

OpenFOAM과 어댑티드 격자를 이용한 난류 경계층의 직접 수치 모사

이상봉[†]
동아대학교 조선해양플랜트공학과

Direct Numerical Simulations of Turbulent Boundary Layer using OpenFOAM and Adapted Mesh

Sang Bong Lee[†]
Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University

Direct numerical simulations of a spatially developing turbulent boundary layer on a flat plate have been performed to verify the applicability of OpenFOAM and adapted mesh with prism layers to turbulent numerical simulation with high fidelity as well as provide a guideline on numerical schemes and parameters of OpenFOAM. Reynolds number based on a momentum thickness at inlet and a free-stream velocity was $Re_\theta = 300$. Time dependent inflow fields with near-wall turbulent structures were generated by a method of Lund et al. (1998), which was to extract instantaneous velocity fields from an auxiliary simulation with rescaled and recycled velocities at inlet. To ascertain the statistical characteristics of turbulent boundary layer, the mean profiles of streamwise velocity and turbulent intensities obtained from structured and adapted meshes were compared with the previous data.

Keywords : Turbulent boundary layer (난류 경계층), OpenFOAM (오픈폼), Direct numerical simulation (직접 수치 모사), Adapted mesh (어댑티드 격자), Structured mesh (정렬 격자)

1. 서론

높은 정도의 수치 해를 제공하는 직접 수치 모사 (direct numerical simulation, DNS)와 대형 와 모사 (large eddy simulation, LES)는 수치 해석에 필요한 많은 시간과 비용으로 인해 주로 평판, 실린더, 익형 등과 같은 단순한 형상과 낮은 레이놀즈 수를 갖는 유동 해석에 국한되어 왔다. 반면 선체 주위 유동, 복잡한 형상의 선미 부가물 후류 등과 같이 현업에서 발생하는 유동 해석의 경우에는 해의 정도가 낮더라도 수치적 효율성과 안정성을 높이기 위해 상용 프로그램을 이용한 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes simulation) 해석이 주로 활용되었다. 그러나 최근 고성능 전산기가 대형화, 보편화되고 보다 정도 높은 유동 해석이 필요해지면서 현업에서도 LES와 같은 고비용/고정도의 수치 해석에 대한 관심도가 증가하고 있다. 하지만 많은 비용을 들여 현업에서 LES 등을 시도하더라도 상용 프로그램의 제한된 접근성으로 인해 해석 결과에 대한 정도를 보장하기 어려울 뿐만 아니라 소스 코드의 폐쇄성으로 인해 정도를 개선하기도 어렵다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 소스 코드가 완전히 공개된 OpenFOAM을 이용하여 고정도 수치 해석을 수행하였다. OpenFOAM은 유한 체적법을 기반으로 하는 편미분 해석 프로그램이므로 복잡한 형상이나 다양한 격자 형태로 확장이 가능하다. 선체 저항 해석(Lee & Lee, 2014)이나 자유 수면을 고려한 운동 해석(Lee & Kim, 2015)과 같은 기존 연구를 통해 OpenFOAM의 수치적 확장성이나 안정성은 이미 상용 프로그램과 비교 검증되었으나 기존 연구들이 모두 RANS 해석을 통해 수행되었으므로 이제는 DNS나 LES와 같이 고정도 해석 결과에 대한 체계적인 정도 검증이 필요하다. 또한 선체 및 프로펠러 주위 유동에 대한 수치 모사를 위해 다면체의 비정렬 격자(polyhedral unstructured mesh)와 프리즘 층(prism layer)을 사용한 RANS 해석(Park et al. 2014)이 많이 수행되고 있는데, 이러한 비정렬 격자 형태가 고정도 수치 해석에 적합한지에 대한 검증도 필요하다. 특히 다양한 형태의 비정렬 격자 중 국소적으로 격자를 밀집시키기 위해 4분할, 8분할한 quater, octree 구조의 어댑티드 격자와 벽면 근처 프리즘 층의 조합은 격자 직교성, 효율적인 격자 밀집, 벽면 밀집도 유지를 동시에 달성할 수 있는 격자 구성이므로 벽 함수(wall function)를 사용하는 RANS에서는 매우 유용한 격자 형태이지만, 격자가 합쳐지는 영역에서 국소적으로 격

자의 비직교성이 나타나므로 DNS와 같은 고정도 해석에서 어댑티드 격자가 어떤 영향을 미치는지에 대한 검토가 수반되어야 한다. 만일 DNS나 LES에서 어댑티드 격자를 사용하더라도 유동 특성이 변하지 않는다면 RANS에서와 마찬가지로 어댑티드 격자와 프리즘 층의 조합을 이용하여 매우 효율적으로 난류 유동을 고정도 해석할 수 있는 기반이 마련되어질 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 OpenFOAM(version 3.0.0)을 이용하여 평판에서 발달하는 난류 경계층에 대한 DNS를 수행하였다. 난류 경계층을 선정한 것은 기존 연구에서 실험이나 수치 해석을 통해 검증된 결과가 많을 뿐만 아니라 단순한 주기적 경계 조건을 통해 난류 천이를 얻을 수 있는 관내 유동과 달리 내부 척도(inner scale), 외부 척도(outer scale) 등을 이용하여 입구 유동을 생성하는 보다 어려운 문제에도 OpenFOAM을 적용할 수 있음을 보이기 위함이다. 또한 저항, 자항, 파랑 하중 해석 등과 같이 조선 해양 분야에서 사용되는 대부분의 문제가 외부 유동이므로 향후 OpenFOAM을 이용한 조선 해양 관련 유동 해석에 대한 기반 지식을 제공하고자 한다. 나아가 어댑티드 격자를 통해 불필요한 부분의 격자를 감소시킴으로써 정렬 직교 격자와 동일한 정도를 유지하면서 보다 효율적으로 고정도 수치 해석 수행이 가능함을 보이고자 한다.

2. 입구 난류 유동 생성

난류 경계층을 수치 모사하기 위해서는 물리적으로 의미있는 벽면 난류 구조를 갖는 유동을 입구 경계 조건으로 부과하여야 한다. 이를 위해 Lund et al.(1998)의 방법에 따라 Fig. 1과 같은 계산 영역에서 $x=0.35m$ 의 위치에 있는 속도 성분을 재구성하여 입구 경계 조건으로 부과하였다. 즉 $x=0.35m$ 의 위치에서 만들어진 $Re_\theta=345$ 의 난류 경계층을 $Re_\theta=240$ 인 난류 경계층으로 재구성하여 입구 경계 조건으로 부과하였다. 속도 성분은 평균 속도와 변동 속도로 구분하고 내부 척도와 외부 척도에 따라 가중 함수를 사용하는 방법으로 재구성하였다. 자유 유동 속도(free-stream velocity, U_∞)는 $1m/s$ 이며, 동점도(kinematic viscosity, ν)는 $1 \times 10^{-5} m^2/s$ 로 정할 때 입구 경계에서 운동량 두께(momentum thickness, θ)는 $0.0024m$ 가 된다. $Re_\theta=300$ 에 해당하는 운동량 두께(θ_0)를 기준으로 계산 영역을 무차원화할 경우 계산 영역의 크기는 $(167\theta_0, 30\theta_0, 40\theta_0)$ 이 된다.

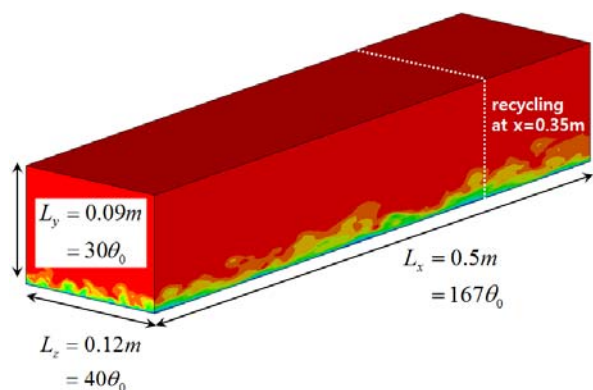


Fig. 1 Numerical domains of turbulent boundary layer simulation

난류 경계층의 직접 수치 모사를 위해 본 연구에서는 PISO(pressure implicit with split operator) 알고리즘에 기반한 pisoFoam을 바탕으로 후류 속도의 재순환(recycling)을 통해 입구 경계 조건을 생성할 수 있는 해석자를 새롭게 구성하였다. 시간에 대한 차분은 2차 정확도를 갖도록 Crank-Nicolson 기법을 사용하였으며, 공간 차분은 Table 1과 같다. 기존 연구에서 유한 차분법을 이용하여 평판의 난류 경계층을 해석한 직접 수치 모사의 경우 주로 중앙 차분법(central difference scheme)을 적용한 반면 유한 체적법을 이용하여 LES나 RANS를 수행하는 경우 TVD(total variation diminishing) van Leer 제한자를 갖는 선형 차분(이하 vanLeer)이나 normalized variable diagram(NVD) gamma 차분(GammaV), bounded 선형 차분 기법을 사용하였다(Kim et al. 2002, Haren 2011, Freitas 2014). 대류항의 이산화 를 위해 OpenFOAM에서 많이 사용하는 vanLeer나 linear-upwind 혼합 차분(linearUpwind) 기법을 사용할 경우 수치적 안정성은 우수하나 격자면에서의 속도에 따라 공간상 1차 정확도가 될 수 있어 평균 속도 분포 및 난류 강도가 부정확해진다. 본 연구에서는 공간상 2차 정확도를 유지할 수 있도록 아래 표와 같이 제한자가 없는 선형 차분(이하 linear)기법을 적용하였다.

Table 1 Numerical schemes

discretization	scheme
temporal	CrankNicolson 1.0
gradient	Gauss linear
divergent	Gauss linear
Laplacian	Gauss linear
interpolation	linear

OpenFOAM이 유한 체적법을 사용하므로 비정렬 격자를 활용하는 것도 가능하지만, 입구 경계 조건의 속도 성분을 재구성하기 위해 횡 방향 평균을 사용하기 때문에 정렬 직교 격자로 구성하는 것이 편리하다. 따라서 입구 난류 유동을 생성하기 위한 예비 수치 해석에서는 아래 Table 2와 같은 정렬 직교 격자를 사용하였으며, 생성된 난류 유동을 입구 경계 조건으로 하는 본 수치 해석에서는 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자에서 얻어진 해석 결과를 비교 분석하였다. Table 2에서 보듯이 주 유동(streamwise, x) 방향, 벽면 수직(wall normal, y) 방향, 횡(spanwise, z) 방향으로 각각 125, 64, 128개의 격자를 사용하였다. 격자 간격을 $Re_\theta=300$ 에서의 마찰 속도(friction velocity)로 무차원화하여 벽단위(wall unit)로 나타내면 $(\Delta x^+, \Delta y^+_{at\ wall}, \Delta z^+) = (20, 0.15, 5)$ 와 같다.

Table 2 Grid system for inflow generation

	x-dir.	y-dir.	z-dir.
no. cells	125	64	128
cell size	1.330	0.01 θ at wall	0.31250
	$\Delta x^+=21$	$\Delta y^+_{at\ wall}=0.15$	$\Delta z^+=5$

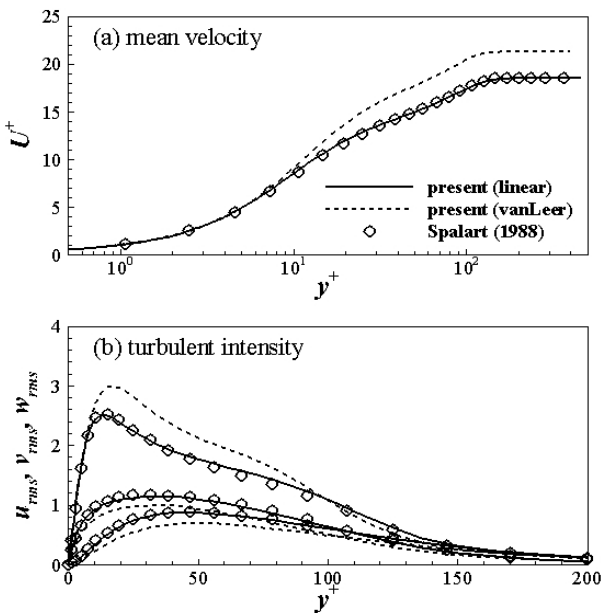


Fig. 2 Comparisons of streamwise mean velocity and turbulent intensities

입구 경계 조건은 $x=0.35m$ 에서 얻어진 비정상 속도 분포를 재구성하여 부과하였으며, 출구와 상부 경계 조건은 물리량 구배가 0이 되는 Neumann 조건을 적용하였다. 횡 방향 경계 조건은 주기적 경계 조건을 적용하였다. 이러한 수치 조건에서 수행된 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 주 유동 방향의 속도 분포와 난류 강도를 기존 연구 결과와 비교하여 Fig 2에 나타내었다. 그림에서 실선은 격자면의 물리량을 계산하기 위해 linear 기법을 적용한 결과이며, 점선은 vanLeer 기법을 적용한 결과이다. $Re_0=300$ 이 되는 $x=0.206m$ 지점에서 추출한 주 유동 방향 평균 속도 분포를 벽 단위로 무차원화(U^+)하여 그림 (a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 linear 기법을 적용한 실선 결과가 Spalart (1988)의 기존 연구 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있는데, 이는 본 연구 결과가 난류 경계층에서 나타나는 벽면 마찰 계수(friction coefficient)와 벽면 로그 법칙(log law or law of the wall)을 정확하게 모사하였음을 의미한다. 또한 같은 위치에서 난류 강도 역시 linear 기법을 적용하였을 때 기존 연구 결과와 잘 일치하므로 주 유동 방향과 구조(streamwise vortical structure) 등과 같은 벽면 난류 구조가 정확히 모사되었음을 알 수 있다. 반면 vanLeer 기법을 적용한 경우 벽면 마찰 계수와 난류 강도에서 오차가 발생하는데, 이는 vanLeer 기법의 경우 식 (1)을 통해 격자면에서 물리량을 계산하면서 경우에 따라 공간상 1차 정확도로 떨어지기 때문이다. 식 (1)을 NVD 형태로 나타낼 경우 식 (2)와 같이 표현되는데 이는 격자 중심에서의 속도 값에 따라 1차 정확도인 upwind 기법이 사용될 수 있음을 의미한다. 따라서 DNS나 LES와 같은 고정도 해석에서 확산항(divergence term)의 차분을 위해 vanLeer를 적용할 경우 수치 해의 정도가 떨어질 가능성이 높음을 유념해야 한다.

$$\gamma(r) = \frac{r + |r|}{r + 1} \tag{1}$$

$$\phi_f = \begin{cases} 2\phi_u - \phi_u^2 & 0 \leq \phi_u \leq 1 \\ \phi_u & \phi_u < 0 \text{ or } \phi_u > 1 \end{cases} \tag{2}$$

여기서 ϕ_f 와 ϕ_u 는 각각 격자면과 인접 격자에서의 물리량을 나타낸다. 그리고 $\gamma(r)$ 은 제한자(limiter)이며, r 은 식(3)과 같이 표현되는 계수이다.

$$r = \frac{\phi_u}{1 - \phi_u} \tag{3}$$

3. 난류 경계층 해석 결과 및 토의

3.1 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자의 비교

$Re_0=300$ 의 난류 경계층 유동을 입구 경계 조건으로 사용하여 새로운 난류 경계층을 수치 모사하였다. 여기서 사용한 계산 영역의 크기는 입구 난류 유동을 생성할 때 사용한 Fig 1의 영역과 동일하며, 정렬 직교 격자의 경우 입구 난류 유동을 생성할 때와 같은 격자를 사용하였다. 본 연구에서 적용한 정렬 격자의 경우 평판 경계층에서 벽면 난류 구조를 정도 높게 모사하기 위해 기존 연구들에서 많이 사용되었던 격자와 동일한 크기를 갖도록 생성하였다 (Kim et al. 2002, Lee & Sung 2005, Kim & Sung 2006). 즉 주 유동 방향 격자 간격 $\Delta x^+ \approx 20$, 횡 방향 격자 간격 $\Delta z^+ \approx 50$ 이며 벽면에 수직한 방향의 첫 번째 격자 크기 $\Delta y^+_{at\ wall} < 0.2$ 가 되도록 하였다. Re 수에 따른 벽면 단위로 무차원화한 격자 크기가 상기 범위에 해당할 경우 2차 정확도의 차분법을 적용한 직접 수치 모사를 통해 비압축성 난류 경계층의 1차 변동량을 물리적으로 타당하게 추정할 수 있다. 그러나 충격파 등과 같이 물리적 변동이 급격한 경우에는 2차 정확도의 수치 확산(numerical diffusion)에 의해 오차가 크게 발생할 수 있다 (Ekaterinaris 2005).

정렬 직교 격자가 물리량의 내삽과 구배를 정도 높게 계산하는데 유리한 것은 사실이나 Fig 3(a)에서 보듯이 경계층 바깥 영역($y > 0.03 \sim 0.04m$)과 같이 물리량의 변동이 발생하지 않는 부분까지 횡 방향으로 밀집된 격자를 사용해야 하는 등 수치적 비효율성이 생기는 문제가 있다. 그러나 본 연구에서 적용한 어댑티드 격자의 경우 격자의 직교성은 유지하면서 국소적으로 밀집된 격자를 적용할 수 있을 뿐만 아니라 벽면에서는 프리즘 연신률(stretching ratio)을 이용하여 프리즘 층을 형성하는 것이 가능하므로 효율적인 수치 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다. 따라서 경계층 내부에서는 Fig. 3(b)과 Table 3에서 보는 바와 같이 정렬 직교 격자와 유사한 격자 간격을 갖도록 생성하였으며 경계층 바깥쪽에서는 z 방향의 격자 간격을 2배씩 증가시켰다. 즉 $0 < y < 0.03m$ 에서 $\Delta z = 0.32260$, $0.03 < y < 0.06m$ 에서 $\Delta z = 0.64520$, $y > 0.06m$ 에서 $\Delta z = 0.1.29040$ 가 된다. 프리즘의 연신률(stretching

ratio)은 1.15를 사용하여 35개의 프리즘 층을 생성하였으며 프리즘 층의 바깥에서는 $\Delta y=0.004m$ 의 격자 간격을 적용하였다. 이러한 격자 구성을 적용할 경우 정렬 직교 격자에서 1,024,000개의 격자가 사용된 반면, 어댑티드 격자는 618,750개의 격자가 사용되어 정렬 직교 격자에 비해 격자 수가 40% 정도 감소하였다. 격자 수의 감소는 계산 횟수의 감소 뿐만 아니라 횡방향 격자 크기 증가에 따라 다중 격자(multi-grid)와 유사한 원리에 의해 수렴 속도가 개선되어 전체 계산 시간이 60% 이상 감소되는 효과가 있다. V-cycle의 다중 격자를 이용하여 압력의 잔여 오차(residual)를 10^{-6} 수준까지 감소시키기 위해서는 정렬 직교 격자의 경우 평균 50회의 반복 계산을 수행하는 반면 어댑티드 격자에서는 평균 12회의 반복 계산을 수행하기 때문에 격자 수 감소에 의한 계산 속도 증가 뿐만 아니라 수렴 속도 증가에 의한 계산 속도 개선 효과도 매우 높음을 확인할 수 있다.

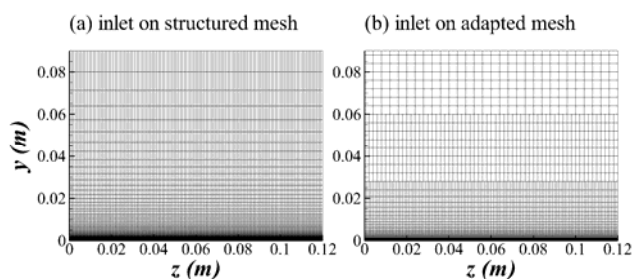


Fig. 3 Inlet grids of structured and adapted mesh

Table 3 Comparison of grid system

		x-dir.	y-dir.	z-dir.
structured	no. cells	125	64	128
	cell size	1.330	0.010	0.31250
adapted	no. cells	125	59	125
	cell size	1.330	0.010	0.32260

난류 경계층 입구 유동을 사용하여 3초 동안 초기 조건에 의한 과도(transient) 유동을 흘려 보냈다. 난류 구조의 대류 속도를 $0.5U_{\infty} \sim 0.7U_{\infty}$ 로 가정할 경우 입구에서 유입된 난류 구조가 전체 계산 영역을 통과해서 출구로 빠져 나가는데 0.7~1.0초 정도가 소요되므로 3초 동안 초기 조건에 의한 영향이 충분히 제거되었다고 볼 수 있다. 이후 9초 동안 난류 경계층 해석을 수행하면서 필요한 물리량에 대해 횡 방향 및 시간 평균을 취하였다.

난류 경계층이 발달함에 따라 주 유동 방향으로 표면 마찰 계수(skin friction coefficient, c_f), 운동량 두께(θ), 경계층 두께(δ) 등이 모두 변하므로 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자에서 계산된 평균 유동장에 대해 상기 물리량을 비교하여 Fig 4에 나타내었다. 그림에서 실선과 점선은 각각 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자에서 얻은 결과이다. 그림 (a)에서 보듯이 표면 마찰 계수는 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자에서 1% 이내에서 유사하게 예측되었다. 표면 마찰 계수가 $x=0.44m$ 이후에서 진동하는 현상이 발생한 것은 Neumann 조건에 의한 출구 경계면에서의 오차가

상류로 전파되었기 때문이다. 기존 연구 결과에서 언급하였듯이 출구 경계에 대류 경계 조건(convective boundary condition)을 적용할 경우 이러한 오차를 줄일 수 있으나 본 연구의 목적이 OpenFOAM과 어댑티드 격자를 이용한 효율적인 DNS 가능성 검토이므로 본 해석에서는 대류 경계 조건을 별도로 적용하지 않았다. 그림 (b)와 (c)에서 보듯이 적분량인 운동량 두께는 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자에서 정확히 일치하는 결과를 보여주었으며, $0.99U_{\infty}$ 를 적용한 경계층 두께 역시 잘 일치함을 알 수 있다.

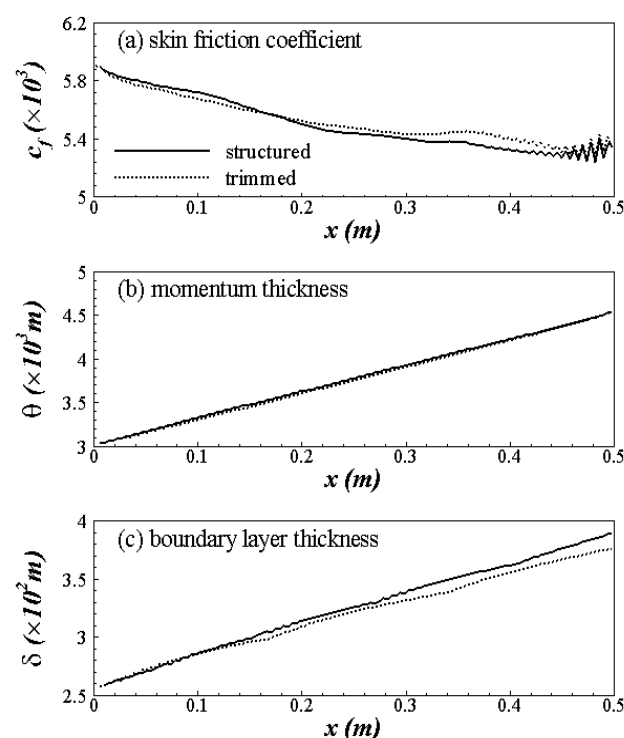


Fig. 4 Spatial development of turbulent boundary layer

어댑티드 격자에서 해석된 난류 경계층의 유효성을 검증하기 위해 $Re_{\theta}=391 \sim 393$ 에 해당하는 $x=0.3m$ 에서 주 유동 방향의 평균 속도 분포와 난류 강도를 Fig 5에 나타내었다. 그림에서 실선은 정렬 격자 분포에서 얻어진 결과이며, 점선은 어댑티드 격자에서 얻어진 결과이다. 그림에서 보듯이 정렬 직교 격자에서 얻어진 결과와 동일한 속도 분포와 난류 강도를 어댑티드 격자에서 얻을 수 있다. 주 유동 방향의 평균 속도 분포(정렬 직교 격자와 어댑티드 격자의 평균 속도 분포 중첩)가 기존 연구 결과(Spaltart, 1988)와 차이가 나는 것은 기존 연구 결과가 $Re_{\theta}=300$ 에서 해석된 결과인 반면 본 계산에서는 $Re_{\theta}=300$ 의 난류 경계층을 입구 유동으로 사용하여 $Re_{\theta}=391 \sim 393$ 에서 평균 속도 분포를 추출하였으므로 Fig 4(a)에서 보듯이 무차원화에 사용한 표면 마찰 계수가 경계층의 운동량 두께에 따라 상이하기 때문이다. 한편 주 유동 방향 난류 강도가 최대가 되는 지점이 정렬 직교 격자와 어댑티드 격자 모두 $y^+ = 12 \sim 15$ 에서 형성된 것과 강도의 크기가 일치하는 것은 벽면 난류 구조가 통계적으로 동일하게 모사되었음을 뜻한다.

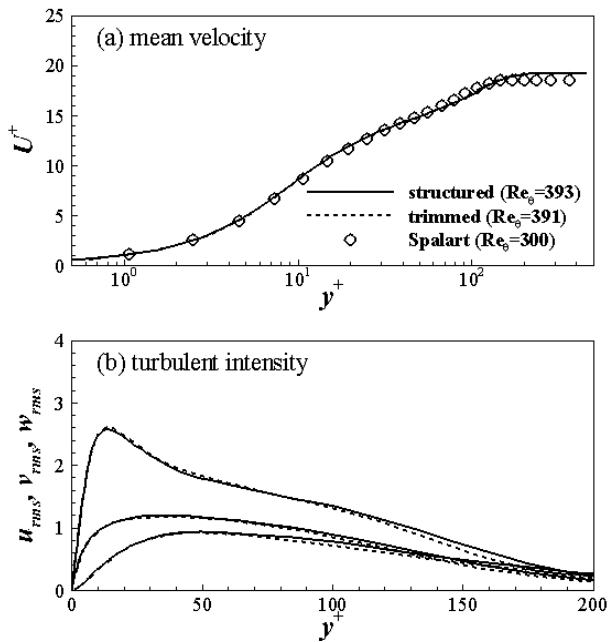


Fig. 5 Comparisons of streamwise mean velocity and turbulent intensities between structured and adapted mesh

순간 유동장에서 나타나는 난류 유동 특성을 비교하기 위해 $y^+=12$ 에 해당하는 단면에서 주 유동 방향의 속도 변동($u' = u - U$)의 2차원 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 u 와 U 는 각각 주 유동 방향의 순간 속도와 평균 속도를 의미한다. $y^+=12$ 는 주 유동 방향 속도 성분의 난류 강도가 최대가 되는 지점으로 벽면 난류 구조의 순간 특성을 가장 명확히 관찰할 수 있는 위치이다. 그림에서 속도 변동은 $-0.3U_\infty \sim +0.3U_\infty$ 범위를 표시하였다. 그림에서 보듯이 벽면 난류 구조에서 전형적으로 발생하는 고속 및 저속 실 구조(high- and low-speed streaky structure)들이 정렬 격자와 어댑티드 격자에서 정성적으로 유사한 형태로 관찰된다. 동일한 난류 유동이 입구 경계에서 주어지므로 입구 근처에서는 동일한 크기의 속도 변동이 관찰되지만, 격자 형태의 차이로 인해 후류로 갈수록 속도 변동 분포가 다소 차이가 발생하였다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 난류 유동의 통계적 특성이 동일하므로 정렬 격자와 어댑티드 격자에서 같은 난류 경계층이 형성되었다고 볼 수 있다.

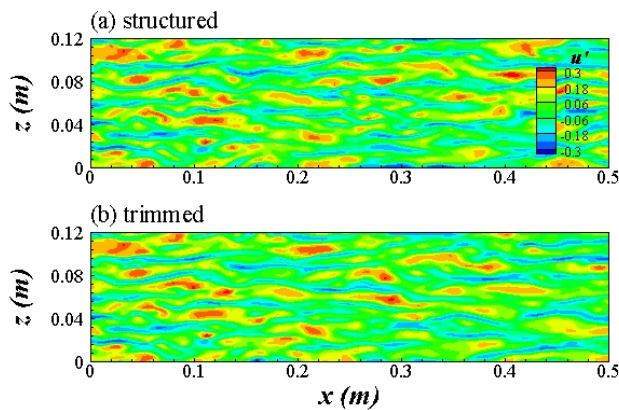


Fig. 6 Instantaneous observation of streamwise velocity fluctuations at $y^+=12$ plane

3.2 격자 구성 인자에 따른 영향

지금까지 살펴본 바와 같이 어댑티드 격자와 프리즘 층을 이용하여 정렬 격자와 동일한 특성의 난류 경계층을 매우 효율적(격자수 40% 감소, 계산 시간 60% 감소)으로 수치 모사할 수 있다. 프리즘 층을 이용한 어댑티드 격자의 각 인자가 난류 경계층의 수치 모사에 미치는 영향을 분석하기에 앞서 먼저 아래와 같은 격자 구성의 전제 조건을 설정하였다.

- a. 벽면 첫 번째 격자 크기는 $\Delta y^+_{at\ wall} < 0.2$ 를 만족함
- b. 벽면 근처 횡 방향 격자 크기는 $\Delta z^+ = 5$ 를 유지함
- c. 벽면 근처 주 유동 방향 격자 크기는 $\Delta x^+ \approx 20$ 을 유지함

상기 전제 조건을 통해 먼저 프리즘 층의 연신률을 1.15부터 1.3까지 변화시키면서 격자를 생성하여 난류 경계층을 수치 모사하였다. Table 4에서 'default'는 앞서 정렬 직교 격자와 비교한 어댑티드 격자에서 기 적용한 프리즘 층이며, 'prism #1'과 'prism #2'에서는 벽면 격자 크기와 프리즘 층의 마지막 격자 크기를 고려하여 연신률과 프리즘 층의 두께를 변화시켰다. 프리즘 층 바깥 영역은 $\Delta y = 0.004m$ 를 사용하였으며 횡 방향 격자 간격은 'default'에서 적용한 것과 동일하게 $0 < y < 0.03m$ 에서 $\Delta z = 0.3226\theta$, $0.03 < y < 0.06m$ 에서 $\Delta z = 0.6452\theta$, $y > 0.06m$ 에서 $\Delta z = 0.1.2904\theta$ 가 되도록 하였다. 이렇게 'prism #1'과 'prism #2' 격자를 생성할 경우 'default'에 비해 각각 10만개, 20만개 정도 총 격자수가 감소하였으며, 이에 비례하여 계산 시간 역시 각각 14%, 31% 정도 감소하였다.

Table 4 Parameters of prism layer

	default	prism #1	prism #2
no. layer	35	28	20
$\Delta y^+_{at\ wall}$	0.15	0.16	0.17
stretching ratio	1.15	1.20	1.30
no. cells	618,750	525,000	420,000
calculation time	100%	86%	69%

각 격자에 대해 $x=0.3m$ 에서 마찰 속도를 비교해보면 'prism #1'의 경우 'default'에 비해 1.2%, 'prism #2'의 경우 4% 정도 작게 예측되었다. 따라서 마찰 속도로 무차원화한 주 유동 방향의 평균 속도 분포와 난류 강도도 Fig. 7에서 보는 바와 같이 약간 차이를 보이는데, 연신률이 커짐에 따라 평균 속도 분포와 난류 강도의 오차가 커짐을 알 수 있다. 따라서 고정도 수치 모사를 위해서는 1.2 이하의 연신률을 사용하여 격자를 생성하는 것이 바람직하나 격자수가 감소하는 비율과 비례하여 계산 시간이 줄어드는 점을 감안할 때 보다 효율적인 DNS나 LES가 필요한 경우 1.3의 연신률을 사용하는 것도 가능하다.

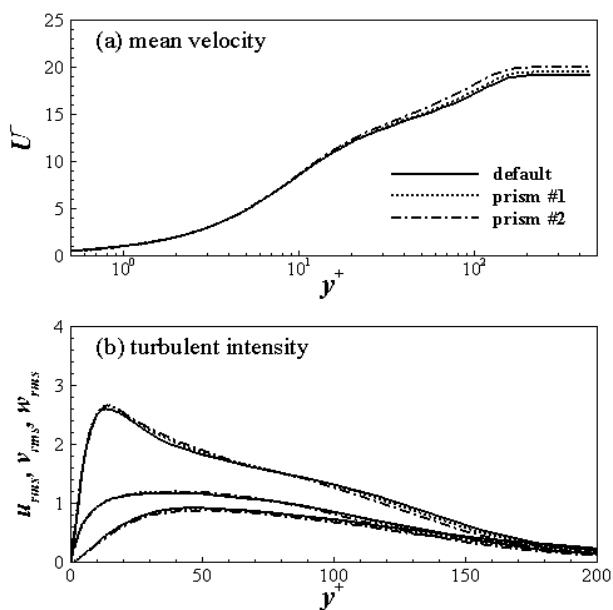


Fig. 7 Influence of prism layers on mean velocity and turbulent intensities of turbulent boundary layer

횡 방향 격자 간격에 따른 구간을 Table 5와 같이 서로 다르게 설정하여 난류 경계층을 수치 모사하였다. 'default'는 앞서 정렬 직교 격자와 비교한 어댑티드 격자에서 적용한 횡 방향 격자 구성이며, 'spanwise #1'은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 보다 빠르게 횡 방향 격자 간격을 증가시킴으로써 전체 격자수를 감소시키기 위한 어댑티드 격자 구성이다. 그러나 경계층 비갈 영역은 횡 방향 격자가 이미 성긴 구간이므로 전체 격자수에서 큰 감소 효과는 기대하기 어렵다. 따라서 난류 경계층 모사에 소요되는 전체 계산 시간 역시 거의 동일하였다.

Table 5 Spanwise refinement of adapted mesh

	default	spanwise #1
$\Delta z^+ = 5.2$	$0 < y < 0.03m$	$0 < y < 0.03m$
$\Delta z^+ = 10.3$	$0.03m < y < 0.06m$	$0.03m < y < 0.04m$
$\Delta z^+ = 20.6$	$y > 0.06m$	$y > 0.04m$
no. cells	618,750	611,250
calculation time	100%	99%

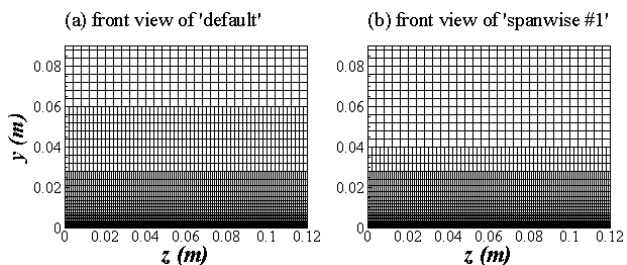


Fig. 8 Front view of 'default' and 'spanwise #1' grid systems

유사하게 주 유동 방향 격자 간격에 따른 구간을 Table 6과 같이 서로 다르게 설정하여 난류 경계층을 수치 모사하였다. 'streamwise #1'은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 경계층 비갈 영역에서 주 유동 방향 격자 간격을 증가시킴으로써 전체 격자수를 감소시키기 위한 어댑티드 격자 구성이지만 횡 방향 밀집도 변화와 마찬가지로 전체 격자수가 크게 감소하지는 않는다. 격자

수가 감소하였음에도 불구하고 수치 모사에 소요되는 계산 시간은 오히려 20% 이상 증가하였는데, 이는 각 계산 시간 단계에서 압력의 잔여 오차를 감소시키는데 필요한 반복 계산이 평균 12회에서 소요되는 30회로 증가하였기 때문이다. 프리즘 층이나 횡 방향 격자 간격을 증가시켰을 때와 달리 주 유동 방향의 격자 간격을 증가시켰을 때 V-cycle을 이용한 다중 격자 해석의 수렴 속도가 악화되는 원인은 잔여 오차의 파장별 수렴 속도 분석 등을 통해 향후 체계적으로 밝혀져야 할 부분이다.

Table 6 Streamwise refinement of adapted mesh

	default	streamwise #1
$\Delta x^+ = 20$	$0 < y < 0.03m$	$0 < y < 0.03$
$\Delta x^+ = 40$	$0.03 < y < 0.06m$	$0.03 < y < 0.04$
$\Delta x^+ = 80$	$y > 0.06$	$y > 0.04$
no. cells	618,750	585,170
calculation time	100%	122%

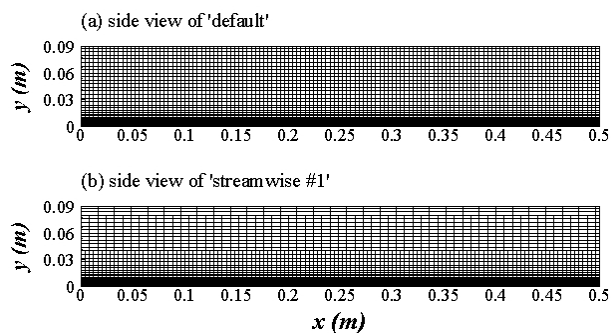


Fig. 9 Side view of 'default' and 'streamwise #1' grid systems

각 격자에서 얻어진 난류 경계층의 통계적 특성은 Fig. 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 'spanwise #1'에서는 'default'와 동일한 벽면 마찰 속도, 평균 속도, 난류 강도를 얻을 수 있는 반면, 'streamwise #1'에서는 마찰 속도가 2.5% 높게 나타났다.

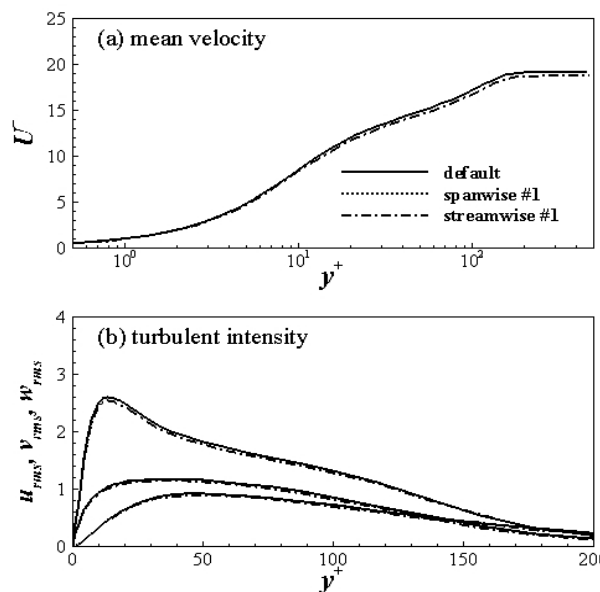


Fig. 10 Influence of spanwise and streamwise refinement of adapted mesh on mean velocity and turbulent intensities of turbulent boundary layer

4. 결론

본 연구에서는 OpenFOAM과 어댑티드 격자를 이용하여 난류 경계층에 대한 효율적인 고정도 수치 모사가 가능함을 보였다. $Re_0=300$ 의 난류 경계층을 입구 유동 조건으로 하여 주 유동 방향에 대한 표면 마찰 계수, 운동량 및 경계층 두께 변화 등을 비교하였으며, $Re_0=390$ 에서 평균 속도 분포, 난류 강도를 비교 분석하였다. 어댑티드 격자와 프리즘 층을 이용할 경우 기존 정렬 직교 격자에 비해 절반 정도의 격자를 사용하더라도 동일한 난류 경계층을 수치 모사할 수 있었다. 또한 어댑티드 격자를 통해 경계층 바깥 영역에서 횡 방향 격자 간격을 증가시킴에 따라 각 계산 단계에서 동일한 압력 잔여 오차를 얻는데 필요한 반복 계산 횟수가 감소함으로써 계산 속도 개선 효과도 매우 높음을 확인할 수 있다. 프리즘 층의 연신률을 증가시킬수록 전체 격자수도 감소하지만 벽면 마찰 속도의 오차 역시 커지게 되므로 정밀한 수치 해를 얻기 위해서는 1.2 이하의 연신률을 사용하는 것이 바람직하다. 경계층 바깥 영역에서 횡 방향 격자 밀집도나 주 유동 방향 격자 밀집도를 변화시키더라도 전체 격자수를 감소시키는 효과는 미미하였다. 다만 프리즘 층이나 횡 방향 격자 간격을 증가시켰을 때와 달리 주 유동 방향의 격자 간격을 증가시켰을 때 다중 격자 해석의 수렴 속도가 악화되는 원인은 향후 체계적으로 밝혀져야 할 것이다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

Ekaterinaris J. A., 2005, High-Order Accurate, Low Numerical Diffusion Methods for Aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 41, pp.192-300.

Freitas, P. G. F. E., 2014, *Numerical Simulation of Compressible Flow over a Deep Cavity*, Master Thesis. Técnico Lisboa.

Haren, S. W., 2011, *Testing DNS Capability of OpenFOAM and STAR-CCM+*, Master Thesis. Delft University of Technology.

Kim, J., Choi, J. -I. & Sung, H. J., 2002, Relationship between Wall Pressure Fluctuations and Streamwise Vortices in a Turbulent Boundary Layer, *Physics of Fluids*, 14(2), pp.898-901.

Kim, K. & Sung, H. J., 2006, Effects of Unsteady Blowing through a Spanwise Slot on a Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 557, pp.423-450.

Lee, J. -H. & Sung, H. J., 2005, Response of a Spatially Developing Turbulent Boundary Layer to a Spanwise Oscillating Electromagnetic Force, *Journal of Turbulence*, 6(39), pp.1-15.

Lee, S. & Kim, B., 2015, A Numerical Study on Manoeuvrability of Wind Turbine Installation Vessel Using OpenFOAM, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), pp.466-477.

Lee, S. B. & Lee, Y. M., 2014, Statistical Reliability Analysis of Numerical Simulation for Prediction of Model-Ship Resistance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(4), pp.321-327.

Lund, T. S., Wu, X. & Squires, K. D., 1998, Generation of Turbulent Inflow Data for Spatially-Developing Boundary Layer Simulations. *Journal of Computational Physics*, 140, pp.233-258.

Park, S. H., Lee, S. B. & Lee, Y. M., 2014, Study on the Estimation of the Optimum Trims in Container Carriers by using CFD Analysis of Ship Resistances. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(5), pp.429-434.

Spalart, P. R., 1988, Direct Numerical Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $Re_0=1410$. *Journal of Fluid Mechanics*, 187, pp.61-98.



이 상 봉