

정렬 및 비정렬 격자를 이용한 선박 저항 계산에서 Courant 수의 공간 분포 및 LTS 기법의 효율성에 관한 연구

이상봉¹·백광준²·박동우^{3,†}
동아대학교 조선해양플랜트공학과¹
인하대학교 조선해양공학과²
동명대학교 조선해양공학과³

A Study on Spatial Distributions of Courant Number and Numerical Efficiency of LTS Method in Calculation of Ship Resistance Using Structured and Unstructured Meshes

Sang Bong Lee¹·Kwang-Jun Paik²·Dong Woo Park^{3,†}
Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University³

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.

Numerical simulations of ship resistance have been performed to compare spatial characteristics of Courant number when using structured and unstructured meshes. When Euler scheme was used for time integration, the structured mesh provided a more efficient calculation because the calculation time interval was larger than that of unstructured mesh. The automatic generation of very small meshes in the unstructured mesh was mainly responsible for the limitation of calculation time interval. When local time stepping Euler scheme was applied, however, the ship resistance of unstructured mesh showed a rapid convergence while a slow convergence of ship resistance in structured mesh was caused by the small time interval in bulbous bow.

Keywords : Ship resistance(선박 저항), OpenFOAM(오픈폼), Local time stepping(국소 시간 진행), Structured mesh(정렬 격자), Unstructured mesh(비정렬 격자)

1. 서론

정수 상태의 자유 수면에서 선체 저항 해석을 수행하는 경우 수면 파형, 선체 저항 등 최종 수치 해가 정상 상태의 특성을 보임에도 불구하고 수치 안정성을 확보하기 위해 일반적으로 비정상 해석을 수행한다. 비정상 수치 해석은 Navier-Stokes 방정식에서 계산 시간 간격(Δt)을 감소시킴으로써 대각 행렬 성분을 크게 하여 수치 안정성을 높일 수 있는 장점이 있으나, 계산량이 증가하여 수치 효율성이 감소하는 단점이 있다. 즉 일반적인 시간 차분 기법이 미리 설정된 시간 간격 혹은 최대 Courant 수를 결정하는 최소 시간 간격을 전 계산 영역에 동일하게 사용하게

되므로 특정 격자의 수치적 안정성을 만족시키기 위해 결정된 Δt 가 다른 격자의 수치 효율성을 악화시키는 결정적 요인으로 작용한다. 특히 정수 중 선체 저항을 해석하는 경우 지나치게 작은 Δt 로 인해 정상 상태의 최종 해에 이르는 과도 응답에 너무 많은 계산 시간이 소요되는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결함으로써 효율적으로 선체 저항 해석을 수행하기 위해 pseudo-transient 기법 (Perez, et al., 2008)이나 Local Time Stepping(LTS) 기법 (Lee & Lee, 2014; Asén 2014)을 사용하고 자 하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 기존의 연구 결과들은 상기 기법들을 이용하여 정수 상태의 선체 저항 해석을 수행할 결과에 초점을 맞추고 있으므로, 자유 수면을 갖는 선체 주위 유동

을 효율적으로 해석하기 위해 최적화된 수치 인자를 결정하는 근거가 여전히 부족하다. 그리고 저항 해석을 위해 정렬 격자나 비정렬 격자 중에 하나를 선택하게 되는데, 격자의 일관성을 유지하는 측면에서 정렬 격자를 선택하거나 격자 생성 작업의 편의성을 확보하기 위해 비정렬 격자를 선택한다. 그러나 격자의 일관성이나 저항의 정밀도, 격자 생성의 작업 편의성이 아닌 정렬 격자와 비정렬 격자가 갖는 수치 효율성에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

수치 안정성 관점에서 계산 시간 간격의 선택은 유동 속도 및 격자 크기로 결정되는 Courant 수와 밀접한 상관이 있으므로 선체 주위 유동 속도의 특성과 격자 형태 그에 따른 계산 시간 간격의 결정에 대한 분석이 필요하다. 이러한 분석을 통해 LTS 기법이 가장 효율적으로 작용할 수 있도록 필터링/댐핑 계수 등과 같은 수치 인자를 최적화할 수 있을 뿐만 아니라, 일반적인 Euler 시간 차분과 혼용할 수 있는 기술적 근거를 제시할 수 있다. 특히 현재 OpenFOAM에서 제공하는 LTS 기법인 localEuler를 기본 형태 그대로 사용할 경우 정수 중 저항 해석은 가능하나, 각 격자마다 다른 시간 간격이 적용되므로 프로펠러가 회전하는 저항 해석은 불가능한 한계를 갖고 있다. 따라서 LTS 기법을 저항 해석으로 확장하고 보다 효율적인 LTS 계산 기법을 정립하기 위해서는 격자 형태와 계산 시간 간격 그리고 선체 주위 유동 특성을 파악하는 것이 필수적이다. 뿐만 아니라 Courant 수가 유동 속도와 격자 크기에 의해 결정되므로 선체 주위에서 Courant 수가 어떻게 분포하는지를 분석함으로써 선체 주위 유동 속도에 최적화된 격자 구성을 검토할 수 있다.

이를 위해 본 연구에서는 공개 소스 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 정렬 격자와 비정렬 격자에서 정수 상태의 선체 저항 해석을 수행하여 Courant 수의 공간 분포 특성을 분석하였다. 그리고 LTS 기법을 적용할 경우 국소 시간 분포의 공간적 특성을 분석함으로써 수치적 효율성을 비교하였다. 수치 해석을 수행하기 위해 기존 연구에서 선체 저항에 대한 격자 의존도와 격자 불확실성 해석이 충분히 검증된 정렬 격자와 비정렬 격자를 대상 격자로 사용하였으며, 선체에 작용하는 힘과 수면파가 일정하게 수렴하는 정수 중 저항 성능 해석에 초점을 맞추었다. 또한 OpenFOAM이 비정렬 격자용 해석자이므로 본 연구에서 나타난 Courant 수 및 시간 간격의 공간 특성, 수치적 효율성 역시 OpenFOAM의 LTS 기법에 한정하여 검토하는 것이 바람직하다.

2. 수치 해석 조건

본 연구에 사용한 대상선은 KCS(Kriso Container Ship)이며, 주요 요목은 Table 1과 같다. 정수 중 구속 조건으로 타가 없는 상태에서 저항 해석을 수행하였다.

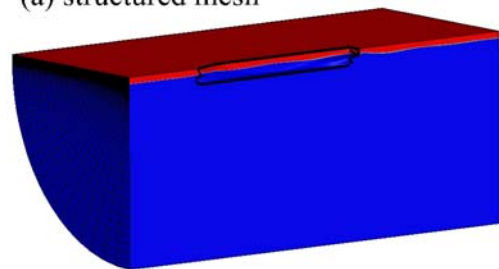
정렬 격자와 비정렬 격자로 구성된 계산 영역은 Fig. 1과 같다. 정렬 격자에서 선체 벽면 격자의 높이는 0.003 m로 설정하였으며, 자유 수면에서는 수직 방향으로 0.006 m가 되도록 격자를 생성하였다. 선체 표면에는 10,827개의 격자가 분포되어 있으며, 전체 격자수는 810,720개이다. 가장 작은 격자의 부피는 $0.82 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ 이며, 구상 선수의 벽면에 위치하고 있다. 비정렬

격자의 경우 어댑티드 격자를 구성하여 선체 근처에서 격자를 밀집시키는 방식을 적용하였으며, 벽면 격자 간격을 일정하게 유지하기 위해 선체 표면에서는 5개의 프리즘 층을 생성하였다. 선체 표면에는 34,675개의 격자가 분포되어 있으며, 전체 격자수는 872,164개이다. 생성된 비정렬 격자 중 가장 작은 격자의 부피는 $0.79 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 이다. 본 연구에서 사용한 정렬 격자는 Choi, et al. (2009), Choi, et al. (2010), Park, et al. (2013)의 기존 연구를 참조하였으며, 비정렬 격자는 Lee & Lee (2014), Park, et al. (2014)의 기존 연구를 참조하여 생성하였다. 정렬 격자의 경우 O-H 형태의 격자 구성을 가지며, 선체 표면에서 y+의 평균 값을 50 정도에서 유지하도록 하였다. 이와 같은 정렬 격자에서 선체에 작용하는 저항의 수렴성 및 격자 불확실성은 Choi, et al. (2010)에서 체계적으로 분석되었다. 비정렬 격자의 경우 선체 표면에서 평균적으로 y+=30 정도를 유지하도록 프리즘 층을 구성하였으며, 선체 저항의 수렴성 및 격자 불확실성 역시 Lee and Lee (2014)에서 분석되었다.

Table 1 Principal particulars

	Full scale	Model scale
Lpp (m)	230	7.2786
Draught (m)	10.8	0.3418
Displacement (m ³)	52,030	1.6489
Speed	24 knots	2.196 m/s
Froude number	0.26	0.26

(a) structured mesh



(b) unstructured mesh

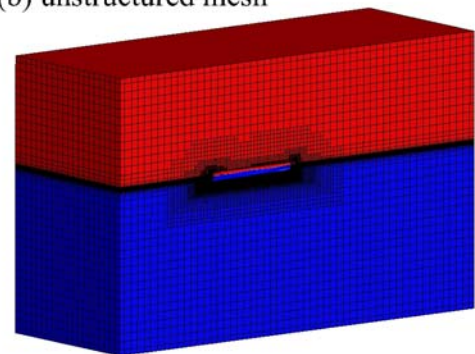


Fig. 1 Numerical domains of structured and unstructured meshes

다상 유동을 위한 지배 방정식은 유체체적법(Volume of Fluid, VOF)을 이용하여 차분하였으며, 난류 모델은 k- ω SST 모델을 사용하였다. 자유 수면을 갖는 비압축성 유동에 대한 지배 방정식은 기존 연구 (Choi, et al., 2010)에서 상세히 설명되어 있으므로 여기서는 local time stepping을 이용한 시간 차분 기법에 대해 자세히 살펴보고자 한다. 본 연구에서 시간에 대한 차분은 Euler 기법과 local time stepping Euler 기법을 사용하였다. Euler 기법과 local time stepping Euler 기법을 적용한 운동량 차분 방정식은 아래 식 (1)과 같이 동일하게 표현할 수 있다.

$$\frac{\vec{U}^{(n+1)} - \vec{U}^{(n)}}{\Delta t} V_P + \sum_f F^{(n+1)} \vec{U}_f^{(n+1)} + \int_V \nabla p dV - \nu \sum_f \vec{S} \cdot \nabla_f \vec{U}^{(n+1)} = 0 \quad (1)$$

여기서 \vec{U} 는 각 격자점에서 속도 벡터이며, VP는 격자 부피를 나타낸다. F는 격자를 구성하는 면(f)에서의 운동량 플럭스이며, \vec{U}_f 는 격자면에서의 속도 벡터이다. V와 dV는 격자 체적과 미소 체적이고, p와 ν 는 유체의 압력과 점성을 뜻한다. \vec{S} 는 면벡터를 나타내며 ∇_f 는 격자면에서의 구배를 의미하는 연산자이다. (n)은 이전 계산 단계에서의 물리량을 나타내며, (n+1)은 현재 계산 단계에서의 물리량을 뜻한다. Euler 기법의 경우 계산 시간 간격(Δt)이 모든 격자점에 대해 동일한 값이 적용되며, local time stepping Euler 기법에서는 아래 식 (2)에 의해 각 격자점에서의 국소 $\Delta t(local)$ 가 결정된다 (Lee & Lee, 2014; Kim, 2016; OpenFOAM wiki-Co, 2012).

$$\frac{1}{\Delta t_{(local)}} = \max \left[\frac{Co_{(local)}}{Co_{max}}, 1 \right] \frac{1}{\Delta t_{max}} \quad (2)$$

비정상항, 대류항, 구배항 및 확산항에 대한 공간 차분은 Table 2와 같다. divSchemes에 대해 OpenFOAM에서 많이 사용하는 vanLeer limiter를 사용하였다. 시간 간격은 Courant 수가 2.0이 되도록 가변적 Δt 를 사용하여 30초가 될 때까지 저항 해석을 수행하였다. 정렬 격자의 경우 $\Delta t=0.0015s \sim 0.002s$ 사이에서 시간 간격이 정해지며, 비정렬 격자의 경우 $\Delta t=0.0005s \sim 0.0007s$ 사이에서 시간 간격이 정해졌다. OpenFOAM에서는 다상 유동 해석 시 속도와 압력의 분리를 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하고 있으며, 압력에 대해서는 다중 격자 해석자(multi-grid solver), 속도와 난류량에 대해서는 smooth 해석자를 각각 적용하였다.

Fig. 2는 정렬 격자 및 비정렬 격자에서 시간에 따른 CTM의 변화를 보여준다. 그림에서 보듯이 진폭 및 주기에는 다소 차이가 있으나 주기적인 진폭의 감쇠를 고려하여 정렬 격자의 경우 평균값 3.49×10^{-3} , 비정렬 격자의 경우 평균값 3.48×10^{-3} 로 선체 저항 계수(CTM)를 계산하였다.

Table 2 Numerical schemes

entry	scheme
ddtSchemes	Euler, LTS Euler
gradSchemes	Gauss linear
divSchemes	Gauss vanLeer
laplacianSchemes	Gauss linear corrected
interpolationSchemes	linear

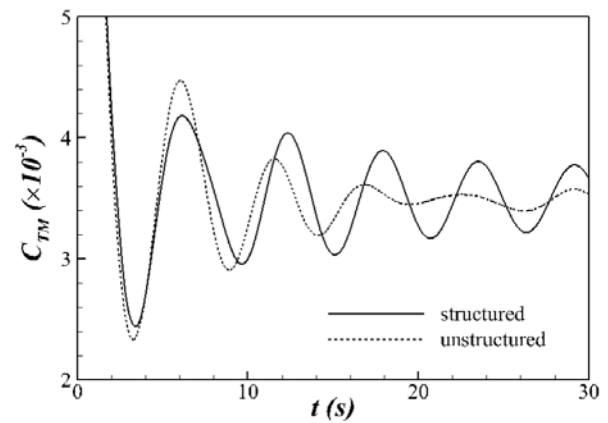


Fig. 2 Time history of total resistance coefficient

3. 결과 및 토의

3.1 Courant 수의 분포 특성

정렬 격자 및 비정렬 격자를 이용한 저항 해석에서 전 계산 영역에 걸쳐 관찰되는 Courant 수에 대한 히스토그램을 Fig. 3에 나타내었다. 빈도에 해당하는 y 축을 로그 척도로 나타내었음을 감안할 때 정렬 격자의 경우 높은 Courant 수를 갖는 격자가 상대적으로 많은 반면, 비정렬 격자의 경우 대부분의 격자에서 Courant 수가 매우 낮은 상태이다. 구체적으로 살펴보면 정렬 격자의 경우 Courant 수가 0.1 이하인 경우가 전체 격자 수의 36%, 0.2 이하 60%, 0.3 이하 75%, 0.4 이하 85%, 0.5 이하 92%를 보여주는 반면, 비정렬 격자의 경우 Courant 수가 0.1 이하 90%, 0.2 이하인 경우가 전체 격자 수의 99%를 차지한다. 높은 Courant 수에 대해서도 정렬 격자의 경우 1.0이 넘는 격자 수가 853개인 반면, 비정렬 격자의 경우 단지 23개의 격자에서 1.0이 넘는 Courant 수가 관찰된다. 이는 비정렬 격자에서 23개의 격자로 인해 전체 계산 시간 간격이 제한을 받음으로써 나머지 격자의 수치 효율성을 감소시키고 있음을 의미한다.

Courant 수가 분포하는 특성을 보다 자세히 관찰하기 위해 각 x 위치에 해당하는 모든 격자의 Courant 수를 Fig. 4에 나타내었다. 정렬 격자의 경우 높은 Courant 수가 FP(forward perpendicular, x=-3.639 m)와 AP(after perpendicular, x=+3.639 m)근처에 집중되어 있는데 이는 선형의 곡률 변화가 심한 FP와 AP 근처에서

격자 간격을 작게 유지하였기 때문이다. 특히 AP 부근보다 FP 부근에서 Courant 수가 높게 나타나는 것은 경계층이 충분히 발달되지 않은 선수부의 벽면 근처에서 높은 속도가 발생하기 때문이며, 선미로 갈수록 경계층이 발달하여 선체 벽면 근처에서 유동 속도가 낮아지기 때문이다. 반면 비정렬 격자의 경우에는 정렬 격자와 달리 몇 개의 격자점에서 나타나는 Courant 수가 전체 계산 영역의 시간 간격을 제한하고 있는데, 이러한 점들은 주로 선수부와 선미부에 집중적으로 분포하고 있다.

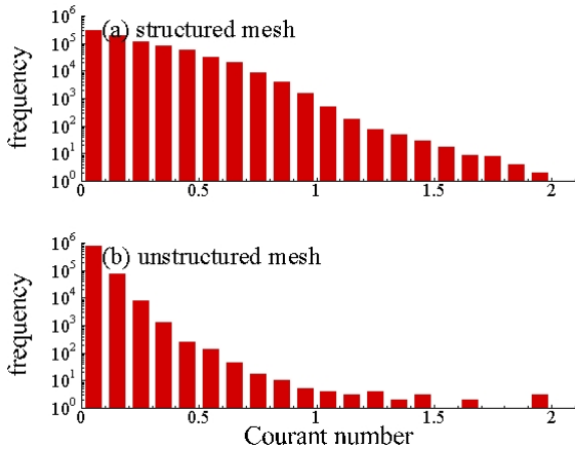


Fig. 3 Histograms of Courant number when using structured and unstructured meshes

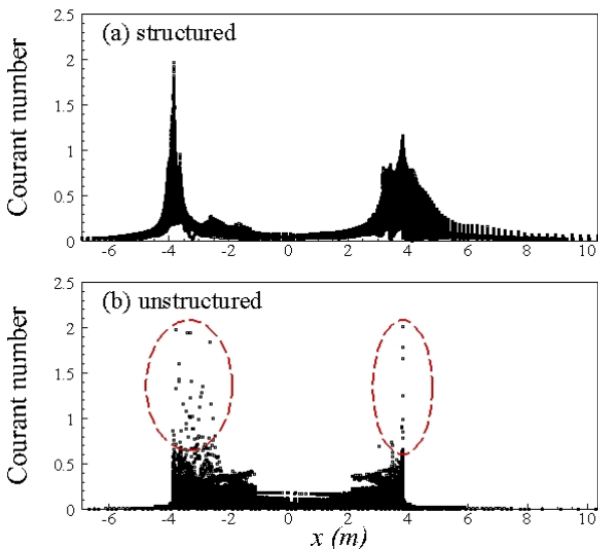


Fig. 4 Streamwise distribution of Courant number

Courant 수가 높게 나타나는 격자 형태 및 유동 특성을 분석하기 위해 정렬 격자에서 Courant 수가 1보다 큰 지점에 대해 격자 부피 및 유동 속도 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 각 그림에서 (a)는 Courant 수와 격자 부피와의 상관 관계를 나타내며, (b)는 x 방향 유동 속도, (c)는 y 방향 유동 속도 그리고 (d)는 z 방향 유동 속도와의 상관 관계를 보여준다. 그림에서 보듯이 격자 부피가 작을수록 그리고 y 방향 및 z 방향 속도가 클수록 높은 Courant 수가

나타남을 알 수 있다. 배의 전진 속도가 2.196 m/s이므로 Fig. 5(b)에서 배의 전진 속도와 유사한 유동 속도를 갖는 격자점이 많이 나타나는 것이 Courant 수와 특별한 상관 관계를 갖는다고 보기 어렵다. 특히 3 m/s를 초과하는 x 방향 유동 속도를 갖는 격자점에서 Courant 수가 1 근처에 분포하므로 x 방향 유동 속도가 높은 Courant 수를 결정하는 지배적인 요인이라고 보기 어렵다.

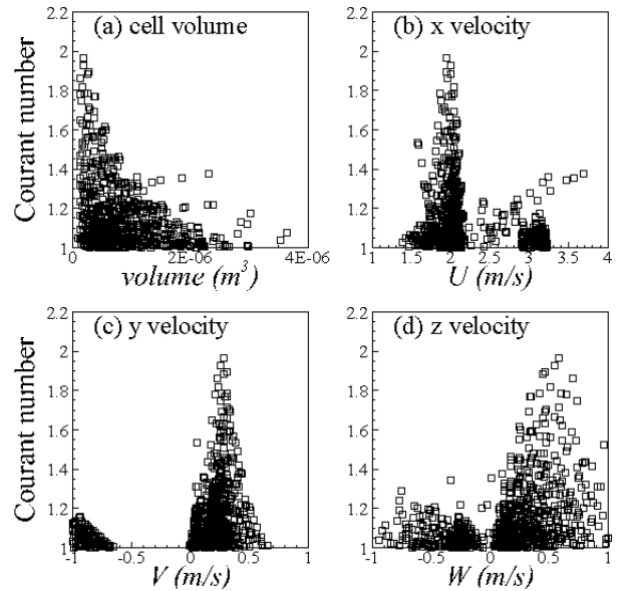


Fig. 5 Correlation of Courant number with mesh volume and flow velocities in structured mesh

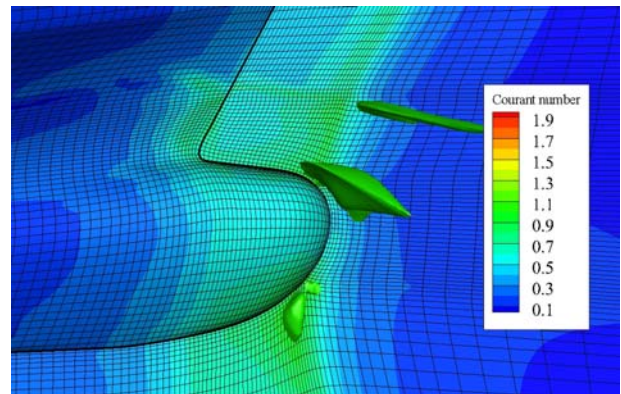


Fig. 6 Spatial distribution of Courant number in structured mesh

정렬 격자에서 나타나는 Courant 수의 공간 분포 및 표면 격자를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 파란 색은 Courant 수가 0.1이하인 영역이며 녹색은 1.0, 빨간색은 1.9 이상인 영역을 나타낸다. 공간 영역에서 Courant 수가 1.0이 이상인 경우 iso-contour 형태로 표시하였다. 그림에서 보듯이 대부분의 높은 Courant 수는 구상 선수의 곡면 부근에 위치하는 격자에서 주로 나타난다. 구상 선수의 기하학적 곡률을 정확히 모사하고 그에 따른 압력 구배를 정도 높게 모사해야 하므로 구상 선수의 곡면

부근에서 격자의 크기를 키우기 어렵다는 점을 감안할 때 정렬 격자의 재구성을 통해 계산 시간 간격을 대폭 개선하는 것은 쉽지 않은 일이다.

반면 비정렬 격자의 경우 0.5보다 큰 Courant 수를 분석한 Fig. 7에서 보듯이 유동 속도에 대한 영향은 크지 않으며 주로 부피가 작은 격자에서 높은 Courant 수가 발생함을 알 수 있다. 높은 Courant 수가 나타나는 격자의 부피는 정렬 격자에 비해 1/10정도에 불과하다.

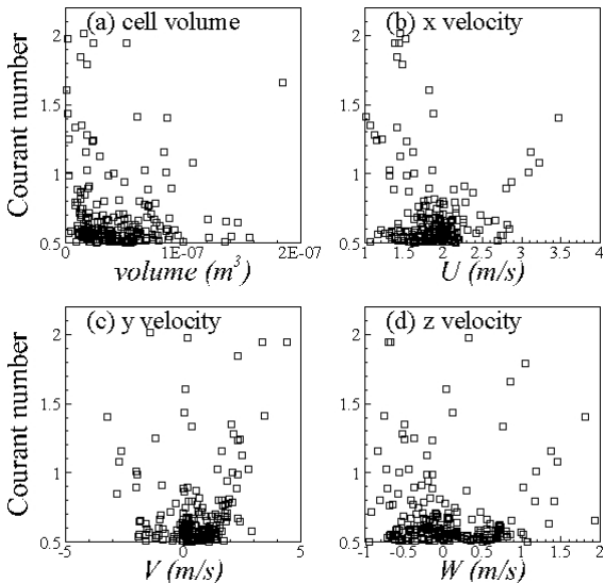


Fig. 7 Correlation of Courant number with mesh volume and flow velocities in unstructured mesh

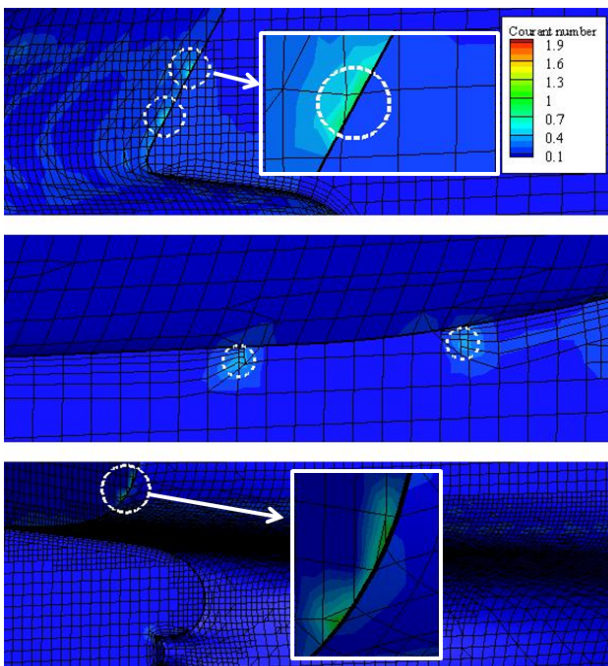


Fig. 8 Spatial distribution of Courant number in unstructured mesh

Courant 수가 높게 나타나는 대표적인 비정렬 격자를 나타낸 Fig. 8에서 보듯이 주로 선체의 너클 부분이나 프리즘 층이 단절되는 부분에서 크기가 작은 비정렬 격자가 생성되면서 Courant 수가 국소적으로 증가한다. 정렬 격자의 경우에는 연신율 (stretching ratio)에 의해 일정한 비율로 격자의 크기가 변하기 때문에 Courant 수의 분포도 연속적으로 나타나는 반면, 자동으로 생성되는 비정렬 격자에서 국소적으로 매우 작은 격자가 생성되는 경우 국소적으로 매우 높은 Courant 수가 나타날 수 있다. 이렇게 국소적으로 발생하는 매우 높은 Courant 수에 의해 전체 계산 시간 간격이 제한을 받게 됨으로써 수치적인 비효율성이 초래된다.

3.2 LTS 기법을 이용한 수치 효율성

정수 중 선체 저항의 최종 해는 정상 상태이지만 수치적 안정성을 확보하기 위해 비정상 해석을 수행해야 하며, 과도 응답이 지난 이후부터 의미있는 저항 값을 얻을 수 있다. 그러나 앞서 살펴본 바와 같이 특정 격자에 의해 계산 시간 간격이 제한을 받을 경우 이러한 과도 응답에 지나치게 많은 시간이 소요되는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 수치적 비효율성을 개선하기 위해 격자 별로 서로 다른 계산 시간 간격을 사용하는 LTS 기법이 이용된다. 정렬 격자와 비정렬 격자에 LTS 기법을 적용하였을 선체 저항의 시간 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 실선은 정렬 격자의 저항 계수이며, 점선은 비정렬 격자의 저항 계수이다. 그림에서 보듯이 정렬 격자의 경우 10,000번의 반복 계산 이후에도 선체 저항이 완전히 수렴되지 않은 반면, 비정렬 격자에서는 3,000번의 반복 계산 이후 선체 저항이 수렴되었다.

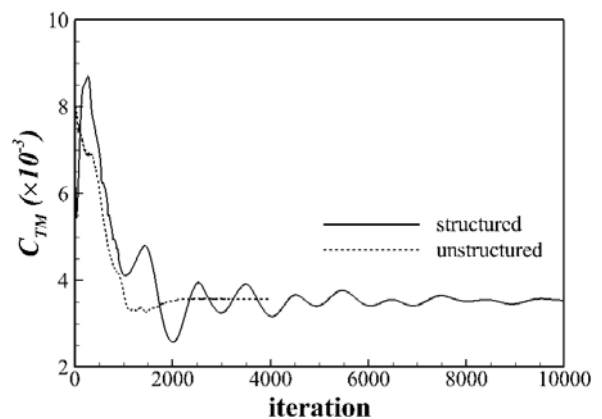


Fig. 9 Time history of total resistance coefficient when using LTS scheme

LTS 기법을 적용하였을 때 정렬 격자와 비정렬 격자의 수렴성을 분석하기 위해 각각 10,000번과 4,000번의 반복 계산이 완료되었을 때 계산 시간 간격의 공간 분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다. 각 그림에서 편의성을 위해 Δt 대신 $1/\Delta t$ 를 사용하였으며, 선수부와 선미부의 분포를 구분하여 Fig. 10(a)와 (b)에 나타내었다. 붉은 색으로 표시된 부분은 계산 시간 간격이

매우 작음을 뜻하며, 파란 색으로 표시된 격자에서는 큰 계산 시간 간격이 사용되었음을 의미한다. Fig. 10에서 보듯이 정렬 격자의 경우 높은 Courant 수가 나타났던 구상 선수 부분에서 작은 계산 시간 간격이 사용되었다. 구상 선수의 전 영역에 걸쳐 상대적으로 작은 계산 시간 간격이 사용되고 있으므로 이 영역에서 유동 현상이 상대적으로 느리게 수렴하고 있다. 구상 선수 영역은 선체의 x 방향 압력 저항에 큰 영향을 미치므로 Fig. 9에서 선체 저항이 느리게 수렴하는 주요한 원인이 된다.

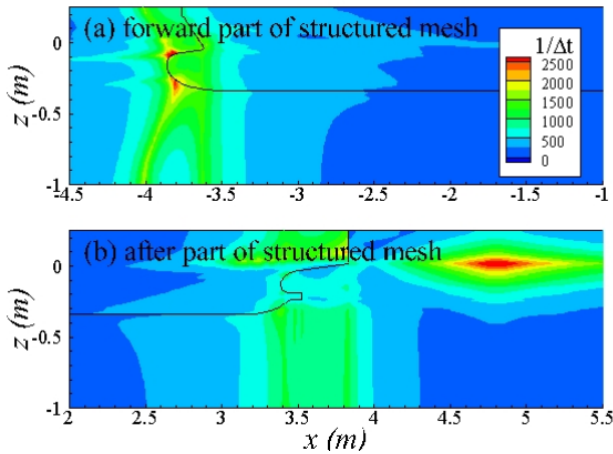


Fig. 10 Spatial distribution of calculation time interval (Δt) when using structured mesh

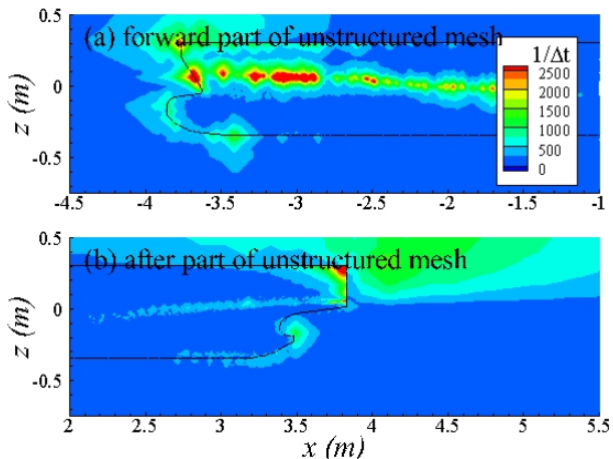


Fig. 11 Spatial distribution of calculation time interval (Δt) when using unstructured mesh

반면 비정렬 격자의 경우 Fig. 11에서 보듯이 계산 시간 간격이 가장 작은 영역은 자유 수면 근처이다. 즉 자유 수면 근처에서 작은 시간 간격이 사용되어 유동의 수렴 속도가 느리지만, 정렬 격자에서와 달리 전체 저항에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 따라서 LTS 기법을 사용할 경우 정렬 격자보다 비정렬 격자에서 선체 저항이 더 빨리 수렴할 수 있었다. 정렬 격자 및 비정렬 격자에서 일반적인 Euler 기법을 적용하여 Fig. 2에서와 같이 30초까지 저항 해석을 수행할 때 소요된 시간과 LTS Euler 기법을 적

용하여 정렬 격자의 경우 10,000번, 비정렬 격자의 경우 3,000번의 반복 계산을 수행할 때 소요된 시간을 Table 3에 비교하였다. 표에서 보듯이 정렬 격자의 경우 약 6.4배, 비정렬 격자의 경우 약 27배 이상 계산 시간이 단축되었다. 본 연구에서 소요된 시간은 15코어를 이용한 병렬 계산을 수행하였을 때의 결과이다.

Table 3 Numerical efficiency of LTS Euler when using structured and unstructured meshes

	structured	unstructured
Euler	130,007 s	145,742 s
LTS Euler	20,239 s	5,225 s

4. 결론

본 연구에서는 정렬 격자와 비정렬 격자를 이용하여 정수 상태의 선체 저항 해석을 수행하여 격자 특성에 따른 Courant 수의 공간 분포 특성을 분석하였다. 그리고 정렬 격자와 비정렬 격자에 대해 LTS 기법을 적용하였을 경우 국소 시간 분포의 공간적 특성을 분석함으로써 수치적 효율성을 비교하였다. 정렬 격자의 경우 격자 크기가 연속적으로 변하기 때문에 Euler 기법을 적용하였을 때 Courant 수의 분포 역시 연속적으로 나타나는 반면, 비정렬 격자의 경우 자동으로 생성된 격자 중 일부(너클이 발생하는 부분, 프리즘 층이 단절되는 부분 등)에서 매우 작은 크기의 격자가 생성되고 이로 인해 국소적으로 매우 높은 Courant 수가 발생하였다. 수치적 안정성을 위해 최대 Courant 수를 제한하는 경우 정렬 격자보다 비정렬 격자에서 보다 작은 계산 시간 간격을 사용해야 하며, 이로 인해 비정렬 격자의 수치 효율성이 나빠지게 되었다. 이를 해결하기 위해 격자마다 국소적으로 서로 다른 계산 시간 간격을 사용하는 LTS Euler 기법을 적용할 경우 정렬 격자에서는 구상 선수 근처에서 작은 Δt 가 사용되었으며, 비정렬 격자에서는 자유 수면 근처에서 작은 Δt 가 사용되었다. 이로 인해 정렬 격자에서는 구상 선수 부근의 압력 저항을 수렴시키기 위해 많은 반복 계산을 필요한 반면, 비정렬 격자에서는 자유 수면 근처에서 작은 Δt 가 사용되더라도 압력 저항에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 선체 저항이 빨리 수렴하였다.

본 연구에서는 자유 수면을 고려한 선체 저항 해석에 대해 LTS 기법의 특성을 분석하였으나, 프로펠러 회전을 고려해야 하는 비정상 저항 해석의 경우에는 LTS 기법과 전통적 시간 차분법인 Euler 기법을 혼용하는 방법을 적용해야 한다. 즉 효율적 수렴성이 요구되는 자유 수면 및 선수부 유동에는 LTS Euler 기법을 적용하며, 비정상 상태에서 물리량 보존을 위해 프로펠러 주위에는 국소적으로 동일한 시간 간격을 사용하는 Euler 기법을 적용하는 방법을 검토해 볼 수 있다. 이를 위해 전체적으로 LTS Euler 기법을 사용하지만 특정 영역에서 동일한 시간 간격을 적용할 수 있는 코드를 개발 중이며, 시간 간격 변화에 따른 수치적 불안정성을 완화하기 위해 시간 간격에 대한 공간 감쇄 함수 (spatial damping function)을 설계할 예정이다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2016R1C1B1010002)

References

- Asen, P., 2014. *Analysis of the flow around a cruise ferry hull by the means of computational fluid dynamics*. Master's thesis, Aalto University.
- Choi, J.E. Kim, J.H. Lee, S.B. & Lee, H.G., 2009. Computational prediction of speed performance for a ship with vortex generators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(2), pp.136-147.
- Choi, J.E. Min, K.S. Kim, J.H. Lee, S.B. & Seo, H. W., 2010. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. *Ocean Engineering*, 37, pp.549-566.
- Kim, G.H., 2016. Joint development project on seakeeping simulations using OpenFOAM - industrial perspective. *11th OpenFOAM Workshop*, Guimarães, Portugal, 26-30 June 2016.
- 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.
- OpenFOAM wiki-Co, 2012. *Background of courant number* [Online] (Update 25 October 2012), Available at: <https://openfoamwiki.net/index.php/Co#Background> [Accessed 10 April 2017]
- Park, S. Park, S.W. Rhee, S.H. Lee, S.B. Choi, J. E. & Kang, S.H., 2013. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5, pp.33-46.
- 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.
- Perez G,C.A. Tan, M. & Wilson, P.A., 2008. Validation and verification of hull resistance components using a commercial CFD code. *11th Numerical Towing Tank Symposium*, Brest, France, 7-9 September 2008.



이상봉



백광준



박동우