

레이놀즈수에 따른 평판 모델의 거칠기 함수에 관한 연구

정 태 환,¹ 이 정 희,² 김 재 형³

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구부
²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업기술센터
³한국기계연구원 원자력산업기기검증센터

A STUDY FOR ROUGHNESS FUNCTION OF FLAT PLATE WITH REYNOLDS NUMBER

T.H. Joung,¹ J.H. Lee² and J.H. Kim³

¹Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO)
²Technology Center for Offshore Plant Industries, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO)
³Equipment Qualification Center for Nuclear Power Plant, Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM)

In this paper, turbulence models for considering roughness in the open source code(OpenFOAM) was investigated. Wall function in the RANS(Reynolds-averaged Navier - Stokes) turbulence model was modified considering roughness on the flat plate by using roughness function. Correlation between the first layer height in the CFD model and roughness height of the plate was observed, and the most proper roughness function, and the first layer height from the plate wall in the CFD analysis was suggested in this paper.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 소스공개(Open Source), 표면거칠기(Surface roughness), 벽함수(Wall function), 난류모델(Turbulent model), 선체저항(Ship resistance)

1. 서 론

해양에서 사용되는 구조물이나 선박의 경우 표면거칠기는 대부분 부정적인 영향을 미친다. 특히, 선체 표면의 거칠기는 선체의 저항을 높여 선체의 성능을 저하시켜 연료의 증가를 유발, 이산화탄소 배출 증가의 원인이 된다. 선체 표면의 거칠기를 고려하여 선박의 저항을 정량적으로 평가하려는 시도는 지난 반 세기가 넘도록 수 많은 연구가 이루어져 왔음에도 불구하고, 실험이나 해석에 의한 정확한 추정이 어려운 실정이다. 일반적으로 선박의 표면은 최초의 도장 후에는 Fig. 1의 좌측의 그림과 같이 매끈한 상태이지만 해수 중에서 선박이 운항을 하고 시간이 지남에 따라 Fig. 1의 우측에 보는 바와 같이 다양한 해양생명체들이 부착되는 오손(Fouling)현상이나 침식과 같은 선체 도장면의 부분적인 손상으로 인해 표면 거칠기가 증가하며 이로 인해 마찰저항이 증가하게 된다[1].

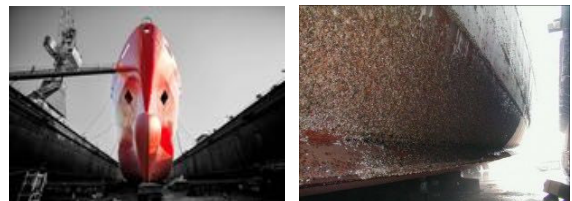


Fig. 1 Smooth surface(left) and fouling on hull surface(right)

전산유체역학(CFD)를 이용, 표면거칠기를 고려하여 해양의 구조물의 거동이나 현상을 모사할 경우에는 표면거칠기의 높이나 그 분포 또는 그 이외에도 다양한 영향을 고려하여야 한다. 그러나 현재의 CFD 상용소프트웨어에서는 표면거칠기에 대한 영향을 고려하는 부분이 상당히 제한적으로 접근하여 제어할 수 있도록 구성되어 있어 사용자가 사용하기 어렵다.

만약 실제의 표면거칠기를 전부 고려하여 모델링을 하게 된다면 과도한 격자수로 인한 해석시간의 증가와 함께 정확한 해석결과의 예측 또한 어려울 수 있다. 따라서 표면거칠기 값은 일반적으로 사용되는 벽함수(wall function)에서 표면거칠기 함수로 고려되어 예측이 가능하다.

Received: November 14, 2016, Revised: December 14, 2016,
 Accepted: December 14, 2016.

* Corresponding author, E-mail: jhkim@kimm.re.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.4.078>

© KSCFE 2016

평판 경계층유동에서 레이놀즈수가 커질수록 경계층 두께가 얇아지므로($\delta \sim L/\sqrt{Re}$) 벽면의 인접영역에서의 격자를 좀 더 조밀하게 분포시켜야 하고, 이에 따라 격자수 증가, 격자의 질 저하 및 과도한 계산시간 등으로 인한 어려움이 발생하게 되는데, 이러한 문제들을 해결하고 효율적으로 계산하는 실용적 방법으로서 벽함수를 사용하고 있다. 벽함수에 의해 모사되는 k- ϵ 모델과 같은 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 난류모델에서는 일반적으로 벽면으로부터 첫 번째 격자점의 y^+ 값이 Log-law layer에 위치할 때 비교적 잘 예측한다고 알려져 있고 벽함수에서는 표면거칠기 함수(ΔU^+)의 값은 고려되지 않고 있다.

고 레이놀즈수 난류유동을 해석할 때 Choi and Kim[2]은 벽함수 사용하여 연구를 수행하였으나 표면거칠기에 대한 영향을 고려하지 않았고 Demirel et al.[3]의 논문에서는 상용코드를 사용함으로써 표면거칠기의 함수의 영향을 프로그램에 직접 적용하기가 어려웠다. 이외에도 다수의 논문(Candries[4], Schultz[5], Flack and Schultz[6])등에서도 표면거칠기 함수에 대한 연구가 진행되었으나 해석코드내의 벽함수를 수정하지 못하였다. Park et al.[7]은 오픈 소스를 활용한 선박의 표면거칠기의 영향에 따른 마찰저항의 증가를 살펴보고, 벽함수를 수정하여 상용코드와의 해석의 결과를 비교, 검증한 한 바 있으나, 다양한 레이놀즈 수(특히 고 레이놀즈 수)에서의 격자높이와 표면거칠기 높이와의 상관관계를 규명하지는 않았다.

본 논문에서는 다양한 레이놀즈수에 따른 평판의 표면거칠기를 모사하기 위하여 CFD 오픈소스(OpenFOAM ver 4.0)를 이용하고자 하며 벽함수에 있는 표면거칠기 함수를 조절하여 해석 결과의 영향을 분석하고자 한다. 이를 위하여 간단한 평판의 모델을 이용하여, 경계층 내 속도분포의 벽법칙 만족 여부와 벽 로그법칙을 만족하는 범위에서 속도 증가에 따른 첫 번째 격자와 표면거칠기의 높이와의 상관관계를 해석하고자 한다.

2. 표면거칠기 함수 이론

2.1 표면거칠기 함수

Schoenherr[8]는 매끈한 평판에 대한 당시의 마찰저항 실험 결과를 수집, 정리하여 순정하여(fitting)하여 다음의 공식을 제안하였다.

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(Re C_F) \tag{1}$$

여기서, C_F 는 마찰저항계수이며, Re 는 레이놀즈 수 이고

이 식에 의한 곡선을 ‘Schoenherr곡선’ 혹은 ‘ATTC 1947곡선’이라 한다.

매끈한 평판에 비하여 표면거칠기를 고려하여 벽법칙을 적용한 평판의 유동해석에서는 속도 프로파일의 감소를 가져옴으로 인해 모멘텀을 감소시키고 표면 마찰저항의 증가시킨다. 난류경계층의 내부영역에서 평균속도 프로파일에 대한 일반적인 벽함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \tag{2}$$

여기서 U^+ 내부 경계층의 속도이고, κ 는 칼만계수(Von Karman constant)이고 일반적으로 0.41를 사용한다. y^+ 는 벽으로부터의 무차원화된 거리이고, B는 매끈한 벽면에서 벽함수의 보정상수이며 일반적으로 5.45를 사용한다.

거친 표면의 벽함수는 표면거칠기 함수 ΔU^+ 의 영향에 의해 내부 경계층 내부의 속도, U^+ 는 다음의 식 (3)과 같이 저하된다.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta U^+ \tag{3}$$

위의 식 (3)에서 정의된 표면거칠기 함수, ΔU^+ 는 표면거칠기 레이놀즈 수 k^+ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1+k^+) \tag{4}$$

여기서 표면거칠기 레이놀즈 수 k^+ 는 표면거칠기 높이, k 와 동점성 계수, ν 와 마찰속도, U_τ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$k^+ = \frac{kU_\tau}{\nu} \tag{5}$$

여기서 마찰속도, U_τ 는 다음과 같이 정의된다.

$$U_\tau = \frac{U_e}{(\ln Re)^{1.2}} \tag{6}$$

여기서 U_e 는 경계층외부의 유동속도(자유흐름속도)이며, Re 는 레이놀즈 수이다. 선저 부착물이 발생하는 선박이 운항하는 동안 레이놀즈 수에 따라 달라지는 경계층의 두께를 고려한 저항을 계산하기 위하여 마찰속도를 Walderhaug[9]은 위의 식 (6) 다음과 같은 근사식으로 표현하였으며, 본 연구에서는

이 식을 활용하여 계산에 이용하였다. 식 (6)에서 사용된 레이놀즈 수의 정의는 다음의 식 (7)과 같다.

$$Re = \frac{U_c x}{\nu} \tag{7}$$

여기서 Re 는 레이놀즈 수, U_c 는 경계층외부의 유동속도(자유 흐름속도)이고, x 는 평판의 길이이며, ν 는 동점성 계수이다.

2.2 표면거칠기 함수의 계산 및 특성

표면에 거칠기를 고려한다고 하는 것은 표면 스케일에 맞도록 다양한 레이놀즈 수에 따라 위에서 얻어진 표면거칠기 함수를 사용하는 것이다. 표면 거칠기는 거칠기 레이놀즈 수 (k^+)에 따라 표면에 그 특성을 고려할 수 있는데 거칠기 레이놀즈 수(k^+)의 크기 영역에 따라 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

즉, 작은 표면거칠기 레이놀즈 수(k^+)의 경우($k^+ < 5$)에는 거칠기에 의한 간섭이 유체의 점성에 의해 상당히 미미하고 둔화되어서 유체역학적으로 매끈하다고 정의할 수 있다. 한편, 표면거칠기 레이놀즈 수(k^+)가 증가함에 따라 점성력은 와(eddy)의 형성에 의해 더 이상 감소되지 않는데, 이 경우에는 형상저항과 점성저항이 전체 표면저항에 관련이 된다. 이러한 천이 표면거칠기 영역은 $5 < k^+ < 70$ 정도로 알려져 있다. 만약 표면거칠기 레이놀즈 수(k^+)가 더 증가한다면, 표면거칠기의 형상저항과 레이놀즈수에 따른 표면마찰은 독립적인 메카니즘이 되고, 표면거칠기의 형상저항이 훨씬 더 큰 역할을 하게 되는데 이 영역을 완전 거친 영역($k^+ > 70$)이라 할 수 있다.

3. 수치해석 방법 및 조건

3.1 해석모델의 정의

본 해석에 사용된 평판은 Fig. 2와 같이 직교좌표계를 사

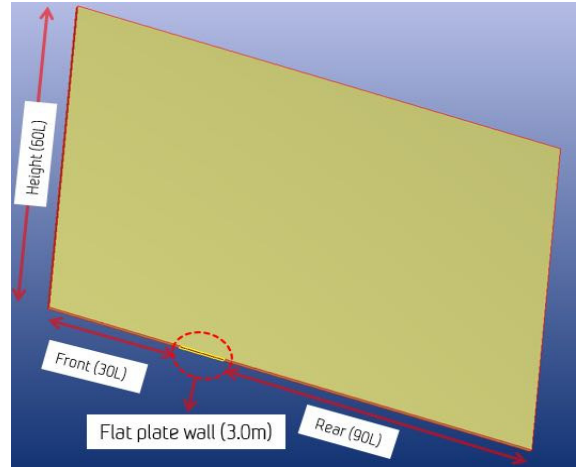


Fig. 2 Dimension of the flat plate model

용하였으며, 주 유동방향을 x, 연직상방을 y축으로 하였고 z 축 방향의 해석은 수행하지 않았다. Fig. 2에 보이는 바와 같이, 수치 해석을 위한 평판은 길이(L)가 6.0 m이고, 유동방향으로 유입구(30L)와 후류영역(90L)로 정의하였다. 격자의 생성은 표면거칠기의 높이(k_s)에 따라 최초의 격자높이(h_s)가 정해지도록 정의하여 자동으로 만들어지도록 하였다. 즉, 격자의 생성은 등비수열을 이용하여 격자길이의 합을 이용하여 ‘blockMesh’의 ‘simpleGrading’의 상수를 계산하여 첫번째 격자 높이(h_s)를 지정하였고, 유동방향의 격자는 고정하여 생성이 된다. 해석에서 고려된 표면거칠기의 높이는 표면거칠기 높이 (k_s)로서 $12\mu\text{m}(k_1)$, $500\mu\text{m}(k_2)$, $5000\mu\text{m}(k_3)$ 의 3가지이고, CFD 해석결과는 표면거칠기를 무시한 매끈한(smooth) 경우와 비교, 분석되었다. 따라서 격자수는 표면거칠기의 높이에 따라 다르며, 각각 517,280개(k_1), 257,040개(k_2), 166,320개(k_3)이다. 초기의 해석에서는 첫 번째 격자의 높이(h_s)는 표면거

Table 1 Numerical scheme in simpleFoam’s fvSchemes[10]

Schemes type	Name	Description
Gradient	Gauss linear	Second order, Gaussian integration, Linear interpolation
Divergence	Gauss limited linear	Gauss schemes Second order, bounded
Laplacian	Gauss linear corrected	Gauss schemes Second order, unbounded, conservative
Time	Steady state	Does not solve for time derivative

Table 2 Type of numerical solver in simpleFoam’s fvSolution[10]

Solver type	Name	Description
p	GAMG with gauss seidel smoother	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerance : 10^{-08} • Relative tolerance : 0.05 • Calculation cells number in the coarse level solver : 20
U k ε	Smooth solver with gauss seidel smoother	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerance : 10^{-07} • Relative tolerance : 0.1 • Number of sweeps : 2
Simple	Residual Control	<ul style="list-style-type: none"> • p k ε : 10^{-03} • U : 10^{-04}
Relaxation Factors		<ul style="list-style-type: none"> • p : 0.5 ~ 0.9 • U : 0.6 • k ε : 0.5

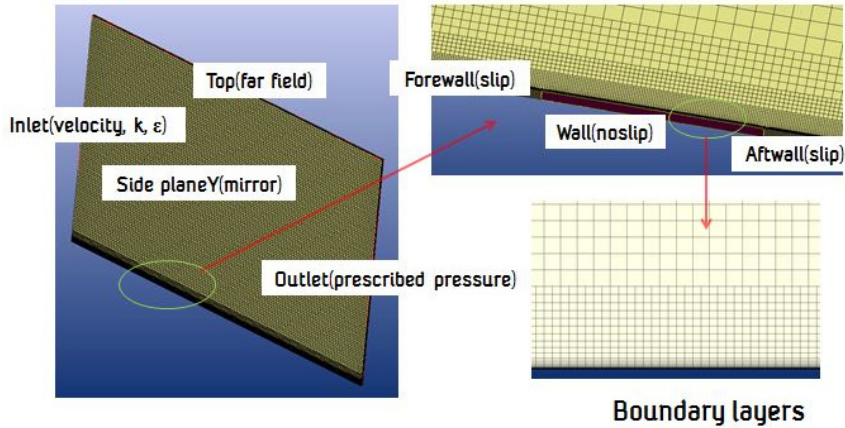


Fig. 3 Computational mesh scheme and boundary conditions for the CFD model

칠기 높이(k_s)의 반 이하($k_s=2.0h_s$)가 되도록 하였다.

3.2 초기조건, 경계조건 및 경계층의 정의

해석을 수행하기 위해 오픈소스코드인 ‘OpenFOAM 4.0’의 비압축성 정상해석 solver인 ‘simpleFoam’ solver를 이용하였다. ‘simpleFoam’에서 사용하는 ‘fvSchemes’과 ‘fvSolution’은 예제의 기본적인 파일이 해석에 이용되었다. 본 연구에서 사용된 solver, ‘simpleFoam’의 ‘fvSchemes’과 ‘fvSolution’의 내용을 Table 1과 Table 2에 각각 요약 설명하였다.

입구 압력경계조건은 제로구배조건을 적용하였고 입구 속도경계조건은 식 (7)에서 정의된 레이놀즈 수 $3.0 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^7$ 구간에서 4가지 경우에 대해 일정한 속도조건(1, 5, 7, 10 m/s)을 주었다. Fig. 3에 보인 바와 같이, 출구경계조건은 압력은 제로 고정값을 속도는 제로 구배를 사용하였다. 그리고 벽 조건은 압력은 제로구배이고 속도는 유동방향의 유입부(30L)와 후류영역(90L)는 전단응력이 발생하지 않는 ‘Slip’ 조건이 적용되었고 평가영역(6L)은 ‘nutRoughWallFunction’ 벽 법칙이 적용되었다. 난류모델은 ‘Reynolds-averaged stress (RAS)’의 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 난류모델의 마찰속도는 식 (6)을 사용하였으며 난류운동에너지(k), 난류에너지 소산율(ϵ)을 다음의 식 (8), (9)와 같이 각각 구하여 입구경계조건에 적용하였다.

$$k = U_\tau^2 C_\mu^{-0.5} \tag{8}$$

$$\epsilon = U_\tau^3 \kappa^{-1} y^{-1} \tag{9}$$

여기서 C_μ 는 0.09이고 κ 는 0.41이고 y 는 벽면으로부터 첫 번

째 격자 높이이며 U_τ 는 마찰속도이다.

OpenFOAM의 내부코드에서 Table 3와 같이 로그법칙이 적용되는 영역에서 식 (10)의 난류운동에너지 생성항(G_k)과 벽으로부터 높이를 이용하여 식 (11)의 난류에너지 소산율(ϵ)이 ‘epsilonWall Function’에서 계산되고 있으며, 난류운동에너지(k)의 제로구배는 ‘kqRwallFunction’에서 반영하였고 점성영역에서는 저 레이놀즈 벽법칙을 적용한다.

$$G_k = \tau_w \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\kappa y} \tag{10}$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa y} \tag{11}$$

벽전단응력(τ_w)은 OpenFOAM의 후처리기 ‘postProcessor’를 활용하여 계산하였고, 마찰계수(C_f)는 다음의 식으로 벽 전단응력과 경계조건으로 준 속도를 가지고 계산하였다.

$$C_f = \frac{\tau_w}{0.5 \rho U_e^2} \tag{12}$$

Table 3 Description of wall functions in OpenFOAM[10]

wallFunction	Description
kqR WallFunction	k equation • zeroGradient
epsilon WallFunction	ε equation • Production of turbulent kinetic energy, G_k in Eq. (10) • Turbulent dissipation rate(ϵ) in Eq.(11)
nutRough WallFunction	• Turbulent viscosity(ν_t) with surface roughness in Eq. (14)

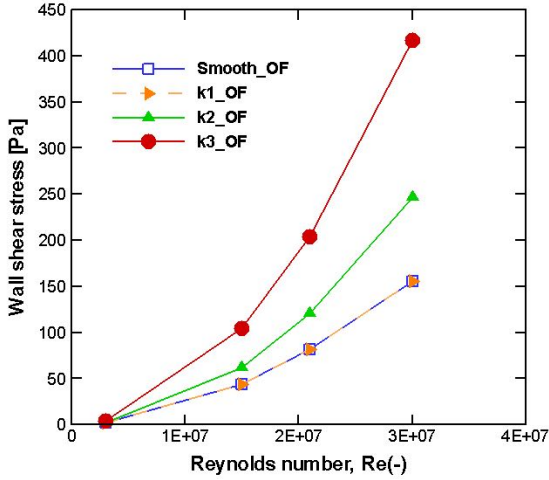


Fig. 4 Wall shear stress versus free-stream velocity for different roughness heights(smooth, $k_1 = 12\mu\text{m}$, $k_2 = 500\mu\text{m}$, $k_3 = 5000\mu\text{m}$)

전산유체해석에 사용된 표면거칠기 높이(k_s)는 'nut'에 경계조건으로 적용하였으며 solver의 'nutRoughWallFunction' 함수에서 표면거칠기 높이(k_s)가 반영 되고 있다. 기존에 표면 거칠기가 반영되지 않을 경우 OpenFOAM의 solver 중의 하나인 'simpleFoam'에서는 식 (3)의 B을 고려한 상수(E)가 사용되고 있었으나, 본 연구에서는 벽면의 마찰속도를 구하여 표면에서 거칠기 레이놀즈 수(k^+)를 구한 후 식 (4)의 ΔU^+ 를 계산하여 다음의 식 (13)의 상수(\bar{E})를 직접 구하여 반영하였다.

$$\begin{aligned} U^+ &= \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B - \Delta U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) - \Delta U^+ \\ &= \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{E}{1+k^+} y^+\right) = \frac{1}{\kappa} \ln(\bar{E}y^+) \end{aligned} \quad (13)$$

층류와 난류에서의 동점성 계수(ν_w 와 ν_t)사이의 관계는 U^+ 와 y^+ 에 의해 다음과 같이 정의 될 수 있다.

$$\nu_t = \nu_w (y^+ / U^+ - 1) \quad (14)$$

그리고 벽으로부터의 무차원화 된 거리(y^+)를 구하여 표면 거칠기가 반영된 벽면에서의 난류 동점성 계수(ν_t)를 구하여 최종적으로 경계조건에 반영하였다.

표면거칠기 고려한 경계층두께는 다음과 같이 정의하였다.

$$\delta \sim \sqrt{(\nu_w + \nu_t) \Delta t} \quad (15)$$

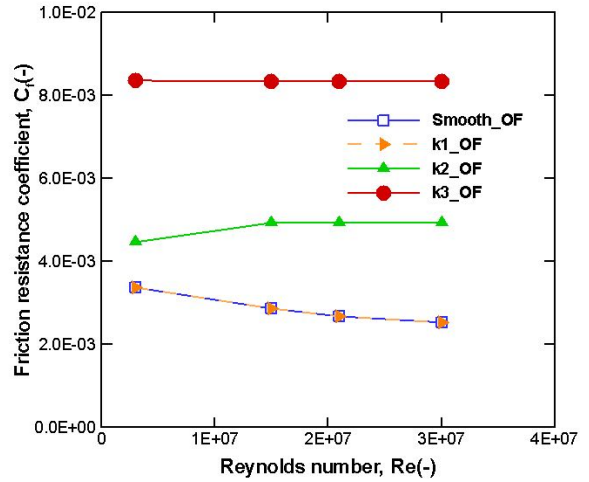


Fig. 5 Frictional resistance coefficient(C_f) versus Reynolds number for different roughness heights(smooth, $k_1 = 12\mu\text{m}$, $k_2 = 500\mu\text{m}$, $k_3 = 5000\mu\text{m}$)

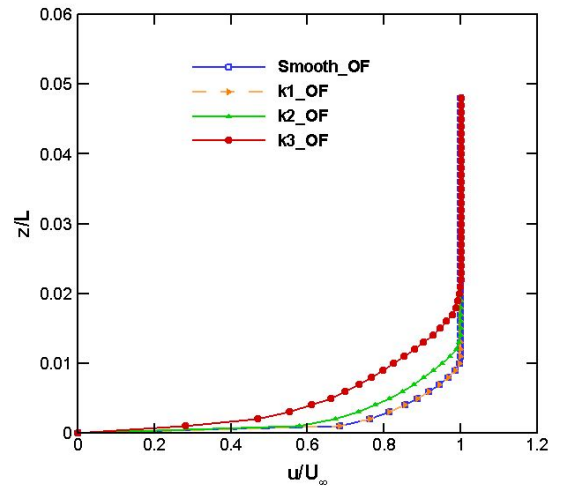


Fig. 6 Comparison of non-dimensional velocities above the plate for the different roughness cases

여기서 ν_w 와 ν_t 는 각각 벽면에서의 층류와 난류에서의 동점성 계수이고 δ 는 시간(Δt) 동안 형성된 경계층의 두께이다.

4. 수치 해석 결과

4.1 수치해석 결과 고찰

표면 거칠기를 적용한 수치 시뮬레이션에 앞서 시뮬레이션 조건 및 격자계 검증을 위해 매끈한 평판에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 해석결과 Fig. 4에 보이는 바와 같이,

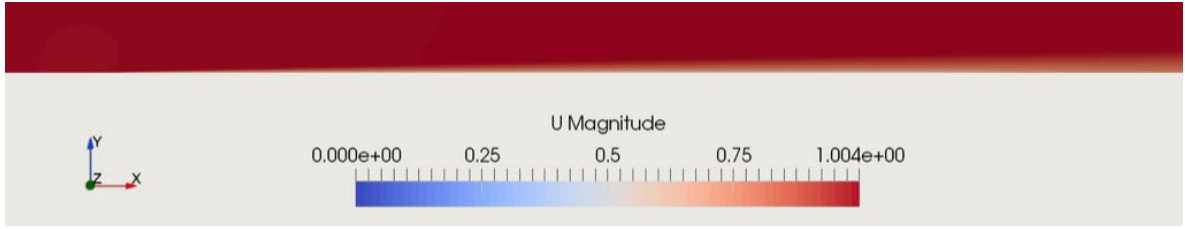


Fig. 7 Velocity (U_x) distribution of the flat plate at 5 m/s ($k_s = 5000 \mu m$)

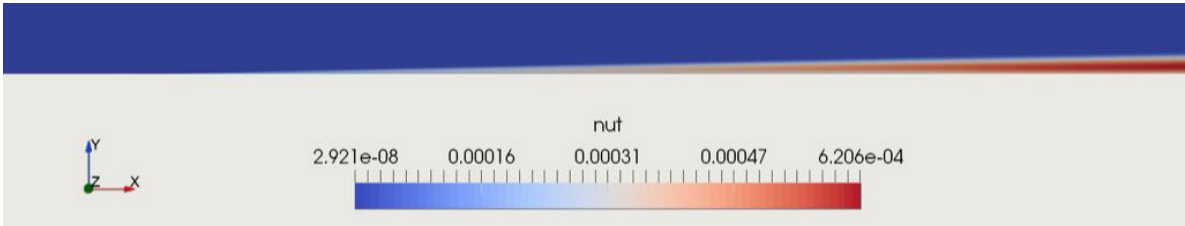


Fig. 8 Kinetic viscosity (ν_t) distribution of the flat plate at 5 m/s ($k_s = 5000 \mu m$)

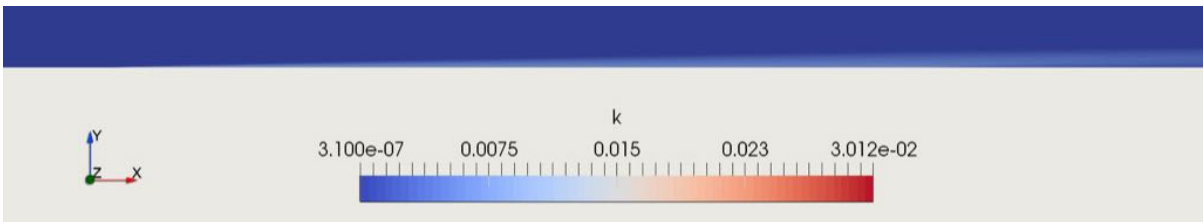


Fig. 9 Turbulent kinetic energy (k) distribution of the flat plate at 5 m/s ($k_s = 5000 \mu m$)

경계층 바깥부분의 자유유동장의 속도가 증가함에 따라 저항력을 비례하여 증가하고 있고, 그 크기는 표면이 거칠수록 크기는 증가한다. 그러나 표면거칠기 높이(k_s)가 $12 \mu m$ 의 경우에 있어서는 표면거칠기가 고려되지 않은 매끈한 경우와 거의 차이가 없음을 확인할 수 있었다. 이는 표면거칠기 높이 (k_s)가 $12 \mu m$ 의 경우에 있어서는 표면거칠기가 고려되지 않은 매끈한 경우와 차이가 없는데 그 이유는 OpenFOAM의 기본 solver(simpleFoam)에서는 표면거칠기 레이놀즈 수 k^+ 가 2.25 보다 작은 경우에 표면거칠기 높이를 무시하여, 고려하고 있지 않았기 때문이다.

식 (5)에서 k_2 의 경우 Re 가 $3.0E+06$ 에서 k^+ 가 12이고 Re 가 $1.5E+07$ 에서 k^+ 가 62이며 Re 가 $2.1E+07$ 일 때 87이고, Re 가 $3.0E+07$ 일 때 k^+ 가 124로서 Re 가 증가하면서 완전거친영역으로 들어가면서 마찰저항계수가 Re 에 무관해지고 있음을 알 수 있다. 같은 식에서 k_3 의 경우에는 Re 가 $3.0E+06$ 일 때 k^+ 가 118로서 완전거친영역으로 들어가고 있음을 알 수 있었다.

마찰계수(C_f)의 경우에는 Fig. 5에 보이는 바와 같이, 가장 거친 경우($5000 \mu m$)와 중간 거친 경우($500 \mu m$)에 있어서는

거의 변화가 없으나, 표면거칠기의 높이가 가장 낮거나($12 \mu m$) 매끈한 경우에 있어서는 낮은 레이놀즈수에서 약간의 변화가 있음을 알 수 있다. 마찰계수의 값이 레이놀드 수가 클 경우에 변화가 작은 것은 Moody chart에서 볼 수 있듯이 레이놀즈 수가 매우 클 경우에 표면거칠기에 관계없이 거의 일정한 마찰계수 값을 나타내기 때문이다. 또한 OpenFOAM의 해석결과 및 해석에 사용된 solver의 특성을 검증하기 위하여 마찰계수(C_f)의 값에 대한 매끈한 평판의 마찰저항식인 Schoenherr의 식 (1)과도 비교한 결과, 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

표면 거칠기에 따른 경계층의 특징에 대하여 고찰하기 위하여 유입속도가 5.0 m/s 일 때 무차원화 된 수직거리와 속도에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보면 일정한 속도에 대하여 표면 거칠기가 증가할수록 수직거리(z/L)가 증가하여 경계층이 빨리 발달하고 있음을 보여주고 있다. 이는 표면 거칠기가 증가할수록 식 (13)에 의하여 U^+ 는 감소하여 최종적으로 동점성계수가 증가하고 이로 인해 경계층 두께는 증가함을 보여주고 있다.

각각의 표면거칠기에 대한 평판위의 속도 프로파일을 나타낸 Fig. 6에 나타난 바와 같이, 표면거칠기가 클수록 속도 그래프는 매끈한 경우에 비하여 상향 형성되고 있다. 이는 표면거칠기가 커짐에 따라 난류동점성계수가 증가하여 점성의 확산이 더 빠르게 진행되고 있음을 보여주는 것이다. 표면이 가장 거친 경우($k_s = 5000\mu m$)에서 유입속도가 5 m/s에서의 속도분포, 난류 동점성 계수(ν_t), 난류 운동 에너지(k)의 결과 그림을 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9에 각각 나타내었다.

4.2 표면거칠기의 높이(k_s)와 최초의 격자높이(h_s)의 상관관계 분석

표면거칠기의 높이(k_s)와 최초의 격자높이(h_s)의 상관관계를 알아보기 위하여 첫 번째 격자높이(h_s)와 표면거칠기 높이(k_s)를 달리하여 비교하였다. Table 4에 보이는 바와 같이, 첫 번째 격자의 높이는 표면거칠기의 높이와 거의 무시할 만한 수준(최대 0.025%)으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 Open source code (OpenFOAM)에서 제공하는 벽함수 모델 내부에서 표면거칠기의 높이를 정하여 단순 평판모델에 대한 CFD해석을 수행하였다. CFD 해석에서는 세 가지 표면거칠기의 높이에 따른 표면 마찰력과 마찰 저항 계수값을 구하여 표면거칠기의 영향을 분석하여 보았다. 또한 첫 번째 격자의 높이와 표면거칠기 높이와의 상관관계를 분석하여 보았고, Open source code(OpenFOAM)의 해석결과를 매끈한 평판의 마찰저항적인 Schoenherr의 식과도 비교, 검증하였다. 본 논문에서 사용된 표면거칠기가 고려된 벽함수와 수치해석 기법은 향후 실스케일의 선박이나 해양구조물, 각종 배관, 파이프라인 등의 수치해석에 적용이 될 수 있는 기본 자료가 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원(KIOST) 부설 선박해양플랜

Table 4 CFD analysis results comparison for the effectiveness of the first layer thickness height (h_s)

Velocity [m/s]	Shear stress(τ_w)		Difference[%]
	$k_s=2.0h_s$	$k_s=0.5h_s$	
1.0	0.0041768	0.0040714	0.02523
5.0	0.10415	0.10169	0.02361
7.0	0.20409	0.19930	0.02347
10.0	0.41652	0.40600	0.02525

트연구소(KRISO)의 “2016년 KRISO 문화조성 학습동아리 (CoP)”의 활동의 결과입니다. 선박해양플랜트연구소(KRISO)의 연구비 지원에 감사드립니다.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2016 Autumn Annual meeting, Busan, Nov.10-11, 2016.

References

- [1] <http://www.harsonic.net/professional-marine-offshore/>.
- [2] 2010, Choi J. and Kim H., "A Study of using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol.47, No.5, pp.647-655.
- [3] 2014, Demirel, Y.K., Khorasanchi, K., Turan, O. and Incecik A., "CFD approach to resistance prediction as a function of roughness," *Transport Research Arena 2014*, Paris.
- [4] 2001, Candries, M., "Drag, boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces coated with anti-foulings," *PhD. thesis*, Department of Marine Technology, University of Newcastle-upon-Tyne, UK.
- [5] 2004, Schultz, M.P., "Frictional resistance of antifouling coating systems," *ASME Journal of Fluids Engineering*, 126(6), pp.1039-1047.
- [6] 2014, Flack, K. and Schultz, M., "Roughness Effects on Wall-Bounded Turbulent Flows," *Physics of Fluids 26*.
- [7] 2013, Park, S., Park, S.W., Rhee, S.H., Lee, S.B., Chi, J.E. and Kang, S.H., "Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.5, pp.33-46.
- [8] 1932, Schoenherr, K.E., "On the resistance of flat surfaces moving through a fluid," *Naval Architect and Marine Engineering*, Vol.40, p.279.
- [9] 1986, Walderhaug, H., "Paint roughness effects on skin friction," *International Shipbuilding Progress*, Vol.33, pp.96-100.
- [10] 2016, The OpenFOAM foundation, "OpenFOAM User Guide, version 4.0."