



정렬 및 비정렬 격자를 이용한 선체 주위 유동에서 TVD 기법이 공간 정확도에 미치는 영향

심민경 · 이상봉[†]
동아대학교 조선해양플랜트공학과

Influence of TVD Schemes on the Spatial Accuracy of Turbulent Flows Around a Hull When Using Structured and Unstructured Grids

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

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.

Computational simulations of turbulent flows around a model ship have been performed to investigate an influence of TVD schemes on the accuracy of advective terms associated with ship resistances. Several TVD schemes including upwind, second-order upwind, vanLeer, and QUICK as well as a nonTVD linear scheme were studied by examining temporal and spatial characteristics of accuracy transition in adjacent cells to the hull. Even though vanLeer scheme was the most accurate among TVD schemes in both structured and unstructured grid systems, the ratio of accuracy switch from 2nd order to 1st order in vanLeer scheme was considerable compared with the 2nd order linear scheme. Also, the accuracy transition was observed to be overallly scattered in the unstructured grid while the accuracy transition in the structured grid appeared relatively clustered. It concluded that TVD schemes had to be carefully used in computational simulations of turbulent flows around a model ship due to the loss of accuracy despite its attraction of numerical stability.

Keywords : Ship resistance(선체 저항), TVD scheme(TVD 기법), Spatial accuracy(공간 정확도), OpenFOAM(오픈폼)

1. 서론

선체 저항을 추정하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용할 경우 선수, 선미의 복잡한 기하학적 형상과 유동으로 인해 수치 기법의 불안정성에 대한 문제가 발생하기 쉽다. 이러한 수치적 불안정성은 비물리적인 해석 결과를 보여주거나, 해석 자체가 불가능한 문제를 발생시킬 수 있다. 이를 극복하기 위해 유동의 특성을 고려한 대류항 수치 기법에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 유체의 유동을 모사함에 있어 확산 현상은 모든 방향으로 동일하게 퍼져나가는 성질로 인해 선형 기법(linear scheme)을 사용하는 것이 타당하다. 하지만 대류 현상은 유동 방향에 영향을 받기 때문에 대류항의 수치 기법을 설정할 때에는 주의가 필요하다. 현재 여러 대류항 수치 기법 중 상류 값에 가중치를 두거나, 인공적인 확산(artificial diffusion)을 추가하여 수치적인 진동에 대응하는 TVD(Total Variation Diminishing) 기법

이 가장 많이 사용되고 있다. TVD 기법은 공간상 물리량의 총변동량을 억제하는 방법으로 단조성의 특성을 내포하고 있어 수치적 안정성이 우수하다. 또한 1차원 대류 방정식을 수학적으로 분석하여 개발된 기법이기 때문에 차원 분할을 통해 다차원 유동으로 확장이 용이하다. 이러한 장점으로 오픈소스 기반의 CFD 소프트웨어인 OpenFOAM이나 상용 CFD 소프트웨어인 Fluent, Star-CCM+에서도 TVD 기법을 제공하고 있다.

OpenFOAM을 사용하여 선박 저항 해석을 한 기존 연구들을 살펴보면, 선박의 부가저항 및 운동성능을 해석한 Seo & Park (2017)과 선박의 표면 거칠기의 영향에 따른 마찰저항의 증가를 살펴본 Park et al. (2013b)은 대류항 수치 기법을 TVD 기법인 vanLeer 기법(vanLeer scheme)으로 설정하였다. OpenFOAM은 수치 기법을 설정함에 있어 선택의 폭이 넓기 때문에 TVD 기법이 아닌 대류항 수치 기법을 적용하기도 한다. 단파장 영역에서 운항 자세에 따른 선박의 저항 성능을 추정된 Kim & Lee (2017)는

linearUpwind 기법을, 선체 주위 파의 모사가 선체 저항에 미치는 영향을 분석한 Kang et al. (2020)은 Gamma 기법을 사용하였다. 다음으로 Fluent를 이용한 연구들을 보면, 와류 생성기가 부착된 선박의 속도 성능을 추정하는 방안을 제시한 Choi et al. (2009)과 선박의 저항과 추진 특성을 분석한 Choi et al. (2010)은 대류항 수치 기법으로 QUICK 기법(Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics scheme)을 사용하였다. 그리고 Seo et al. (2010)은 선박의 저항 및 추진성능을 분석함에 있어 2차 상류 기법(Second Order Upwind scheme, SOU)을 적용하였다. 선체 저항을 예측함에 있어 해석 결과에 영향을 미치는 격자, 이산화 기법, 난류 모델과 같은 요소를 분석한 Deng et al. (2013)은 상류 기법(upwind scheme), SOU 기법, QUICK 기법, MUSCL 기법(Monotonic Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)을 적용하여 해석하였다. Star-CCM+를 이용한 연구들에서는 선박 표면 거칠기가 선체 저항에 미치는 영향을 분석한 Song et al. (2020), Seok & Park (2020)은 대류항 수치 기법으로 SOU 기법을 사용하였다. 또한 다양한 흘수 및 트림 조건에서 저항 해석을 수행한 Park et al. (2014), 배수량과 트림자세 별 저항 성능을 분석한 Park et al. (2013a), 정수 중 선박의 저항을 예측하고 이를 모형 시험 결과와 비교한 Niklas & Pruszko (2019) 모두 대류항 수치 기법에 있어 SOU 기법을 사용하였다.

이상의 연구 결과를 종합해보면 선체 저항, 선체 주위 유동과 관련하여 수치 해석을 수행한 경우 주로 저항 계수, 트림각, 파고 등을 모형 시험 결과와 비교하였다. 공간 수치 기법이 해석 결과에 미치는 영향을 분석한 선행 연구도 있으나 여러 종류의 공간 수치 기법을 적용한 결과를 비교한 정도이다. 기존 연구에서 공간 수치 기법으로 많이 사용된 TVD 기법은 수치적 안정성은 우수하나 단조성을 만족시키지 못하는 경우 낮은 정확도를 갖는 수치 기법으로 전환되는 단점이 있으므로 이로 인해 수치해의 정도가 떨어질 가능성이 있다. 단조성을 만족시키는 범위는 각 수치 기법마다 다르며, 적용한 수치 기법에 따라 해

석 결과의 오차 정도가 달라질 수 있다. 따라서 선체 주위 유동을 보다 정확하게 계산하기 위해서는 높은 수준의 정확도를 유지하는 것이 중요하다. TVD 기법의 공간상 정확도는 격자 면에서의 속도에 따라 국소적으로 결정되기 때문에 속도에 따른 정확도의 변동을 체계적으로 분석할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 다양한 수치 기법을 제공하는 OpenFOAM을 이용하였으며, 정렬 격자와 비정렬 격자를 구성하여 정수 상태의 선체 저항 해석을 수행하였다. 대상선은 KCS(KRISO Container Ship)이며, 자유수면을 고려한 다상 유동 해석자를 이용하였다. 본 논문의 목적은 선체 주위 유동에 따른 정확도의 변동을 분석하는 것이다. 따라서 선체 인접 셀에서의 속도에 따른 정확도의 통계적 분포를 히스토그램으로 나타내었다. 이를 더 자세히 분석하고자 각 수치 기법 마다 정확도의 시간 변동량이 어떤 변화를 보이는지 확인하고, 시간 변동량을 야기하는 요소를 살펴보고자 한다. 또한 이에 해당하는 공간 분포 특성을 파악하여 여러 수치 기법 및 격자에 따른 정확도 변동을 면밀히 검토하고자 한다.

2. 수치 기법

본 연구에서 수치 해석에 사용한 격자를 Fig. 1에 나타내었다. 선체의 중심과 자유수면이 만나는 지점을 원점으로 설정하고 선미 방향을 +x, 우현 방향을 +y, 높이 방향을 +z로 하였다. 격자에 따른 정확도 변동을 확인하기 위해 정렬 격자인 Fig. 1(a)와 비정렬 격자인 Fig. 1(b)를 사용하였다. Fig. 1(a)의 계산 영역은 선박의 길이 방향으로 $4.4L_{pp}$, 폭 방향으로 $1.7L_{pp}$, 깊이 방향으로 $1.7L_{pp}$ 이다. 선박의 길이 방향의 경우 전진속도에 의해 선수 방향에서는 반사파의 영향을 거의 받지 않으므로 선박의 선수와 자유수면이 만나는 지점에서부터 입구 경계까지의 거리는 $1.2L_{pp}$ 를 사용하였으며, 선미 방향의 후류 유동 해석

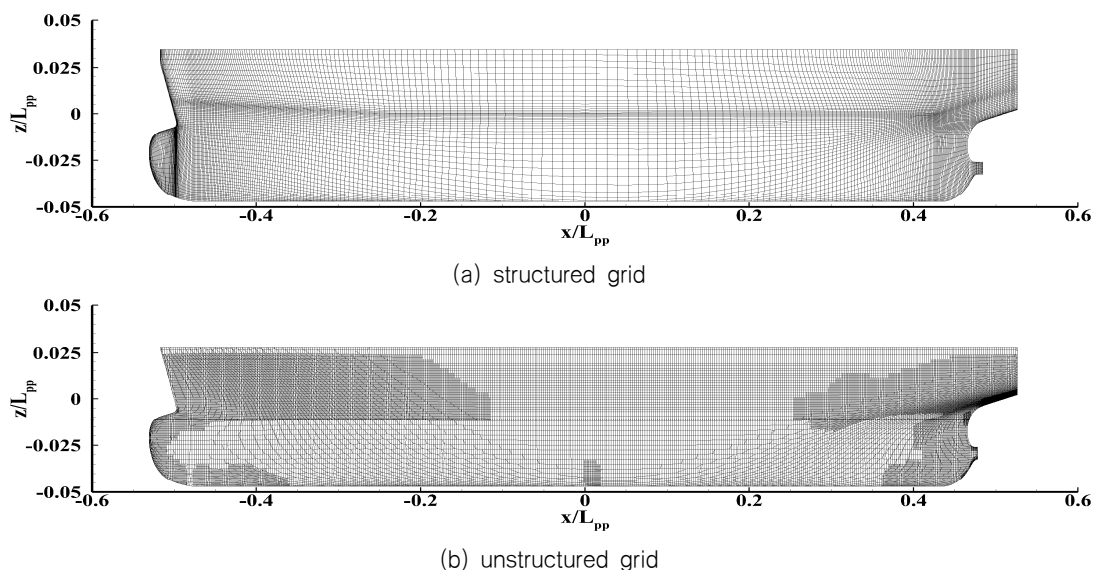


Fig. 1 Surface mesh on hull in (a) structured grid system, (b) unstructured grid system

을 위해 선미와 자유수면이 만나는 지점에서부터 출구 경계까지 $2.2L_{pp}$ 를 사용하였다. Fig. 1(b)의 계산 영역의 선박의 길이 방향, 폭 방향은 Fig. 1(a)와 동일하며, 깊이 방향으로 $2.7L_{pp}$ 를 사용하였다. 선체 저항을 해석하기 위해 정렬 격자를 구성하여 수치 해석을 수행한 Choi et al. (2010), Choi et al. (2009)은 각각 27만~220만개, 41만~350만개, 비정렬 격자를 구성하여 해석한 Lee & Lee (2014), Park et al. (2014)은 각각 88~147만개, 110~150만개의 격자 수를 사용하였다. 본 논문에서는 기존에 주로 사용되어 왔던 정렬 격자와 비정렬 격자에서 수치 기법에 따른 정확도의 변동을 평가하고자 일반적으로 사용하는 격자 수와 비슷한 수준으로 구성하였다. Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)의 총 격자 수는 각각 180만, 140만개이며, 선체의 표면 격자는 1.5만, 3만개이다. 사용한 정렬 격자와 비정렬 격자는 Lee et al. (2017)의 선행 연구를 참조하여 벽면 격자 간격을 설정하였다. 선체 표면이 곡면으로 이루어져 있어 표면 격자가 xyz 좌표계의 방향과 완전히 일치하지 않기 때문에 보다 정확한 선체 표면 격자 구성을 나타내기 위해 새로운 좌표계를 사용하였으며, 주유동 방향을 ξ , 벽면 수직 방향을 η , 횡방향을 ζ 로 하였다. 각 방향으로 무차원화된 격자 간격은 $\Delta\xi^+$, $\Delta\eta^+$, $\Delta\zeta^+$ 로 나타내었다. 본 논문에서는 수치 기법의 정확도가 선체 주위 유동에 미치는 영향을 알아보기 위해 벽면 첫 번째 셀에 해당하는 면에서의 속도를 분석하고자 한다. 이는 선체 표면에 수직인 방향으로 형성된 속도 구배와 밀접한 관련이 있으므로 무차원화 변수로 대표 벽면 마찰 속도를 이용하였다. 대표 벽면 마찰 속도는 국소적인 벽면 마찰 속도에 면적 기중치를 고려하여 평균한 값이다. 정렬 격자의 경우 선수 밀집 영역에서 $\Delta\xi^+$ 와 $\Delta\zeta^+$ 는 211~422, 자유수면 아래 격자가 밀집된 선미 영역에서는 $\Delta\xi^+$ 와 $\Delta\zeta^+$ 에 대해 422~563을 사용하였다. 각 영역에서 $\Delta\eta^+$ 는 105~282를 사용하였다. 비정렬 격자의 경우 계산 영역에 대해 트리머 격자(trimmer mesh)와 선체 주변에 프리즘 층(prism layer)을 사용하였다. 첫 번째 벽면 격자 간격 $\Delta\eta^+$ 는 56이며, 벽면 수직 방향으로 1.3배의 연신률(stretching ratio)을 적용하여 총 5개의 층을 구성하였다. 선수, 선미 밀집 영역에서 $\Delta\xi^+$ 와 $\Delta\zeta^+$ 는 633을 적용하였으며, 비교적 성긴 영역에서는 조밀한 영역의 격자 간격의 2배를 사용하였다.

본 해석에서는 PIMPLE 알고리즘을 기반으로 하는 interFoam을 이용하였다. 그리고 시간에 대해 1차 정확도인 Euler 차분 기법을 사용하였다. 공간 차분 기법은 정렬 격자의 경우 상류, 선형, vanLeer, QUICK, SOU 기법을 적용하였다. 비정렬 격자의 선형 기법과 SOU 기법은 선미 영역의 자유수면 부근에서 압력 분포가 급격하게 변화하여 이로 인해 수치적 불안정성이 발생한다. 따라서 비정렬 격자의 경우 선형 기법과 SOU 기법을 제외한 나머지 기법을 적용하여 해석을 수행하였다. 이러한 해석 조건으로 $tV_M/L_{pp} = 10$ 까지 수치 해석을 진행하였으며, 시간 간격은 $\Delta tV_M/L_{pp} = 3.0 \times 10^{-4}$ 이다.

본 연구에서 사용한 수치 기법을 Fig. 2의 $r - \psi$ 선도에 나타내었다. r 은 상류 측 구배와 하류 측 구배의 비를 의미하며, ψ 는 r 에 대한 함수로 수치 기법에 따라 다른 값을 가지는 제한자

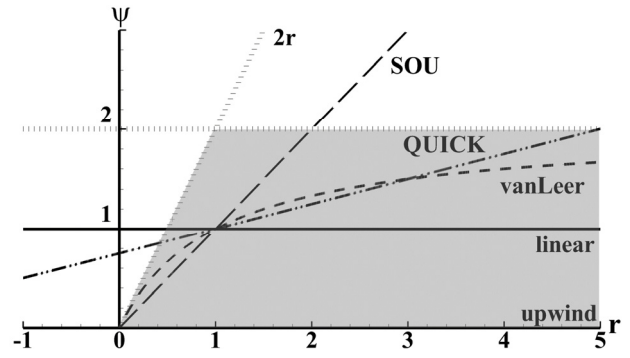


Fig. 2 Limiters of schemes on $r - \psi$ diagram

이다. 선형 기법은 실선, SOU 기법은 긴 쇄선, QUICK 기법은 2점 쇄선, vanLeer 기법은 쇄선으로 나타내었다. 그리고 상류 기법의 제한자는 0이다. 점선으로 나타낸 $\psi = 2$ 와 $\psi = 2r$ 은 TVD 조건의 상한을 의미한다. 따라서 $0 \leq r < 1$ 일 때 상한은 $\psi = 2r$ 이며, $r \geq 1$ 일 때 상한은 $\psi = 2$ 이다. TVD 조건을 만족하는 구간을 Fig. 2에 어두운 영역으로 나타내었다. 상류 기법, SOU 기법, QUICK 기법, vanLeer 기법이 이에 해당하며, 선형 기법은 $r < 0.5$ 구간에서 TVD 영역을 벗어나 있다. 상류 기법은 수치적 안정성은 우수하나 1차 정확도이며, 이로 인해 수치 확산에 의한 문제가 발생할 수 있다. 수치 확산이 포함된 문제는 고차 수치 기법을 적용함으로써 해결할 수 있으므로 2차 정확도인 SOU 기법, 3차 정확도인 QUICK 기법이 개발되었다. 하지만 SOU 기법과 QUICK 기법 모두 수치해가 발산하는 문제가 발생할 수 있으며, 수치해가 수렴하더라도 오버슈트(overshoot) 또는 언더슈트(undershoot)가 발생할 수 있어 수치적으로 불안정하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 SOU 기법과 선형 기법의 혼합 기법인 vanLeer 기법이 개발되었다. vanLeer 기법은 2차 정확도이며, 수치적 안정성도 우수하기 때문에 수치 해석에서 많이 사용되고 있는 기법이다. 하지만 TVD 기법의 공간상 정확도는 격자 면에서의 속도에 따라 국소적으로 결정되며, 격자 면에서 물리량을 계산할 때 1차 정확도인 상류 기법 또는 하류 기법(downwind scheme)이 적용될 수 있다. 이로 인해 TVD 기법을 적용할 경우 수치해의 정도가 떨어질 가능성이 높다. 반면, 선형 기법은 격자 면에서의 속도와 상관없이 2차 정확도이다. 이로 인해 TVD 조건을 만족하지 않아 수치적으로 불안정한 문제가 있지만 충분한 격자를 사용할 경우 비교적 정확한 수치해를 얻을 수 있다. 하지만 TVD 기법의 경우 고차 정확도를 유지하기 어렵기 때문에 격자와 유동특성에 따라 수치 기법을 선택함에 있어 주의가 필요하다.

3. 결과 및 고찰

앞서 그림에서 정의한 여러 수치 기법들을 적용하여 수치 해석을 수행하였을 때 각 해석 결과로부터 얻어진 전 저항 계수(C_T)와 마찰 저항 계수(C_f)를 정렬 격자와 비정렬 격자로 구분하여 Table 1에 명기하였다. vanLeer 기법을 사용한 경우에 대

해 마찰 저항 계수의 불확실성 해석을 수행하였다. 정렬 격자의 경우 각 방향으로 $\sqrt{2}$ 의 비율로 격자 밀집도를 설정하였고, 비정렬 격자의 경우 전체 격자 수가 $2\sqrt{2}$ 의 비율을 갖도록 격자 밀집도를 설정하였다. 그 결과 정렬 격자와 비정렬 격자에서 나타나는 마찰 저항 계수의 명목 정확도(apparent order of accuracy)는 각각 1.58, 2.42이며, 격자 수렴도(grid convergence index, GCI) 기반의 불확실도는 각각 0.55%와 1.56%로 나타났다. 비정렬 격자를 구성하여 SOU 기법과 선형 기법을 적용한 수치 해석을 수행한 경우 수치적 불안정성이 발생하므로 Table 1에서 제외하였다. Table 1에서 격자와 수치 기법에 따라 전 저항 계수와 마찰 저항 계수를 다르게 예측함을 확인할 수 있다. 마찰 저항 계수는 유체의 점성, 물체의 형상, 유동의 특성에 따라 달라진다. 본 논문에서 물체의 형상과 유체의 점성은 동일하기 때문에 마찰 저항 계수는 선체 표면에 수직인 방향으로 형성된 속도 구배에 해당하는 유동의 특성에 따라 결정된다. 이는 벽면 근처 속도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 수치 기법의 정확도가 마찰 저항 계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 선체 표면에 인접해 있는 셀에 해당하는 면을 분석하였으며, 공기에 해당하는 면은 고려하지 않았다. Fig. 3은 벽면 첫 번째 셀에 해당하는 면의 개수 중 속도를 고차 정확도로 계산하는 격자 면의 비율을 나타낸 것이다. Fig. 3에 나타낸 히스토그램을 보면 SOU 기법이 다른 기법들과 비교하였을 때 고차 정확도로 계산된 비율이 약 20% 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 SOU 기법이 vanLeer 기법과 QUICK 기법에 비해 1차 정확도가 적용될 확률이 높기 때문이다. 제한자에 따라 1차 정확도가 적용되는 구간을 살펴보면 vanLeer 기법의 경우 $r \leq 0$ 범위에 해당하는 구간에서만 상류 기법을 적용한다. SOU 기법의 경우 상류 기법을 적용하는 구간은 vanLeer 기법과 동일하며, $r \geq 1$ 인 구간에서 하류 기법을 적용한다. 그리고 QUICK 기법은 $r \leq 0.0325$ 인 구간에서는 상류 기법, $r \geq 5$ 인 구간에서 하류 기법을 적용한다. 따라서 SOU 기법이 상류 기법, 하류 기법이 적용되는 범위가 가장 넓기 때문에 Fig. 3과 같은 결과가 나타난다. 또한 히스토그램을 통해 TVD 기법이 완전한 고차 정확도가 아니며, 1차 정확도인 수치 기법이 적용되는 비율이 무시할만한 정도가 아닌 것을 확인할 수 있다.

히스토그램에서 속도에 따라 물리량이 고차 정확도로 계산되는 격자 면의 비율을 확인하였다. 이는 여러 시간대를 평균하여 대표적인 분포를 나타낸 것이다. 정확도는 순간 유동장에 따라 계산된 제한자에 의해 결정되며, 순간 유동장은 시간에 따라 변

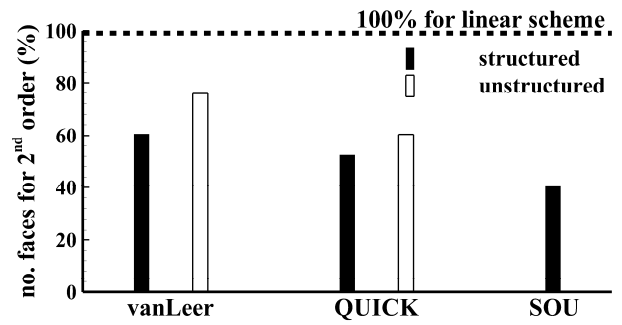


Fig. 3 Ratio of high order accuracy

화한다. 따라서 순간 유동장에 따라 격자 면의 비율이 어떤 변동량을 갖는지 분석하기 위해 1차 정확도가 적용되는 제한자의 범위가 가장 좁은 vanLeer 기법과 제한자에 상관없이 2차 정확도를 유지하는 선형 기법의 시간 변동량을 확인하고자 한다. Fig. 4의 실선은 정렬 격자에서 선형 기법을 적용했을 때 시간 변동량을 나타낸 것이다. 그리고 쇄선은 선형 기법을 적용하여 해석된 결과를 vanLeer 기법으로 전환하여 수치 해석을 수행하였을 때의 시간 변동량을 나타낸 것이다. 채워진 도형(filled symbol)은 $r \leq 0$ 범위, 빈 도형(unfilled symbol)은 $r > 0$ 범위에 해당하는 면의 비율을 의미한다. 그림에서 $t_{M/L_{pp}} = 6.5$ 까지는 선형 기법으로 계산하였다. 그리고 $t_{M/L_{pp}} = 6.5$ 부터 8까지 각각 선형 기법과 vanLeer 기법을 적용하였으며, 6.0×10^{-2} 의 시간 간격으로 총 26개의 시간대를 분석하였다. 선체의 길이 방향으로 1/30이 되는 지점을 기준으로 하여 2개의 영역으로 나누었을 때, Fig. 4(a)는 $x/L_{pp} < -0.169$ 범위, Fig. 4(b)는 $x/L_{pp} > -0.169$ 범위에 해당하는 영역에서의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 vanLeer 기법으로 수치 기법을 전환한 것으로 인해 $t_{M/L_{pp}} = 6.5$ 에서 6.56까지의 구간에서 비율의 변화가 급격하게 나타나는 과도응답을 확인할 수 있다. 1차 정확도에 해당하는 비율은 감소하며, 2차 정확도에 해당하는 비율은 증가한다. $t_{M/L_{pp}} = 6.56$ 에서 7.75까지 선수 영역에 해당하는 Fig. 4(a)에서의 분포를 살펴보면 1차 정확도에 해당하는 비율은 45%에서 54%까지 증가, 2차 정확도에 해당하는 비율은 55%에서 46%까지 감소하는 경향을 보인다. 이 후 각각 54%, 46% 정도를 유지함을 볼 수 있다. 반면 중앙과 선미 영역에 해당하는 Fig. 4(b)에서의 분포는 큰 변동량 없이 각각 26%, 74% 정도를 유지한다. 이를 통해 vanLeer 기법을 적용한 경우 선수 영역에서 나타나는 경향성과 중앙, 선미 영역에서 나타나는 경향성이 다름을 확인할 수 있다. $t_{M/L_{pp}} = 6.2$ 부터 8까지 선형 기법

Table 1 Total and friction coefficients of ship resistance when using structured and unstructured grids

		upwind	vanLeer	SOU	QUICK	linear
structured	$C_T \times 10^3$	4.01	3.49	3.59	3.54	3.66
	$C_F \times 10^3$	2.77	2.71	2.70	2.71	2.82
unstructured	$C_T \times 10^3$	4.11	3.38		3.37	
	$C_F \times 10^3$	2.75	2.64		2.61	

* $C_T \times 10^3 = 3.56$ Van et al. (1998)

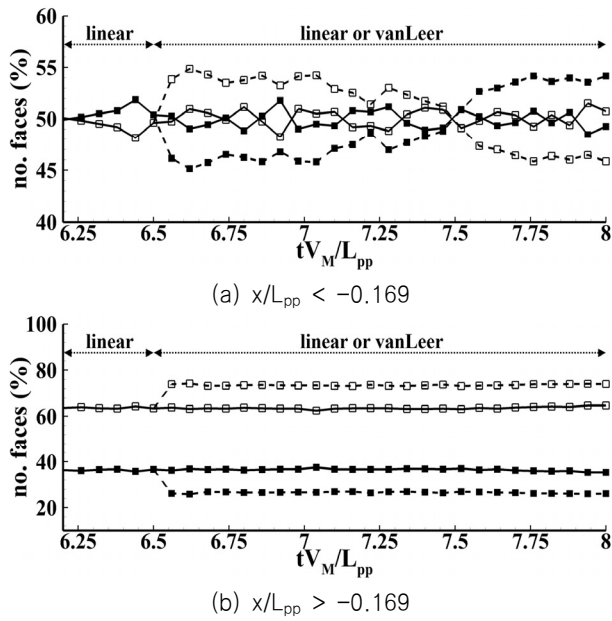


Fig. 4 Time history of high and low order accuracy ratio

을 적용하여 해석한 결과를 살펴보면 선수 영역에서 $r \leq 0$ 범위에 해당하는 비율은 49%~52%, $r > 0$ 범위에 해당하는 비율은 48%~51% 구간에 분포한다. 그리고 중앙, 선미 영역에서는 각각 36%, 64% 정도로 일정한 비율을 차지하고 있다. 여기서 각 시간대의 비율은 vanLeer 기법으로 전환했을 때 1차 정확도와 2차 정확도로 변환될 비율을 의미한다. vanLeer 기법으로 해석한 경우 선수 영역에서 1차 정확도의 비율이 증가하는 것에 대한 요인을 분석하기 위해 1차 정확도로 계산되는 누적 횟수에 따른 비율과 각 시간대에서 정확도의 변화를 확인할 필요가 있다. Fig. 5는 $tV_M/L_{pp} = 6.5$ 부터 8까지 vanLeer 기법을 적용하여 해석한 선수 영역의 결과를 분석한 것이다. Fig. 5(a)의 x축은 1차 정확도로 계산되는 누적 횟수이며, y축은 그에 따른 비율을 의미한다. 시간 간격을 6.0×10^{-2} 로 하였기 때문에 최대 누적 횟수는 26번이 된다. 0과 26에 해당하는 비율은 모든 시간대에서 각각 2차 정확도와 1차 정확도를 유지했음을 의미한다. 따라서 1과 25 사이에 해당하는 비율이 정확도의 시간 변동량을 발생시킨 요소라고 볼 수 있다. Fig. 5(b)에서 채워진 도형을 갖는 실선과 빈 도형을 갖는 실선은 각 시간대에서 각각 1차 정확도, 2차 정확도를 유지한 비율을 의미한다. 또한 채워진 도형을 갖는 쇠선은 2차 정확도에서 1차 정확도로, 빈 도형을 갖는 쇠선은 1차 정확도에서 2차 정확도로 변환된 비율을 나타낸 것이다. 좌측 및 우측의 y축은 각각 실선, 쇠선에 해당하는 비율이다. 우선 $tV_M/L_{pp} = 6.53$ 에서 6.59까지 비율의 변화는 수치 기법의 전환으로 인한 것이다. $tV_M/L_{pp} = 6.59$ 에서 7.78까지 비율의 변화를 살펴보면, 각 시간대에서 1차 정확도가 유지된 비율은 36%에서 46%까지 증가, 2차 정확도가 유지된 비율은 44%부터 40%까지 감소함을 알 수 있다. 이 후 시간대에서는 각각 46%, 40% 정도를 유지한다. 또한 2차 정확도에서 1차 정확도로 변환되는 비율과 1차 정확도에서 2차 정확도로 변환되는 비율은 약간 감소하는 경향성을 보인다. 이를 통해

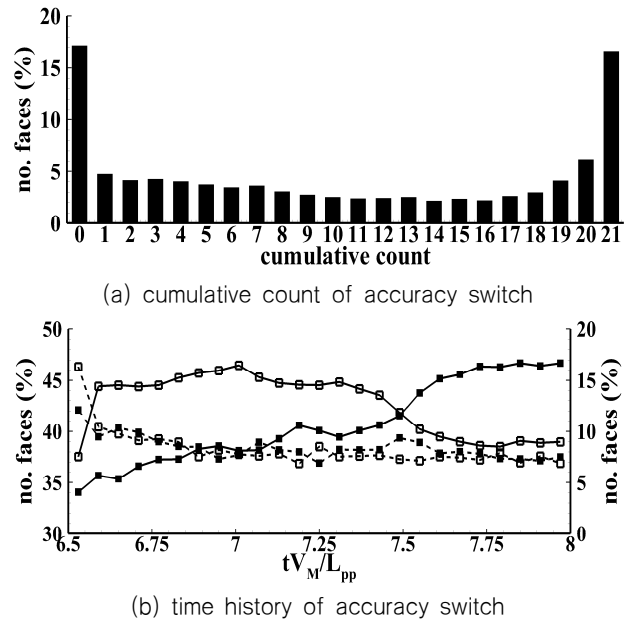


Fig. 5 Temporal characteristics of accuracy switch

2차 정확도에서 1차 정확도로 변환되는 비율과 1차 정확도에서 2차 정확도로 변환되는 비율이 비슷한 분포를 보임에도 불구하고, 1차 정확도가 유지되는 비율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 2차 정확도에서 1차 정확도로 변환된 후 정확도의 변동 없이 계속 1차 정확도를 유지할 확률이 높다.

선형 기법과 vanLeer 기법을 적용한 해석 결과를 통해 시간 변동량과 이를 야기하는 요소를 분석하였다. 이에 해당하는 공간분포 특성을 파악하기 위해 각 위치에서의 $r \leq 0$ 범위에 해당하는 누적 횟수를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 붉은색과 푸른색은 모든 시간대에서 각각 $r \leq 0$ 범위, $r > 0$ 범위에 해당하는 r 값을 유지했음을 의미한다. 또한 붉은색에 가까워질수록 $r \leq 0$ 범위에 해당하는 r 값을 가진 누적 횟수가 많으며, 푸른색에 가까워질수록 $r > 0$ 범위에 해당하는 r 값을 가진 누적 횟수가 많음을 의미한다. Fig. 6(a), (b), (c)는 모두 정렬 격자에서의 해석 결과를 나타내며, Fig. 6(a)와 Fig. 6(c)는 $tV_M/L_{pp} = 6.5$ 까지 선형 기법을 적용한 후 수치 기법을 전환한 것이다. Fig. 6(a)는 상류 기법, Fig. 6(b)는 선형 기법, Fig. 6(c)는 vanLeer 기법을 적용한 결과이다. 선형 기법을 적용하여 해석된 결과를 고차 TVD 기법으로 전환하여 수치 해석을 수행한 경우 모두 비슷한 경향성을 보이므로 대표적으로 vanLeer 기법의 분포만 나타내었다. 결과를 살펴보면, 상류 기법, vanLeer 기법, 선형 기법을 적용한 결과 모두 선수 영역에서의 시간 변동량이 중앙, 선미 영역보다 비교적 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 같은 위치에서 공통적으로 붉은색과 푸른색 분포를 보이는 것은 수치 기법에 따른 영향보다 격자 또는 유동장의 특성에 의한 영향으로 추정된다. 상류 기법으로 해석한 경우인 Fig. 6(a)의 선수 영역을 보면 다른 수치 기법을 적용한 결과와 비교했을 때 붉은색과 푸른색 분포가 많이 나타난다. 또한 중앙에 해당하는 영역 중 $-0.1 < x/L_{pp} < 0$, $-0.015 < z/L_{pp} < 0$ 범위에 푸른색 분포가 밀집되어 있다. 이는 선형 기법과 상반된

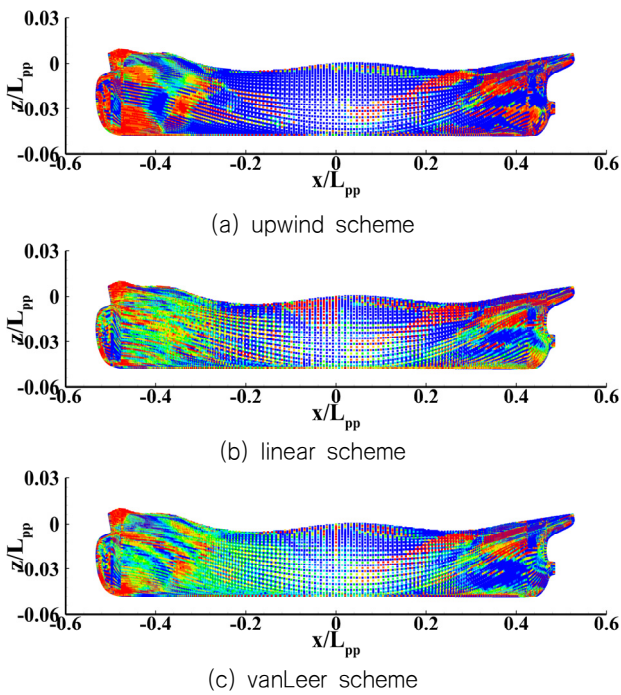


Fig. 6 Spatial distribution of accuracy switch

결과로써 선형 기법에서 상류 기법으로 전환되면서 TVD 제한자에 의해 나타나는 결과로 볼 수 있다. 그리고 선형 기법을 적용한 결과를 나타낸 Fig. 6(b)의 선수 영역을 보면 녹색 분포가 많이 나타나는 경향을 보이는데, 이는 앞서 Fig. 5의 (a)에서 확인한 선수 영역의 시간 변동량에 해당하는 요인이다.

vanLeer 기법을 적용한 결과를 나타낸 Fig. 6(c)의 선수 영역을 보면 전체적인 분포는 선형 기법을 적용한 공간분포 특성과 비슷한 경향성을 보이며, $-0.48 < x/L_{pp} < -0.169$, $-0.048 < z/L_{pp} < -0.03$ 범위에 위치한 분포는 상류 기법의 분포와 비슷하다. 전체적인 분포를 봤을 때 시간 변동량이 나타나는 위치는 같은 것으로 판단되며, vanLeer 기법이 선형 기법과 SOU 기법의 혼합 기법이므로 $r \leq 0$ 범위에 해당하는 경우 상류 기법을 적용하기 때문에 선형 기법과 상류 기법의 특성이 모두 반영된 것을 볼 수 있다. 지금까지 TVD 기법으로 수치 기법을 전환하였을 때 과도응답이 발생하는 구간과 그 이후 정확도의 시간 변동이 변화해 가는 과정을 분석하였으며, 이에 따른 공간분포 특성도 확인하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이 TVD 영역을 벗어나더라도 무조건 수치적 불안정성 문제가 발생하는 것은 아니다. 오히려 TVD 기법을 적용하였을 때, 1차 정확도로 물리량이 계산되어 더 많은 오차를 유발할 수 있다.

다음으로 정렬 격자와 비정렬 격자에 TVD 기법을 적용하여 정확도의 시간 변동이 수렴한 시간대에서 1차 정확도와 2차 정확도가 차지하는 비율과 그에 따른 공간분포 특성을 분석하고자 한다. Fig. 7은 정렬 격자와 비정렬 격자에 TVD 기법을 적용하여 정확도의 시간 변동량이 수렴한 상태에서 1차 정확도와 2차 정확도가 차지하는 비율을 나타낸 것이다. $tV_M/L_{pp} = 8.8$ 부터 10까지 6.0×10^{-2} 의 시간 간격으로 총 21개의 시간대를 분석하였다. Fig. 7(a), (b), (c)는 정렬 격자, Fig. 7(d), (e)는 비정

렬 격자에서 해석한 결과이다. 그리고 Fig. 7(a)와 Fig. 7(d)는 vanLeer 기법, Fig. 7(b)와 Fig. 7(e)는 QUICK 기법, Fig. 7(c)는 SOU 기법을 적용했을 때의 결과이다. 그림에서 실선에 채워진 도형과 실선에 빈 도형은 선수 영역에서의 비율을 의미하며, 각각 1차 정확도와 2차 정확도에 해당한다. 우선 정렬 격자에서 해석한 결과를 살펴보면 공통적으로 선수 영역에서는 1차 정확도에 해당하는 비율이 높고 중앙, 선미 영역에서는 2차 정확도에 해당하는 비율이 높다. 선수 영역에서의 2차 정확도에 해당하는 비율을 자세히 보면, vanLeer 기법을 적용한 결과인

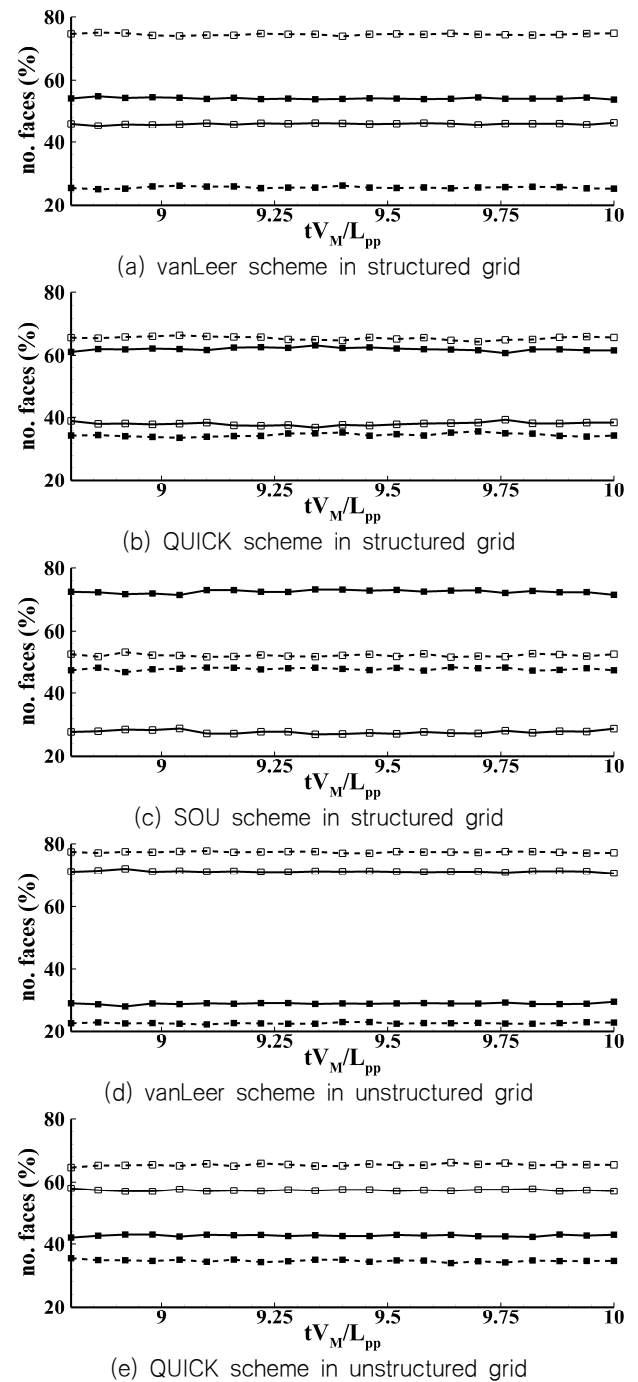


Fig. 7 Time history of high and low order accuracy in structured and unstructured grids

Fig. 7(a)에서 46%, QUICK 기법을 적용한 결과인 Fig. 7(b)에서 38%, SOU 기법을 적용한 결과인 Fig. 7(c)에서 28% 정도의 비율을 유지하는 것을 볼 수 있다. 도 측면에서 vanLeer 기법을 사용하는 것이 가장 좋은 것으로 판단된다. 다음으로 비정렬 격자에서 정확도의 시간 변동량 특성을 살펴보면, 정렬 격자에서와 달리 선수 영역에서도 2차 정확도를 갖는 비율이 더 많으며, 전 영역에서 2차 정확도에 해당하는 비율이 높다. 선수 영역에서 2차 정확도 비율을 보면, vanLeer 기법을 적용한 결과인 Fig. 7(d)에서 71%, QUICK 기법을 적용한 결과인 Fig. 7(e)에서 57% 정도의 비율을 차지하고 있다. 그리고 중앙, 선미 영역에서 각 기법이 2차 정확도를 갖는 비율을 각각 77%, 65% 정도를 유지한다. 따라서 정렬 격자와 마찬가지로 비정렬 격자에서도 vanLeer 기법이 정확도 측면에서 가장 우수하다. 또한 정렬 격자와 달리 비정렬 격자에서는 전 영역에서 2차 정확도 비율이 높으므로 정렬 격자보다 비정렬 격자에서 높은 정확도를 유지해 수치해의 오차를 줄일 수 있을 것이다. 이러한 경향성은 정렬 격자의 경우 약 1.5만개, 비정렬 격자의 경우 약 3만개의 표면 격자로 구성되어 있기 때문이다. TVD 기법은 물리량의 값이 극값을 가질 경우 그 주위 물리량을 1차 정확도로 계산하는데 격자 간격이 좁아질수록 극값을 가질 확률이 줄어들기 때문에 정렬 격자보다 비정렬 격자에서 고차 정확도로 계산하는 영역이 더 많이 분포하는 경향을 보인다. 따라서 비정렬 격자를 구성할 경우 선수 영역, 선미 영역과 같이 형상이 복잡한 영역에서 정렬 격자보다 선체 주위에 격자를 밀집시키기 용이하기 때문에 정확도 측면에서는 비정렬 격자가 우수한 것으로 판단된다. 그림을 통해 정렬 격자와 비정렬 격자가 다른 특성을 보였으며, vanLeer 기법이 물리량을 계산함에 있어 정확도 측면에서 가장 우수하였다. 이는 정확도의 시간 변동이 수렴된 상태만을 고려한 결과이므로 각 시간대에서 정확도의 변환 유무를 자세히 분석할 필요가 있다. 따라서 1차 정확도로 계산되는 누적 횟수를 통해 정확도의 변환 유무를 확인하고, 그림에서 나타난 경향성이 공간상 어떤 분포를 보이는지 분석하고자 한다.

Fig. 8은 각 위치에서 1차 정확도로 계산된 누적 횟수를 나타낸 것이다. 그림에서 붉은색과 푸른색은 모든 시간대에서 1차 정확도와 2차 정확도를 유지했음을 의미한다. 또한 붉은색에 가까워질수록 1차 정확도로 계산된 누적 횟수가 많음을 의미하고 푸른색에 가까워질수록 2차 정확도로 계산된 누적 횟수가 많음을 의미한다. Fig. 8(a), (b), (c)는 정렬 격자에서, Fig. 8(d)와 Fig. 8(e)는 비정렬 격자에서의 해석 결과이다. 그리고 Fig. 8(a)와 Fig. 8(d)는 vanLeer 기법, Fig. 8(b)와 Fig. 8(e)는 QUICK 기법, Fig. 8(c)는 SOU 기법을 적용했을 때의 결과이다. 먼저 정렬 격자에서의 분포에서 알 수 있듯이, 공통적으로 중앙, 선미 영역에서 보다 선수 영역에서 붉은색에 가까운 분포가 많이 나타나므로 1차 정확도로 계산되는 비율이 많다. 그리고 전체적인 분포를 통해 vanLeer 기법, QUICK 기법, SOU 기법의 순서대로 2차 정확도로 계산되는 비율이 많이 나타남을 알 수 있다. vanLeer 기법으로 해석한 경우인 Fig. 8(a)의 선수 영역을 보면 $-0.48 < x/L_{pp} < -0.169$, $-0.048 < z/L_{pp} < -0.03$

범위에서 다른 TVD 기법에 비해 붉은색 분포가 밀집되어 있다. 하지만 전체적인 선수 영역에서는, 다른 TVD 기법에 비해 2차 정확도로 계산되는 누적횟수도 많이 나타난다. QUICK 기법으로 해석한 경우인 Fig. 8(b)의 선수 영역에서는, 녹색 분포가 많이 나타나는데 이는 정확도의 변환이 광범위하게 발생되고 있음을 의미한다. 그리고 SOU 기법으로 해석한 경우인 Fig. 8(c)의 선수 영역에서는 2차 정확도를 유지하는 분포를 vanLeer 기법과 QUICK 기법에 비해 찾아보기 어렵다. 정렬 격자에서의 이러한 특성은 앞서 Fig. 7에서 확인한 정확도의 시간 변동과 잘 일치하는 경향성이며, 고차 TVD 기법들 중 vanLeer 기법이 푸른색 분포를 가장 많이 나타내므로 고차 정확도를 유지할 확률이 높다. 비정렬 격자에서는 모든 영역에서 정확도의 시간 변동량이 산발적으로 나타나며, 이는 Fig. 8(a), (b), (c)의 정렬 격자에서 보이는 특성과 다소 상이하다. vanLeer 기법을 적용한 결과인 Fig. 8(d), QUICK 기법을 적용한 결과인 Fig. 8(e)를 비교하면

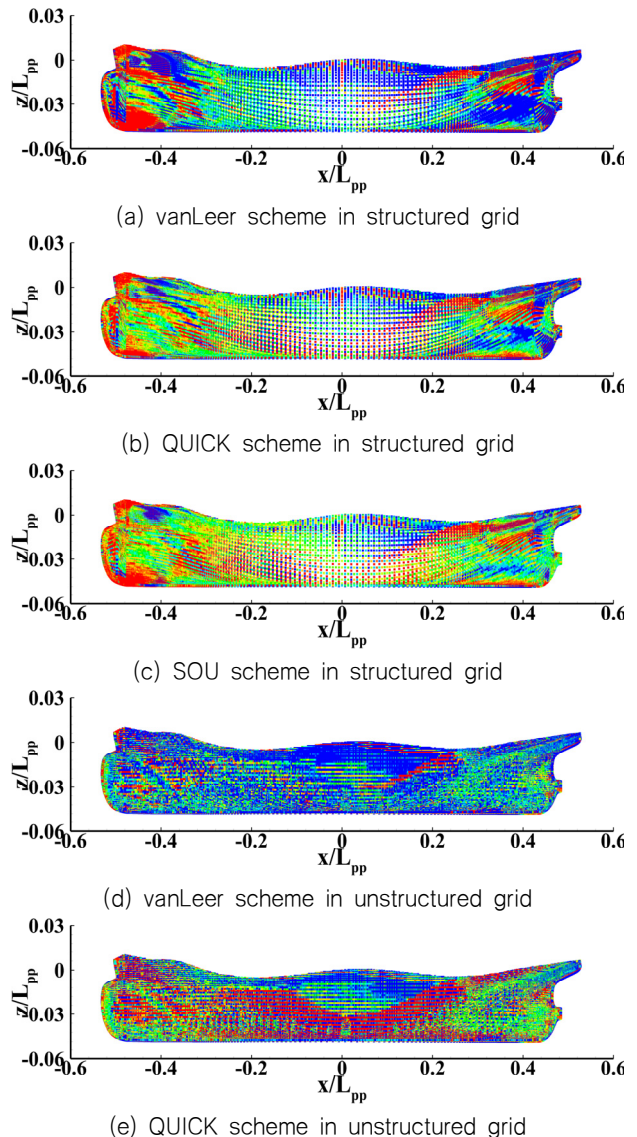


Fig. 8 Spatial distribution of accuracy switch in structured and unstructured grids

전체적으로 vanLeer 기법을 적용하여 해석한 Fig. 8(d)에서 2차 정확도를 유지하는 분포가 많으며, QUICK 기법을 적용하여 해석한 Fig. 8(e)에서 비교적 1차 정확도를 유지하는 분포가 많이 나타난다. 그리고 정렬 격자와 비정렬 격자에 TVD 기법을 적용한 5개의 결과 중 비정렬 격자에 vanLeer 기법을 적용한 경우에서 2차 정확도로 계산되는 영역이 가장 넓게 분포하고 있다. 이는 앞서 Fig. 7에서 확인한 시간 변동 특성과 더불어, vanLeer 기법이 QUICK 기법보다 고차 정확도로 계산되는 비율이 많다는 특성을 다시 한번 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 KCS를 대상선으로 하여 OpenFOAM의 라이브리언 interFoam을 사용하여 정수 중 선체 저항 해석을 수행하였다. 정렬 격자와 비정렬 격자를 구성하여 다양한 수치 기법을 적용하여 해석함으로써 격자와 수치 기법에 따라 저항 계수를 다르게 예측함을 확인하였다. 수치 기법의 정확도가 마찰 저항 계수에 미치는 영향을 알아보기 위해 벽면 첫 번째 셀에 해당하는 면에서의 속도를 분석하였다. 1차 정확도와 고차 정확도로 계산되는 물리량의 비율이 어떤 변동량을 갖는지 알아보기 위해 TVD 기법들 중 1차 정확도가 적용되는 범위가 가장 좁은 vanLeer 기법의 시간 변동량을 분석하였다. 또한 제한자에 상관없이 2차 정확도를 유지하는 선형 기법의 시간 변동량을 확인하였다. vanLeer 기법으로 해석한 경우 선수 영역에서 1차 정확도의 비율이 증가하였다. 이러한 비율 증가의 요인을 파악하기 위해 1차 정확도로 계산되는 누적 횟수에 따른 비율과 각 시간대에서 정확도의 변화를 검사하였다. 이를 통해 2차 정확도에서 1차 정확도로 변환된 경우 정확도의 변동 없이 계속 1차 정확도를 유지할 확률이 높은 것을 알 수 있었다. 그리고 이에 따른 공간분포 특성을 통해 TVD 영역을 벗어나더라도 무조건 수치적 불안정성 문제가 발생하는 것은 아님을 확인하였다. TVD 기법의 적용으로 인해 1차 정확도로 물리량이 계산됨으로써 더 많은 오차를 유발할 수 있다.

정렬 격자에서 해석한 결과는 공통적으로 선수 영역에서 1차 정확도에 해당하는 비율이 높은 반면 중앙, 선미 영역에서는 2차 정확도에 해당하는 비율이 높다. 비정렬 격자에서는 전 영역에서 2차 정확도에 해당하는 비율이 높으며, 정렬 격자와는 다른 특성을 보인다. 정렬 격자와 비정렬 격자의 특성으로부터 비정렬 격자에서는 정렬 격자와 달리 산발적으로 정확도의 시간 변동량이 나타나는 특성을 알 수 있었다. 격자에 따라 다른 특성을 보이지만 vanLeer 기법이 고차 정확도를 유지하는 비율이 가장 높기 때문에 속도를 계산함에 있어서도 정확도 측면에서 가장 우수하다고 판단된다. 또한 정렬 격자와 비정렬 격자에 TVD 기법을 적용한 5개의 결과 중 비정렬 격자에 vanLeer 기법을 적용한 경우에서 고차 정확도를 유지하는 비율이 가장 높았다.

본 연구에서 적용한 TVD 기법은 수치 진동을 억제하는 방법

으로 물리량의 값이 극값을 가질 경우 그 주위 물리량 값을 모두 1차 정확도로 계산한다. 이로 인해 새로운 극값을 발생시키지 않아 수치적 안정성은 우수하지만, 극값을 갖는 물리량과 그 주변 물리량 값의 차이가 작아 수치 불안정성 문제를 발생시키지 않음에도 불구하고, 1차 정확도를 적용하여 수치해의 정확도를 떨어뜨린다. 이는 본 논문을 통해 TVD 영역을 벗어나더라도 반드시 수치적 불안정성 문제가 생기는 것은 아님을 확인하였다. 이러한 경우 고차 정확도를 유지하는 선형 기법을 적용하는 것이 정확도 측면에서 타당하다. 따라서 정도 높은 선체 주위 유동을 모사하기 위해서는 공간상 전 영역에 선형 기법을 적용하고, 수치적 불안정성이 발생하는 국소적인 영역에 해당하는 셀에만 TVD 기법을 적용할 수 있는 수치 기법 개발이 필요하다.

후기

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (No. NRF-2019R1A2C1004682).

References

- 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. et al., 2010. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. *Journal of Ocean Engineering*, 37(7), pp.549-566.
- Deng, R., Huang, D., Zhou, G. & Sun, H., 2013. Investigation on some factors effecting ship resistance calculation with CFD code fluent. *Journal of Ship Mechanics*, 17(6), pp.616-624.
- Kim, Y.J. & Lee, S.B., 2017. Effects of trim conditions on ship resistance of KCS in short waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp.258-266.
- Kang, M.J. et al., 2020. An effect of numerical region with high resolution for kelvin wave on ship resistance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(5), pp.278-286.
- 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.
- Lee, S.B., Paik, K.J. & Park, D.W., 2017. A study on spatial distributions of Courant number and numerical efficiency of LTS method in calculation of ship resistance using structured and unstructured meshes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.83-89.

Niklas, K. & Pruszko, H., 2019. Full-scale CFD simulations for the determination of ship resistance as a rational, alternative method to towing tank experiments. *Journal of Ocean Engineering*, 190, 106435.

Park, D.W. et al., 2013a. Effects of trim on resistance performance of a ship. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(2), pp.88-94.

Park, S. et al., 2013b. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 5(1), 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.

Seo, J.H., Seol, D.M., Lee, J.H. & Rhee, S.H., 2010. Flexible CFD meshing strategy for prediction of ship resistance and propulsion performance. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(3), pp.139-145.

Seok, J. & Park, J.C., 2020. Numerical simulation of resistance performance according to surface roughness in container ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, pp.11-19.

Seo, S.U. & Park, S.H., 2017. Numerical simulations of added resistance and motions of KCS in regular head waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(2), pp.132-142.

Song, S.S. et al., 2020. Validation of the CFD approach for modelling roughness effect on ship resistance. *Journal of Ocean Engineering*, 200, 107029.

Van, S.H. et al., 1998. Experimental investigation of the flow characteristics around practical hull forms. *Proc. of the 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design*, Osaka, Japan, 25-27 May 1998, pp. 215-227.



심민경



이상봉