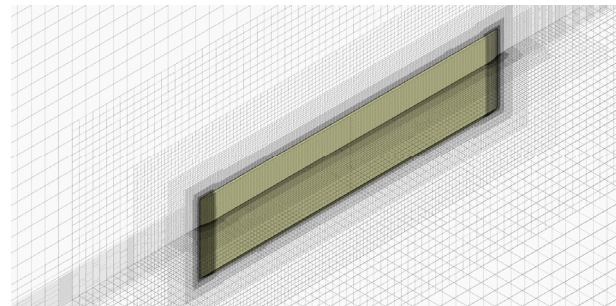
Fig. 5 Computational domain & boundary condition for numerical simulation of plate

수치 시뮬레이션은 비정상상태로 2차 정확도의 음해법을 적용하였으며, 이 때 시간증분량은 0.05 s이며 총 계산시간은 90 s이다. 또한 자유표면의 정확한 모사를 위해 2차 정확도의

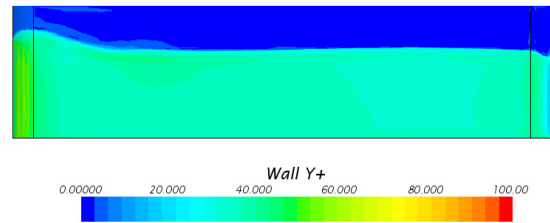
HRIC(high Resolution Interface Capturing) 알고리즘을 적용한 VOF(Volume-of-Fluid) 방법을 이용하였으며 속도 및 압력의 해법으로는 Gauss-Seidel에 비해 수렴성과 정확도가 높은 ILU(Incomplete Lower-Upper)반복법이 사용되었다.

### 3.3 격자계

수치 시뮬레이션을 위한 격자계는 STAR-CCM+에서 제공하는 자동격자생성 방법인 Surface Remesher, Prism Layer 그리고 Trimmer 격자를 이용하여 Fig. 6(a)와 같이 약 380만개의 격자를 생성하였다. 평판주위의 점성 유동장을 고려하기 위해 표면의 법선방향으로 5개의 layer를 생성하였으며, 평판의 물가름부와 물 모음부는 평판 중앙부에 비교하여 상대적으로 많은 격자를 배치하였다. 또한 자유표면 부근에 격자를 조밀하게 배치하여 자유표면의 정확도를 고려하였다. 이 때, 격자의 최소크기는 속도경계 조건에 따라  $4.0E-03\text{ m} \sim 5.0E-03\text{ m}$ 로 식 (17)로 정의되는  $Y^+$ 는 Fig. 6(b)와 같이 평판의 전체 영역에 걸쳐 100 이하가 되도록 설정하였으며 거칠기 변화가 있는 평판 평행부는 Demirel, et al. (2014)의 수치 시뮬레이션 결과를 참고하여 50 이하를 유지하도록 설정하였다.



(a) Grid system



(b)  $Y^+$  values

Fig. 6 Condition of numerical simulation for plate

## 4. 수치 시뮬레이션 결과

### 4.1 수치 시뮬레이션 조건 평가

표면 거칠기를 적용한 수치 시뮬레이션에 앞서 시뮬레이션 조건 및 격자계 검증을 위해 매끈한 평판에 대한 수치 시뮬레이션

을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. 수치 시뮬레이션 결과 각각의 속도조건에서 실험과 수치 시뮬레이션이 정량적, 정성적으로 유사한 경향을 보이며, 이 때 실험과 수치 시뮬레이션의 정량적인 차이는 최대 2% 내외로 실험과 일치하고 있다. 따라서 추후 수행되는 수치 시뮬레이션에 전술한 조건 및 격자계를 적용하였다.

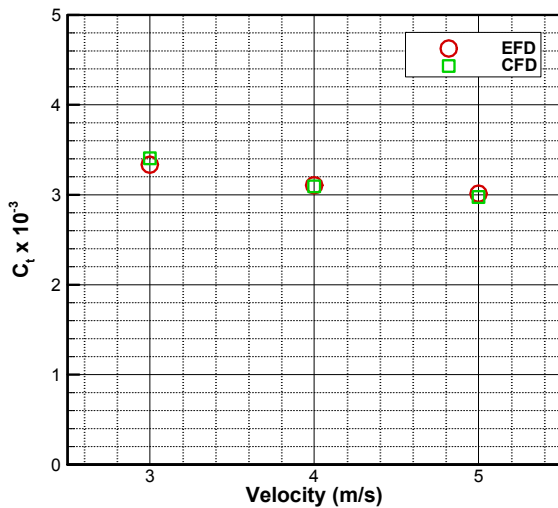


Fig. 7 Comparison of total resistance coefficient with experiment for validation

#### 4.2 평판 수치 시뮬레이션

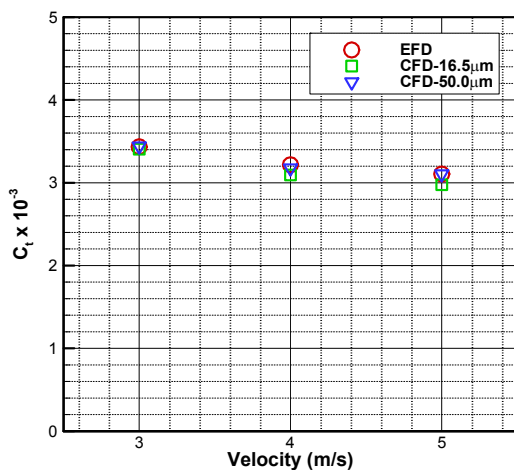


Fig. 8 Comparison of total resistance coefficient with experiment of SPC coated Plate

전술한 수치 시뮬레이션 조건 및 격자계를 이용하여 Tin-free SPC 방오 도료가 도장된 평판에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 표면 거칠기가 16.5 µm와 50.0 µm의 2가지 수치 시뮬레이션 결과가 실험과 유사한 경향을 보이지만, 표면 거칠기가 16.5 µm인 경우 속도가 증가할수

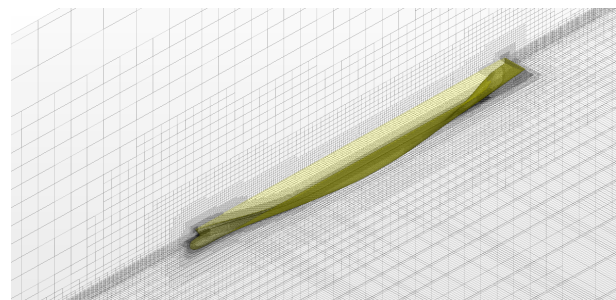
록 실험과 차이가 소폭 증가하고 있다. 이는 수치 시뮬레이션에 이용된 표면 거칠기( $R_t$ )가 실험에서 측정된 표면 거칠기( $R_q$ )를 단순 변환식을 이용하여 추정 변환한 수치를 사용함에 따른 오차로 사료된다. 반면 도장이 매끈하게 된 상태를 가정한 표면 거칠기가 50.0 µm의 수치 시뮬레이션 결과는 전 영역에서 상대적으로 실험과 유사한 결과를 보이고 있어 본 수치 시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험을 수행한 SPC 방오 도료가 도장된 평판의 표면 거칠기  $R_t$ 를 추정할 경우 50.0 µm에 가까울 것으로 예상된다.

#### 4.3 선박 수치 시뮬레이션

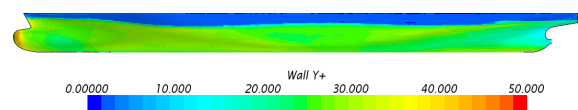
선박의 표면 거칠기에 따른 수치 시뮬레이션에 적용하기에 앞서 표면 거칠기를 고려하지 않은 KCS 선형의 수치 시뮬레이션을 수행하여 계산 조건을 검증하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 단, 이 때 KCS 선형의 제원은 Kim, et al. (2001)에 명시된 모형선 크기와 동일하며, Fig. 9와 같이 4.2절에서 전술한 평판 시뮬레이션의  $Y^+$ 가 50 이하 되도록 격자계를 구성하였다.

Table 2 Comparison of resistance coefficient with experiment for validation

Resistance coefficient	EFD	CFD-smooth	Relative error between EFD and CFD (%)
$C_F$	2.83E-03	2.84E-03	0.20
$C_P$	0.73E-03	0.70E-03	-0.70
$C_T$	3.56E-03	3.54E-03	-0.56



(a) Grid system



(b)  $Y^+$  values

Fig. 9 Condition of numerical simulation for KCS

수치 시뮬레이션을 통해 얻어진 각각의 저항계수를 실험과 비교 시 각각 1% 미만의 차이를 보이며 실험과 일치하였고, 이를

통해 평판에 적용한 수치 시뮬레이션 조건이 선박에 적용하기 적당하다고 판단하고 추후 수치 시뮬레이션에 적용하였다.

모형선의 표면 거칠기 조건은, 신조선 선박 표면 거칠기로 사용되는 150  $\mu m$ , 일반적인 선박의 정기검사기간(5년)과 SPC 페인트의 연간 표면 거칠기 증가량을 고려한 250  $\mu m$ , 선박의 표면이 손상되어 표면 거칠기가 증가한 경우를 고려한 500  $\mu m$  그리고 1,000  $\mu m$ 의 총 4가지 경우를 가정하여 수치 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 Table 3과 같이 마찰저항의 증가로 인해 전체저항이 약 7% ~ 29%까지 증가하였다. 이 때 증가율은 표면이 매끈한 조건으로 계산된 수치 시뮬레이션 결과를 기준으로 계산된 수치이다.

Table 3 Rate of increase in resistance coefficient due to surface roughness at model scale

Hull roughness ( $\mu m$ )	$C_F$	Rate of increase in $C_F$ (%)	$C_T$	Rate of increase in $C_T$ (%)
150	3.07E-03	8.38	3.78E-03	6.79
250	3.33E-03	17.28	4.04E-03	14.15
500	3.76E-03	32.50	4.48E-03	26.48
1,000	4.25E-03	49.88	4.99E-03	28.69

하지만 모형선의 수치 시뮬레이션 결과를 실선의 저항 증가를 고려하는 ITTC-78 방법 및 Townsin의 관계식과 직접적으로 비교할 수 없으며, 이를 위해서는 실선의 저항 추정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Granville (1958, 1987)의 상사 법칙을 이용하여 실선에서의 마찰저항 값을 추정하였고, 잉여저항 값은 모형선과 실선이 같다는 ITTC-57 방법을 이용하여 실선의 총 저항 값을 Table 4와 같이 산출하였다.

Table 4 Rate of increase in resistance coefficient due to surface roughness at full scale

Hull roughness ( $\mu m$ )	$C_{FS}$	Rate of increase in $C_F$ (%)	$C_{TS}$	Rate of increase in $C_T$ (%)
Smooth	1.38E-03	-	2.11E-03	-
150	1.72E-03	24.64	2.45E-03	16.11
250	1.84E-03	33.33	2.57E-03	21.80
500	2.00E-03	44.93	2.73E-03	29.38
1,000	2.17E-03	57.25	2.90E-03	37.44

Granville's의 상사 법칙은 식 (13)과 같은 부드러운 평판의 마찰 저항을 나타내는 그래프를 거칠기가 고려된 마찰저항 그래프로 보정하기 위해 먼저 식 (14), (15)로 산출된 변수만큼  $R_e$ 를 증가시켜 표면 거칠기가 고려된 마찰저항 그래프로 나타내며, 이 때 보정된 그래프와 식 (16)으로 구해지는 그래프의 교차점을 모

형 크기의 마찰저항으로 고려한다. 산출된 모형 크기의 마찰저항은 다시  $\log(L_{PP}/L_{plate})$ 만큼  $R_e$  증가를 고려하여 실선으로 확장한다 (Granville, 1958; 1987; Schultz, 2007; Demirel, et al. 2014).

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log(R_e C_F) \tag{13}$$

$$\frac{\Delta U^+}{(\ln(10)/\kappa)} \tag{14}$$

$$\Delta U^+ = \left( \sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_r - \left( \sqrt{\frac{2}{C_F}} \right)_s - 19.7 \left[ \left( \sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_r - \left( \sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_s \right] - \frac{1}{\kappa} \Delta U^+ \left( \sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)_r \tag{15}$$

$$R_e = \frac{L_{plate} U_\tau \nu^{-1}}{\sqrt{\frac{C_F}{2} \left( 1 - \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{C_F}{2}} \right)}} \tag{16}$$

이 때,  $\Delta U^+$ 는 Granville (1987)를 참고하여 -2.5를 사용하였으며, 하첨자  $r$  과  $s$  는 각각 표면 거칠기를 고려한 조건에서 계산된 결과와 표면 거칠기가 고려되지 않은 부드러운 조건에서 계산된 결과를,  $U_\tau$ 는 마찰속도(frictional velocity),  $\nu$ 는 동점성 그리고  $L_{plate}$ 은 모형의 크기로 본 연구에서는 모형선의 길이를 사용하였다.

상술한 방법을 이용하여 수치 시뮬레이션으로 추정된 마찰저항 증가량과 ITTC-78 방법과 Townsin의 방법을 상호 비교한 결과는 Fig. 10과 같다.

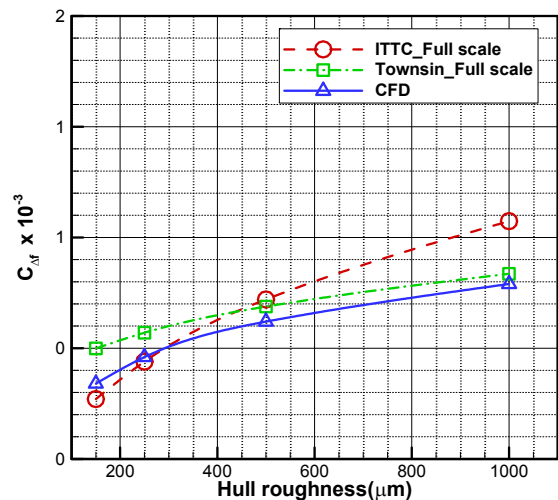


Fig. 10 Comparison of frictional resistance coefficient between analytic solution and CFD

수치 시뮬레이션으로 추정된 마찰저항 증가량은 전반적으로 Townsin의 관계식과 유사한 경향을 보이고 있으나, 표면 거칠기가 증가할수록 정량적 차이가 줄어들고 있다. ITTC-78 방법의 경우 표면 거칠기가 약 300  $\mu m$  이하에서는 Townsin의 결과에 비해 상대적으로 수치 시뮬레이션과 일치하는 경향을 보이나, 그 이상의 영역에서는 차이가 증가하고 있다. 하지만 선박의 표면 거칠기가 500  $\mu m \sim 1,000 \mu m$ 의 경우는 일반적으로 발생하지 않는 심각한 조건임을 고려할 때 해당 영역을 제외하면 수치 시뮬레이션과 이론적 방법의 정량적 차이는 크지 않다.

상술한 결과와 같이 수치 시뮬레이션을 통해 선박의 표면 거칠기 변화에 따른 저항성능 변화를 확인할 수 있었고 이 때, 선미부분( $x/L_{PP} = 0.4$ ) 선체 측면에서 법선 방향으로 속도 분포를 식 (17) ~ (20)을 이용하여 벽좌표로 무차원화하여 비교한 결과는 Fig. 11과 같다. 표면이 매끈한 경우  $Y^+$ 가 약 600 이하에서 벽법칙(law of the wall)과 일치하며 내층(inner layer)의 로그영역을 잘 재현하고 있으며, 표면 거칠기를 고려한 수치 시뮬레이션의 경우, 표면 거칠기가 증가할수록  $U^+$ 가 감소하여 그래프가 아래쪽으로 이동되는 경향을 보이며, 이는 식 (20)과 같이 표면 거칠기가 증가함에 따라 마찰저항이 증가하여  $\Delta U^+$ 가 증가하기 때문이다.

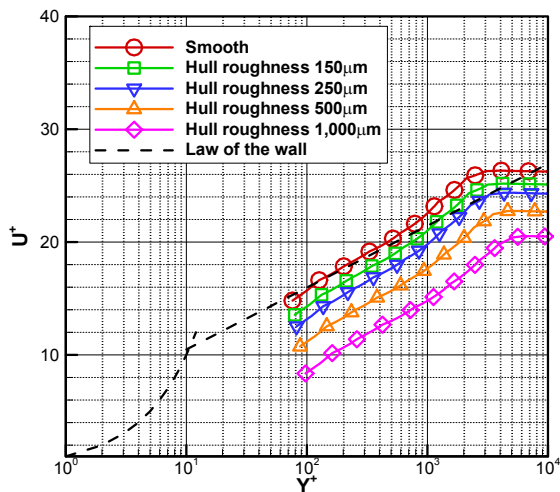


Fig. 11 Non-dimensional velocity profile at  $x/L_{PP} = 0.4$

$$Y^+ = \frac{y \times U_\tau}{\nu} \tag{17}$$

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \tag{18}$$

$$U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \tag{19}$$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Y^+) + B - \Delta U^+ \tag{20}$$

이 때,  $y$ 는 법선 방향 거리,  $\tau_w$ 는 전단응력(shear stress magnitude)로,  $B$ 는 부드러운 벽(smooth wall)의 계수로 5.0을,  $\Delta U^+$ 는 거칠기 함수로 부드러운 벽의 경우 0이 된다.

#### 4.4 표면 거칠기에 따른 선속 변화량

4.3절에서 구해진 전체 저항 값을 바탕으로 속도와 전체저항의 관계를 나타내는 식 (9)를 이용하여 Table 5와 같이 실선의 속도 증감량을 추정하였다. 단 이 때, 선속 증감량의 추정은 거칠기 증가로 인한 프로펠러 효율 변화는 고려되지 않고 표면 거칠기로 인한 저항 증가만을 고려한다 (Molland, et al., 2011).

Table 5 Rate of increase in ship speed due to surface roughness at full scale

Hull roughness ( $\mu m$ )	$\Delta R_T$ (N)	$R_T$ (N)	$V$ (m/s)	$\Delta V$ (m/s)	$V'$ (m/s)	Rate of increase in speed (%)
150	2.46E+05	1.52E+06	12.35	0.96	11.39	-7.76
250	3.32E+05			1.11	11.24	-8.98
500	4.48E+05			1.41	10.94	-11.41
1,000	5.71E+05			1.67	10.67	-13.55

$$\frac{\Delta V}{V} = \left[ 1 + \frac{\Delta R_T}{R_T} \right]^{1/2} - 1 \tag{21}$$

이 때  $\Delta V$ 는 선속변화량,  $V$ 와  $R_T$ 는 매끈한 선박의 속도와 전체저항을,  $\Delta R_T$ 는 거칠기가 고려된 수치 시뮬레이션의 전체 저항과  $R_T$ 의 차이를 나타낸다.

표면 거칠기에 증가함에 따라 전체 저항의 증가로 인해 선속이 감소하고 있으며, 이 때 각각의 계산 결과를 선체가 매끈한 조건의 수치시뮬레이션 결과와 비교 시, 신조 선박의 거칠기 보정 계수로 이용되는 150  $\mu m$ 의 경우 약 8%, 정기검사 기간을 고려한 250  $\mu m$ 의 경우 약 9%, 500  $\mu m$ 과 1,000  $\mu m$ 의 경우 각각 약 11%, 13%의 선속 손실이 나타나고 있다. 따라서 각각의 표면 거칠기 조건에 따라 약 8~14%의 선속 손실로 선박의 속도에 비교적 큰 영향을 미치고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 선박의 표면 거칠기에 따른 저항성능 변화를 파악하기 위한 방법으로 CFD에 의한 수치 시뮬레이션을 이용하였다. 수치 시뮬레이션을 적용함에 있어 발생할 수 있는 불확실성을 제거하기 위해 평판을 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하여 실험과 정량적 비교를 통해 수치 계산 조건들을 검증하였으며, 검증된 방법을 바탕으로 모형선의 표면 거칠기가 각각 150  $\mu m$ ,



250  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  그리고 1,000  $\mu\text{m}$ 의 4가지 경우를 가정하여 저항성능 변화를 파악해 보았다.

### 1) 평판 시뮬레이션

평판을 이용한 수치 시뮬레이션의 경우, 검증을 위해 표면 거칠기가 고려되지 않은 매끈한 평판에 대한 수치 시뮬레이션을 수행한 결과, 실험의 상대오차가 2% 내외로 실험과 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이어서 2가지 표면 거칠기(16.5  $\mu\text{m}$ , 50.0  $\mu\text{m}$ )가 적용된 수치 시뮬레이션을 수행하여 실험과 비교하였으며, 그 결과 모두 실험과 유사한 경향을 보였다.

### 2) 선박 시뮬레이션

4가지 표면 거칠기 조건(150  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$ )을 가정한 모형선(KCS 선형)의 수치 시뮬레이션을 수행하였으며, 표면 거칠기가 증가함에 따라 미찰저항 증가로 인한 전체저항 증가를 확인할 수 있었다. 또한 수치 시뮬레이션 결과를 ITTC-78 방법 및 Townsin의 관계식과 비교를 위해 Granville (1958, 1978)의 상사법칙을 이용하여 실선의 미찰저항을 추정하였고, 그 결과 상호 유사한 경향을 보이고 있다. 다만 ITTC-78 방법 및 Townsin의 관계식과의 정량적 차이는 본 연구에서 1가지 선형(KCS 선형)에 대한 수치 시뮬레이션 결과로 정량적 비교를 수행하였기 때문에 발생하는 오차로 사료되며, 이는 추후 다양한 선종 및 크기에 따른 추가적인 연구 및 검증이 필요할 것이다. 한편, 선박의 선미부분( $X/L_{PP} = 0.4$ )에서 선측 표면에 법선 방향으로 측정된 무차원 속도 분포는 표면의 매끈한 경우 경계층 내부에서 벽법칙을 잘 만족하고 있음을 확인하였고 표면 거칠기가 증가할수록  $\Delta U^+$ 의 증가로 인해  $U^+$ 가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

### 3) 선속 변화량 추정

표면 거칠기 증가로 인한 저항 증가가 속도에 미치는 영향을 파악하기 위해 속도와 전체 저항과의 관계식을 이용하여 실선에서의 선속 증감량을 계산하였으며, 표면 거칠기에 따라 최대 약 14%의 선속 손실이 나타났다. 하지만 약 14%의 선속 손실을 보이는 표면 거칠기가 1,000  $\mu\text{m}$ 의 경우는 일반적으로 발생하지 않는 심각한 조건으로 선박의 정기검사기간과 일반적으로 선박에 많이 이용되고 있는 SPC 도료의 연간 표면 거칠기 증가량 등을 고려할 때 표면 거칠기가 약 150  $\mu\text{m}$  ~ 300  $\mu\text{m}$  정도의 범위가 선박의 운항 시 발생할 수 있는 표면 거칠기 수치로 사료된다. 하지만 이 경우 또한 속도 손실량이 약 10% 내외로 작지 않으며, 이는 유류비 증가로 경제적 손해뿐만 아니라 최근 강화되고 있는 환경규제의 만족 여부에도 큰 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 이런 속도 손실을 막기 위해 주기적인 오손 제거, 재도장 등의 표면 유지 보수 방법을 통해 선박의 표면 거칠기 관리가 요구된다.

상술한 수치 시뮬레이션, 실험 그리고 상관관계식을 이용한 비교 분석을 통해 표면 거칠기에 따른 저항성능 추정을 위한 방

법으로 수치 시뮬레이션의 적용 가능성을 확인하였다. 이는 실험적 방법의 적용이 어려운 표면 거칠기로 인한 저항 증가 문제를 해결하기 위해 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것이다. 다만 시뮬레이션 시 표면 거칠기를 고려하기 위해 이용되는 대푯값인  $AHR$ 의 정확도 및 국부적인 표면 거칠기 고려 방법에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후기

본 논문의 내용은 산업통상자원부 산업기술혁신사업으로 수행 중인 “온실가스 저감 및 실해역 에너지 효율 향상을 위한 운항선 선속-동력 고정도 해석 기반기술 개발” 과제의 연구내용 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.(1415135126).

## References

- American Bureau of Shipping (ABS), 2007. *The Inspection Maintenance and Application of Marine Coating Systems*. Houston, TX, USA: ABS.
- American Bureau of Shipping (ABS), 2013. *Ship Energy Efficiency Measures Status and Guidance*. Houston, TX, USA: ABS.
- Candries, M. Atlar, M. & Anderson, C.D., 2001. Foul Release systems and drag. Consolidation of Technical Advances in the Protective and Marine Coatings Industry. *Proceedings of the PCE 2001 Conference*, Antwerp, Netherland, 27-29 March 2001, pp.273-286.
- Carlton, J., 2012. *Marine Propellers and Propulsion*. 3th Edition. Butterworth-Heinemann: Oxford.
- Demirel, Y.K. Khorasanchi, M. Turan, O. Incecik, A. & Schultz, M.P., 2014. A CFD Model for the Frictional Resistance Prediction of Antifouling Coatings. *Ocean Engineering*, 89, pp.21-31.
- General Magnaplate Corp., 2016. *Surface roughness conversions*. Available at : <http://frictioncalculator.com/surface-roughness> [Accessed 13 October 2016].
- Granville, P.S., 1958. *The Frictional Resistance and Turbulent Boundary Layer of Rough Surfaces*. *Hydromechanics Laboratory Research and Development Reprint No.1024*.
- Granville, P.S., 1987. Three Indirect Methods for the Drag Characterization of Arbitrarily Rough Surfaces on Flat Plates. *Journal of Ship Research*, 31(1), pp.70-77.
- Harsonic, 2016. *Professional marine & offshore*. [Online]

- ne] Available at : <http://www.harsonic.net/professional-marine-offshore/> [Accessed 13 October 2016].
- ISO 15016, 2002. *Ships and Marine Technology-Guidelines for the Assessment of Speed and Power Performance by Analysis of Speed Trial Data*. ISO.
- Izaguirre Alza, P. Pérez Rojas, L. & Núñez Basáñez, J. F., 2010. Drag reduction through special paints coated on the hull. *International Conference on Ship Drag Reduction SMOOTH-SHIPS*, Istanbul, Turkey, 20-21 May 2010.
- Jang, J.H. Lee, Y.J. Song, Y.Y. Rhyu, S.S. Cho, H. S. & Lee, I.W., 2010. An experimental study on the drag of a flat plate painted with antifouling paints. *Proceedings of the The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Je-ju, Republic of Korea, 3-4 June 2010, pp.1104-1110.
- Kim, W.J. Van, S.H. & Kim, D.H., 2001. Measurement of Flows Around Modern Commercial Ship Models. *Experiments in Fluids*, 31, pp.567-578.
- Kwon, Y.J. & Choo, D.K., 1996. A Research on Ship Hull Roughness: Estimation Method and Effect on Ship Performance. *Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea*, 33(2), pp.30-35.
- Kwon, Y.J., 2003. A Research on Ship Speed Performance. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(2), pp.67-71.
- Menter, F. R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), pp.1598-1605.
- Molland, A.F. Turnock, S.R. & Hudson, D.A. 2011. *Ship Resistance and Propulsion*. 1st Edition. Cambridge University Press: New York.
- Paik, B.G. Kim, K.Y. Cho, S.R. Ahn, J.W. Cho, S.R. Kim, K.R. & Chung, Y.U., 2013. Study on the Drag Performance of the Flat Plates Treated by Antifouling Paints. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.399-406.
- Schultz, M.P., 2004. Frictional Resistance of Antifouling Coating System. *Journal of Fluids Engineering*, 126, pp.1039-1047.
- Schultz, M.P., 2007. Effects of Coating Roughness and Biofouling on Ship Resistance and Powering. *Biofouling*, 23(5), pp.331-341.
- Seok, J. Park, J.C. Shin, M.S. & Kim, S.Y., 2015. Fundamental Study for Predicting Ship Resistance Performance due to Change of Water Temperature and Salinity in Korea Straits. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(6), pp.418-426.
- Sulaiman, O. Saharuddin, A.H. Kader, A. & Nik, W. N.W.A.N., 2010. Qualitative Method for Antifouling Long Life Paint for Marine Facilities or System. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 7(2), pp.675-688.
- Townsin, R.L., 1985. *The ITTC Line-its Genesis and Correlation Allowance*. The Naval Architect: London, UK.
- Usta, O. & Korkut, E., 2013. *A Study for the Effect of Surface Roughness on Resistance Characteristics of Flat Plates*. Marine Coatings: London, UK.
- Yun, J.E. & Kim, J.H., 2014. Effect of Surface Roughness on Performance Analysis of Centrifugal Pump for Wastewater Transport. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 38(2), 147-153.

