

선체 저항에 대한 수치 해석의 통계적 신뢰도 분석

이상봉[†] · 이윤모
현대중공업

Statistical Reliability Analysis of Numerical Simulation for Prediction of Model-Ship Resistance

Sang Bong Lee[†] · Youn Mo Lee
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co, Ltd.

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.

A wide scope of numerical simulations was performed to predict model-ship resistances by using STAR-CCM+ and OpenFOAM. The numerical results were compared with experimental measurements in towing tank to analyze statistical reliability of the present simulations. Based on the normal distribution of resistance errors in 113 cases of container carriers, tankers and very large crude-oil carriers, the confidence intervals of numerical error were estimated as $[-2.64\%, +2.32\%]$ and $[-1.82\%, +1.87\%]$ with 95% confidence in STAR-CCM+ and OpenFOAM, respectively. The resistance errors of liquefied natural gas carriers with single- and twin-skeg were confident in the ranges of $[-2.51\%, +2.64\%]$ and $[-2.29\%, +1.46\%]$, respectively. The grid uncertainty of resistance coefficients for KCS was also quantitatively analyzed by using a grid verification procedure. The grid uncertainty of OpenFOAM (5.1%) was larger than 4.4% uncertainty of STAR-CCM+ although OpenFOAM provided statistically more confident results than those of STAR-CCM+. It means that a grid system verified under a specific condition does not automatically lead to statistical reliability in general cases.

Keywords : Ship resistance(선체 저항), STAR-CCM+, OpenFOAM, Uncertainty(불확실성), Reliability(신뢰도)

1. 서론

나선의 저항을 예측하고 해석하는 것은 선박 성능을 추정하는 프로세스에서 가장 기본적인 단계이므로 나선의 저항을 줄이는 것은 선형 설계에 있어 여전히 가장 중요한 목표 중의 하나이다. 따라서 선체 저항에 대한 실험 예측이나 수치 해석을 통한 예측의 신뢰도는 선형 설계의 신뢰도와 직결되는 문제이다. 특히 전산기의 발달에 따라 선형의 저항 성능 평가를 위한 수치 해석이 매우 빈번하게 수행되는 최근에는 수치 해석 결과에 대한 신뢰도 분석 혹은 불확실성 해석이 더욱 중요하게 되었다.

수치 해석의 불확실성 해석은 검증과 유효성 확인(verification & validation, V&V)이라는 방법론을 통해 수행되어 왔다. Stern, et al. (2001)은 격자로부터 기인하는 오차가 해에 미치는 영향을 체계적으로 분석할 수 있는 접근법을 제시하였고, 이를 통해 격자의 신뢰도를 평가할 수 있음을 보였다. 이러한 방법을 이용하여 Wilson, et al. (2001)은 격자 신뢰도를 평가함으로써 선체에 작용하는 저항 및 선속 파형이 유효하게 예측되었음을 보였다. 격자 신뢰도에 대한 불확실성 해석은 Roache (2003)에 의해 제시된 격자 수렴도(grid convergence index, GCI)나 Stern, et al.

(2006)에 의해 제시된 가변 안전인자(factor of safety, Fs)등으로 보다 체계화되었다. V&V를 이용한 격자 검증은 선체 주위 유동에 서도 많이 수행되었는데, Choi, et al. (2009)은 와류 생성기가 선박의 속도 성능에 미치는 영향을 추정하는데 있어 V&V를 이용하여 격자의 신뢰도를 검증하였고, Lee, et al. (2012)은 드릴십의 문풍에서 발생하는 압력 변동량에 대한 유효성을 검증하기 위해 V&V를 수행하였다.

이렇듯 선체 저항 혹은 선체 주위 유동 해석의 신뢰도 평가를 위해 다양하게 불확실성 해석이 수행되었음에도 불구하고 기존 연구에서는 개별적 해석 조건 아래에서 격자 크기 변경을 통해 불확실성 해석을 수행하였다는 한계가 있다. 즉 격자에 대한 불확실성 해석이 개별적 해석 조건 내에서만 유효하다는 가정이나 혹은 일관된 격자 형태를 유지할 경우 개별적 신뢰도가 일반적 신뢰도로 확장될 수 있다는 귀납적 추론을 가정하고 있다. 선형을 설계하고 평가해야 하는 입장에서는 개별적 조건에서 검증된 격자 형태가 일반적 경우에 대해 동일한 신뢰도를 제공한다는 귀납적 가정에 근거하여 수치 해석을 수행하고 선형을 평가할 수 밖에 없다. 그런데 이러한 귀납적 가정에서는 필연적으로 모집단에 대한 표본집단의 대표성 문제가 만족되어야 한다. 본 연구에

서는 충분히 다양한 선형 및 다양한 해석 조건에서 저항 계산을 수행한 결과를 모형 시험 결과와 비교, 검토함으로써 당사에서 사용하는 저항 해석 결과가 통계적으로 유의한지를 연구하였다. 또한 표본 집단의 저항 오차에 대한 통계적 정규성을 전제 조건으로 당사에서 사용하고 있는 저항 해석 방법이 통계적으로 어느 정도의 신뢰도를 갖고 있는지를 분석하였다.

2. 수치 해석 기법 및 대상선

2.1 수치 해석 기법

본 연구에서는 STAR-CCM+ 및 OpenFOAM을 사용하여 3차원 다상 유동 수치 해석을 수행하였다. STAR-CCM+에서는 선체의 자세를 고려하기 위해 계산 영역 전체를 병진/회전하는 Dynamic Body Fluid Interaction(DFBI) 기법을 사용하였으며, 난류 모델은 Reynolds Stress Model(RSM) 을 사용하였다. 비정상 상태 해석을 수행하여 시간과 공간에 대해 각각 1차 및 2차 정확도의 차분을 적용하였으며, $\Delta t=0.02$ 초를 사용하여 계산을 진행하였다. 총 90초까지 수치 해석을 수행하여 60초 이후 선체 저항이 충분히 안정화되는 것을 확인한 이후 저항의 평균값을 취해 선체 저항을 구하였다. 계산에 사용되어진 모든 인자 및 변수는 차원을 갖는 값이며, 시간 역시 차원을 갖는 값이다. OpenFOAM의 경우 realizable $k-\epsilon$ (RKE) 난류 모델을 사용하였다. 효율적인 계산을 위해 국소 시간 기법(local time stepping)을 사용하였으며 공간에 대해 2차 정확도로 차분하였다. 선체 자세 변화를 고려할 수 있는 모듈과 경계 조건을 개발하였으며, 보다 자세한 수치 해석 조건은 Lee (2013) 및 Park, et al. (2013)을 참조할 수 있다. 자유 수면 및 선체 주변에 격자를 효율적으로 밀집시키기 위해 trimmed mesh와 prism layer를 사용하였으며, 전체 격자수는 모형선 크기에 따라 88만~147만개 정도이다.

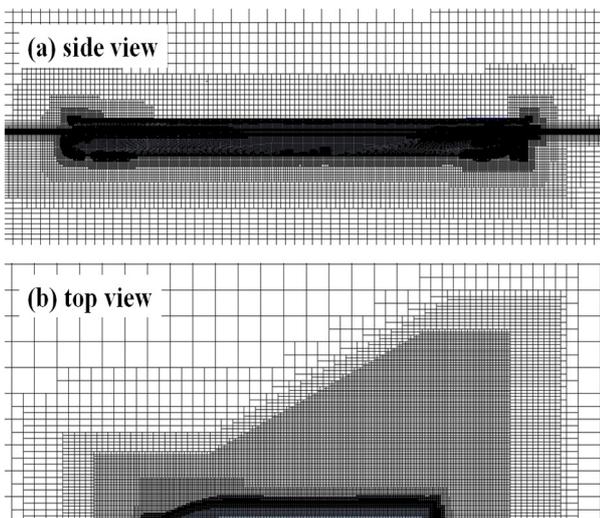


Fig. 1 Volumetric grids for KCS

STAR-CCM+와 OpenFOAM에서 사용한 격자는 선체 벽면에 적용된 prism layer의 두께를 제외하고, 나머지 부분은 동일한 조건으로 생성하였다. Prism layer 두께를 포함하여 완전히 동일한 격자를 사용할 경우 모든 선형에 대해 OpenFOAM의 결과에서 약 2.5~3% 정도 저항이 작게 예측되는 것을 확인하였다. 저항 성분을 분석한 결과 형상에 의한 압력 저항은 거의 유사하나 마찰 저항이 작게 예측되었으므로 이를 보정하기 위해 OpenFOAM에서는 STAR-CCM+에서 사용한 격자보다 prism layer의 두께를 증가시켰다. 그리고 선수부 및 선미부에 공간 격자를 밀집시켰으며, 선체에서 발생한 파형이 잘 퍼져나갈 수 있도록 Fig. 1과 같이 격자를 구성하였다. 또한 자유 수면에서는 높이 방향으로 $\Delta z=0.0094m$ 의 격자 크기를 사용하였다. 최소 격자 크기는 선체 벽면의 첫번째 prism layer이며, 선체 벽면 y+값은 STAR-CCM+의 경우 약 20~45, OpenFOAM의 경우 약 70~160 범위에 분포한다.

2.2 대상선 및 저항 해석 결과

공개 선형인 KRISO container ship(KCS)을 포함하여 총 33척의 컨테이너선(C/C, 1000~18000TEU)에 대해 다양한 선속 조건 ($Fn=0.07\sim 0.28$)을 적용하여 60 경우, 탱커(TKR, 73~165k) 및 대형원유운반선(VLCC, 300~321k) 26척에 대해 $Fn=0.08\sim 0.17$ 을 적용하여 53 경우, 액화천연가스운반선(LNGC, 155~267k) 27척에 대해 $Fn=0.08\sim 0.23$ 을 적용한 151 경우를 포함하여 총 264경우에서 저항 해석을 수행하였다.

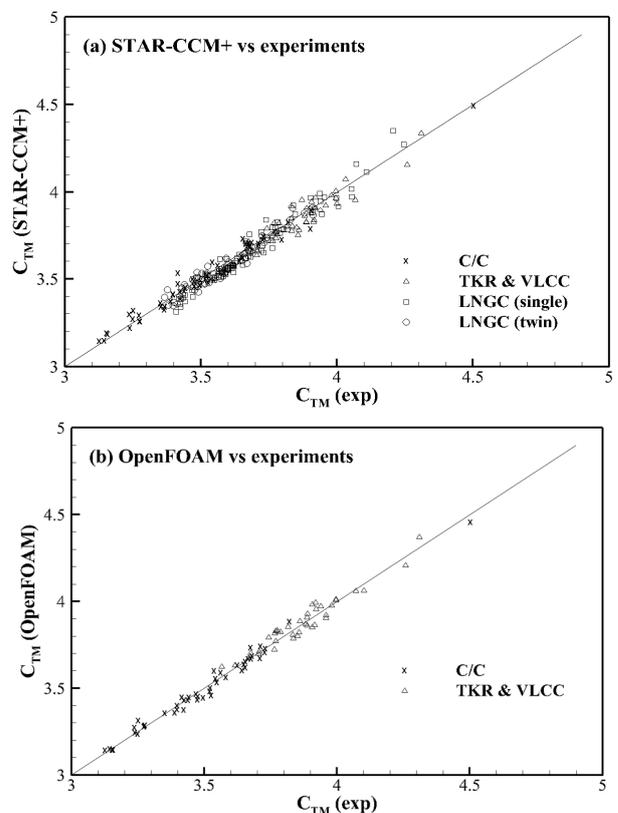


Fig. 2 Comparisons of resistance coefficient with experimental results, (a) STAR-CCM+ and (b) OpenFOAM

여기서 $F_n = V_M / (g L_{pp})^{0.5}$ 로 V_M 과 L_{pp} 는 모형선의 선속과 수선 길이를 나타내며 g 는 중력 가속도이다. 실험과 수치 해석에 대한 저항 계수($C_{TM} \times 10^{-3}$, 이하 $\times 10^{-3}$ 생략)를 비교하여 Fig. 2에 나타내었으며, 모형 시험 대비 수치 해석의 오차에 대한 히스토그램은 Fig. 3과 같다. 각 그림에서 (a)는 STAR-CCM+을 (b)는 OpenFOAM을 사용하여 얻은 저항 해석 결과이다. OpenFOAM의 경우 LNGC에 대한 해석 결과가 부족하여 C/C, TKR 및 VLCC에 대한 경우만을 고려하였다. Fig. 3에서 보듯이 본 연구 결과의 저항 오차는 모형 시험 대비 $\pm 2\%$ 내에 주로 분포한다.

저항 값에 대한 오차는 전산유체역학적 관점에서 볼 때 난류 모델, 다상 유동 모델, 차분 기법, 격자 구성, 선체 자세 변화 기법, 수렴 알고리즘 등에 의해 복합적으로 나타날 수 있으나 이러한 오차 원인의 기여도를 개별적으로 명확히 구분하는 것은 불가능하다. 따라서 이렇게 복합적으로 나타난 오차를 분석하기 위해서는 가능한 많은 표본에 대해 통계적 신뢰도를 살펴보는 것이 현실적인 방법이다. 본 연구에서 적용한 방법 역시 여러 가지 오차 원인들이 복합적으로 작용한 최종 저항 값에 대한 통계적 신뢰도를 분석하는 것이다.

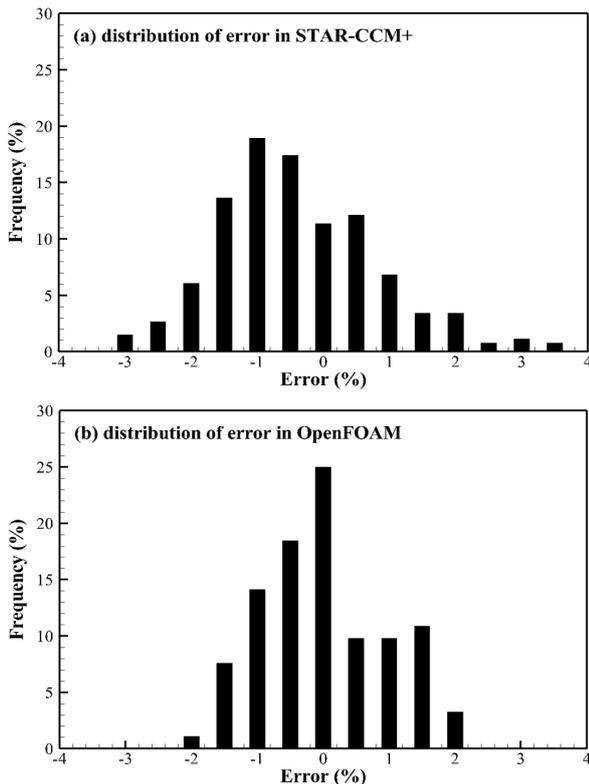


Fig. 3 Histograms of CTM errors, (a) STAR-CCM+ and (b) OpenFOAM

3. 결과

3.1 통계적 신뢰도 분석

본 연구에서 수행한 저항 해석 결과를 면밀히 관찰할 결과 선

중에 따라 통계적 특성이 다소 상이함을 발견하였다. 컨테이너선과 대형원유운반선의 경우 선형의 특성이나 운항 속도가 매우 다름에도 불구하고 정규성과 통계적 신뢰도에 대한 특성이 매우 유사하였다. 반면 액화천연가스운반선의 경우 단축 선형과 쌍축 선형이 서로 다른 통계적 특성을 보여주었다. 이에 따라 본 연구에서는 선종 별로 통계적 특성을 분석하였다.

3.1.1 컨테이너선 및 대형원유운반선

많은 통계적 분석법들은 대상 집단이 정규 분포라는 가정에 근거하므로 본 연구에서 수행한 수치 해석 결과와 모형 시험 사이의 오차가 통계적으로 정규성을 만족하는지 확인하는 것이 중요하다. 정규성을 만족한다는 귀무가설을 검증하기 위해 컨테이너선과 대형원유운반선의 저항에 Anderson-Darling(A-D), Ryan-Joiner(R-J) 그리고 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 방법을 적용하였다. Fig. 4는 STAR-CCM+와 OpenFOAM을 이용하여 해석한 결과에 대한 확률도를 보여주며, 각 정규성 검정 방법에 의한 p-value 결과를 Table 1에 나타내었다. 표에서 보듯이 95%의 신뢰도를 적용할 경우 $p > 0.05$ 를 만족하므로 컨테이너선과 대형원유운반선의 저항 오차가 검정 방법에 상관없이 항상 정규성을 보이는 것을 알 수 있다.

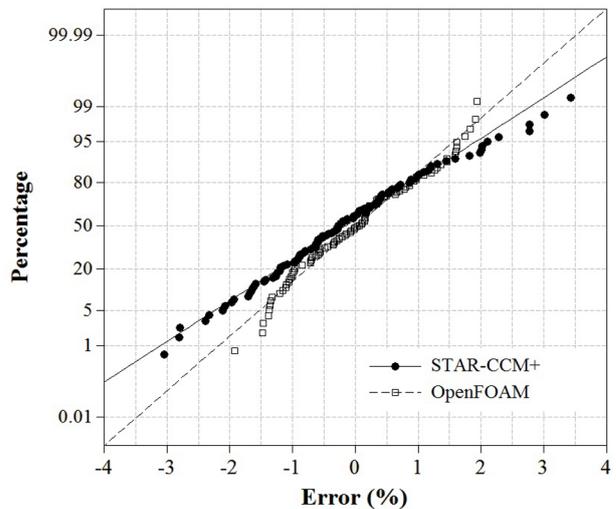


Fig. 4 Probability plot of CTM errors in C/C, TKR and VLCC

Table 1 Test results for normality of CTM errors in C/C, TKR and VLCC

	STAR-CCM+	OpenFOAM
A-D	$p=0.317$	$p=0.089$
R-J	$p>0.1$	$p>0.1$
K-S	$p>0.15$	$p>0.15$

정규성에 대한 검증을 바탕으로 C_{TM} 오차의 빈도수에 대한 히스토그램과 각 오차를 평균과 표준편차로 정규화한 분포를 Fig. 5에

나타내었다. STAR-CCM+와 OpenFOAM 해석 결과에 대한 평균 (μ)과 표준 편차(σ)는 Table 2와 같다. 이를 바탕으로 1σ 에 해당하는 68%의 신뢰 구간은 STAR-CCM+의 경우 [-1.42%, +1.10%]이며, OpenFOAM의 경우[-0.92%, +0.96%]이다. 2σ 에 해당하는 95%의 신뢰도를 갖는 오차 구간은 STAR-CCM+에서 [-2.64%, +2.32%]이며, OpenFOAM에서 [-1.82%, +1.87%]이다. 또한 CTM 오차 평균값의 95% 신뢰 구간은 STAR-CCM+의 경우 [-0.39%, +0.08%], OpenFOAM의 경우 [-0.17%, +0.22%]로 Table 3에 정리하였다. STAR-CCM+에서 고차의 난류 모델인 RSM을 사용하였음에도 불구하고, RKE model을 사용한 OpenFOAM과 유사하거나 혹은 약간 더 넓은 오차 구간을 갖는 것은 선체 저항이 갖고 있는 특성과 해의 수렴성 때문이다. STAR-CCM+에서 RSM을 사용했다 하더라도 선체에 작용하는 전단력을 계산하기 위해 2-equation 난류 모델과 마찬가지로 벽면에 인접한 격자에서는 난류 에너지(turbulent kinetic energy) 방정식을 풀게 된다. 따라서 마찰 저항이 계산되는 관점에서 보면 RSM이 RKE model보다 항상 더 정확한 값을 제공할 수 있다고 보기 어렵다. 그리고 RSM의 경우 수렴성이 좋지 않아 오차가 크게 발생하는 경우($\pm 3\%$ 이상)를 볼 수 있는데 이런 저항 값들로 인해 같은 신뢰도에서 OpenFOAM보다 넓은 오차 구간을 보여 준다. 이러한 문제에도 불구하고 STAR-CCM+에서 RSM을 사용하는 것은 프로펠러로 유입되는 반류를 RKE model보다 정확하게 추정할 수 있기 때문이다. 특히 저속 비대선의 빌지 볼텍스(bilge vortex)와 같이 비등방성이 강한 반류의 경우 RSM이 유리할 수 있다.

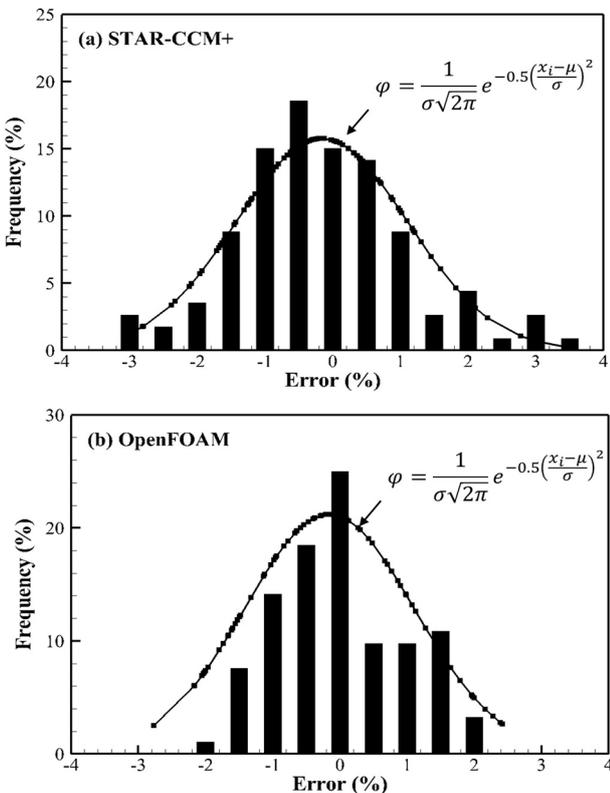


Fig. 5 Histograms and normal distributions of CTM errors, (a) STAR-CCM+ and (b) OpenFOAM

Table 2 Mean and standard deviation of CTM errors

	STAR-CCM+	OpenFOAM
μ	-0.157	0.020
σ	1.266	0.941

Table 3 Estimation of confidence interval

	Reliability	STAR-CCM+	OpenFOAM
confidence interval	68%	-1.42%~1.10%	-0.92%~0.96%
	95%	-2.64%~2.32%	-1.82%~1.87%
Mean Value	95%	-0.39%~0.08%	-0.17%~0.22%

3.1.2 액화천연가스운반선

액화천연가스운반선의 경우 단축선형과 쌍축선형의 저항에 대한 통계적 특성이 다소 다르게 관찰되었다. 단축선형과 쌍축선형의 저항 오차에 대한 확률도를 나타낸 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 쌍축선형에서의 저항 오차는 정규 분포를 의미하는 점선에 근사하는 반면, 단축선형에서 해석된 저항 오차는 실선으로 나타낸 정규 분포로부터 편차가 존재한다. 이러한 특성은 Table 4에 나타낸 정규성 검정에서도 정량적으로 확인할 수 있다. 표에서 보듯이 단축선형에서의 저항 오차는 가장 느슨한 검정 방법인 Kolmogorov-Smirnov에서도 기각역에 해당하는 반면 쌍축 선형에서의 저항 오차는 모든 검정 방법에서 정규성을 갖는 것으로 나타났다.

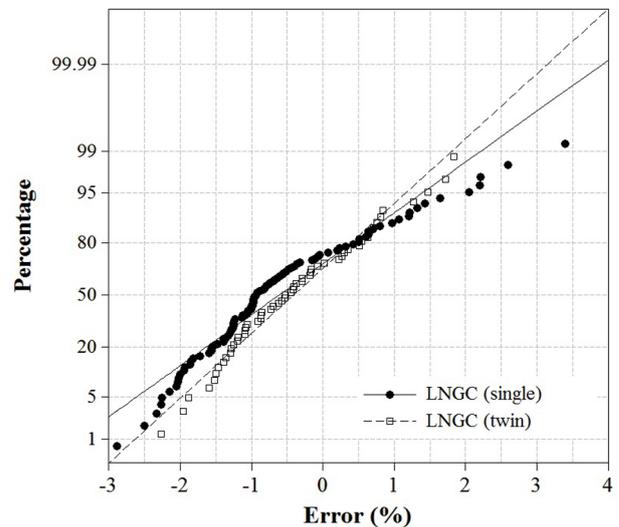


Fig. 6 Probability plot of CTM errors in single- and twin-skeg LNGC

Table 4 Test results for normality of CTM errors in LNGC

	STAR-CCM+	
	Single-skeg	Twin-skeg
A-D	p<0.005	p=0.265
R-J	p<0.01	p>0.1
K-S	p<0.01	p>0.15

우선 55개의 저항 해석 데이터를 갖고 있는 쌍축선형에 대한 오차의 평균은 -0.41%이며 표준 편차는 0.956이다. 96개의 저항 해석 데이터를 갖는 단축선형의 경우 오차의 평균은 -0.62%이며 표준 편차는 1.218이다. 그러나 앞서 검정한 바와 같이 단축선형에서의 저항 해석 결과는 정규성을 갖고 있지 않으므로 이에 대한 통계적 분석을 위해서 C_{TM} 오차에 대해 Johnson 변환을 수행하였다. 변환 결과에 대한 확률도는 Fig. 7과 같으며, Anderson-Darling 방법을 사용한 검정 결과는 $p=0.382$ 로 정규성을 갖는 것으로 나타났으며 다른 검정 방법으로도 정규성을 확인하였다. 본 연구에서 적용한 Johnson 변환식은 아래와 같다.

$$Z = -0.9991 + 1.444 \sinh^{-1} \frac{X + 1.610}{1.127} \quad (1)$$

여기서 X는 단축 LNGC에 대한 CTM 오차이며, Z는 상기 변환식을 적용한 표준화 변수이다. 단축 및 쌍축 LNGC의 CTM 오차 빈도수에 대한 히스토그램과 각 오차를 평균과 표준편차로 정규화한 분포를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)에서 검은색 막대 그래프는 CTM 오차에 대한 히스토그램이며 흰색 막대 그래프는 표준화 변수 Z에 대한 히스토그램이다. 그리고 실선이 의미하는 것은 Fig. 8(a)에서 는 표준화 변수 Z에 대한 평균(-0.058)과 표준편차(1.017)를 이용한 정규 분포이며, (b)에서는 각 CTM 오차를 정규화한 분포이다. 이를 바탕으로 추정한 단축선형 및 쌍축선형에 대한 신뢰구간은 Table 5에 정리하였다. 단축선형에 신뢰구간은 표준화 변수를 CTM의 오차로 환산하여 표기하였다.

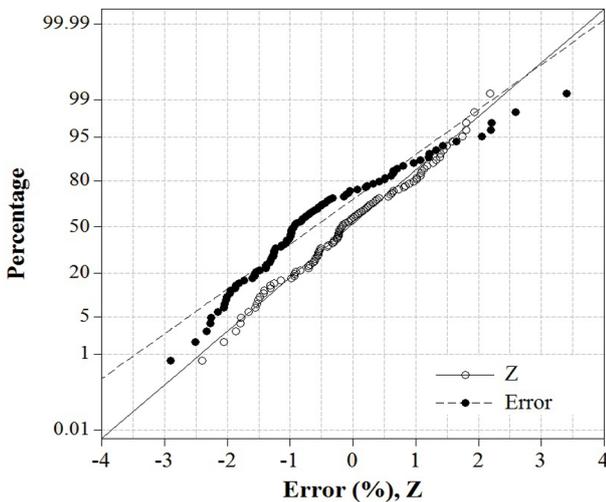


Fig. 7 Johnson transformation of CTM errors in LNGC with single-skeg

Table 5 Estimation of confidence interval

	Reliability	STAR-CCM+	
		Single-skeg	Twin-skeg
confidence interval	68%	-1.67%~0.41%	-1.36%~0.54%
	95%	-2.51%~2.64%	-2.29%~1.46%
Mean Value	95%	-1.02%~-0.63%	-0.67%~0.15%

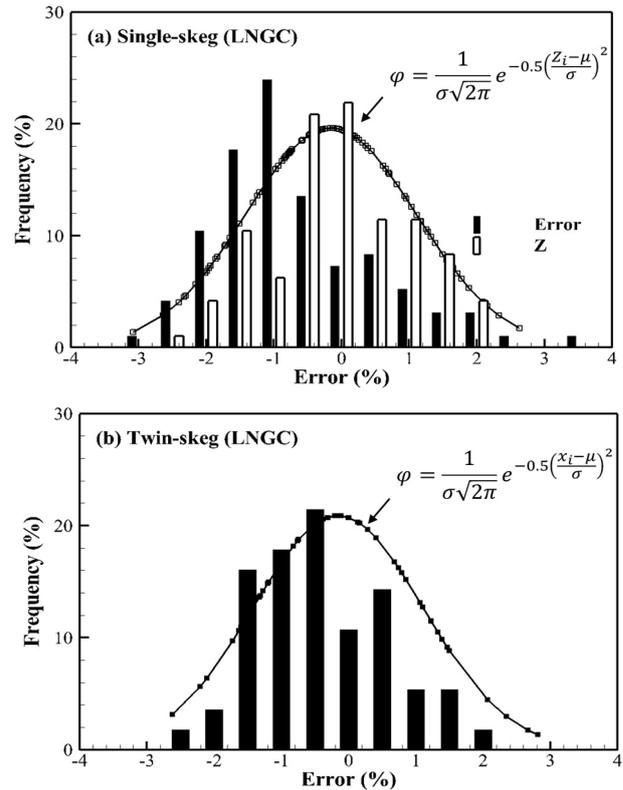


Fig. 8 Histograms and normal distributions of CTM errors and Z in LNGC with (a) single- and (b) twin-skeg

3.2 불확실성 해석

본 연구에서는 통계적 분석뿐만 아니라 기존 연구에서 주로 행해졌던 불확실성 해석을 수행하여 비교 검토하였다. 불확실성 해석은 잘 알려진 바와 같이 격자 크기를 일정한 비율로 변화시키며 목적함수의 변화를 통해 격자의 수렴도와 불확실성을 평가하는 방법이다. 정렬 격자계의 경우 격자 생성의 임의성을 배제할 수 있으므로 각 방향으로 $\sqrt{2}$ 의 비율로 격자를 증가 혹은 감소시키면 전체 격자수가 $2\sqrt{2}$ 배만큼 증가하거나 감소하는 결과를 얻을 수 있다. 반면 본 연구에서와 같이 비정렬 격자(trimmed mesh + prism layer)를 사용할 경우 격자 생성의 임의성으로 인해 전체 격자수가 정확하게 제어되지 못하는 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 선체 벽면 근처에서는 표면 격자 제어와 prism layer의 제어를 통해 비교적 일관된 격자 생성이 가능하다는 가정하에 본 연구를 진행하였다. 실제로 본 연구에서 수행한 격자를 면밀히 관찰한 결과 선체 주위 격자는 충분히 일관된 밀집도로 격자가 생성되었음을 확인할 수 있었다.

대상선은 KCS이며 설계 속도, 설계 흘수에서 STAR-CCM+ 및 OpenFOAM을 이용하여 저항 해석을 수행하였다. 각 단계에 해당하는 격자를 생성하기 위해 사용한 격자 인자 및 전체 격자 수는 Table 6에 나타내었다. 각 격자 단계에서 얻어진 저항 계수(C_{TM}), 수렴비(R_G), 정확도(ρ_G), 보정 계수(C_G)는 아래 Table 7에 정리하였다. 표에서 보듯이 STAR-CCM+와 OpenFOAM 모두 $0 < R_G < 1$ 이므로 C_{TM} 은 단조 수렴한다고 가정할 수 있다. 이 때 정확도는

1.599 및 1.632로 $p_{Gth}=2$ 보다 작은 값으로 나온다. 보정 계수를 고려하여 Xing and Stern (2008)의 방법을 사용하면 아래와 같이 불확실성을 추정할 수 있다.

$$U_G = [2(1 - C_G) + 1] |\delta_{REG}^*| \text{ for } |1 - C_G| \geq 0.125 \quad (2)$$

식 (2)에 의해 추정된 비보정 불확실성(uncorrected Uncertainty, U_G)은 STAR-CCM+와 OpenFOAM에서 각각 C_{TM} 대비 4.4%와 5.1%이다. 이러한 비보정 불확실성이 의미하는 것은 KCS 선형에 대해 설계 흡수 및 설계 속도에서 저항 해석을 수행할 경우 STAR-CCM+의 경우 약 4.4% 수준, OpenFOAM의 경우 약 5.1% 수준에서 격자에 의한 불확실성을 기대할 수 있다는 사실이다.

앞서 살펴본 통계적 신뢰도에서는 OpenFOAM의 오차 신뢰 구간이 STAR-CCM+보다 다소 작게 나온 반면, 격자의 불확실성은 OpenFOAM에서 약간 크게 나타난다. 이는 서론에서 기술한 바와 같이 격자 불확실성 해석은 개별적 해석 조건 내에서만 유효한 것으로 격자의 불확실성 해석만으로는 격자 구성의 일반적 신뢰도를 확인하기 어렵다는 것을 의미한다. 다만 모든 현업에서 격자 구성의 통계적 신뢰도를 확인하는 것은 현실적으로 불가능하므로 현업 수준에서 격자 불확실성 정도가 통계적 오차 신뢰 구간과 갖는 연관성을 밝히는 것은 향후 주요한 연구 과제가 될 것이다. 이를 위해 많은 선형 및 해석 조건에서 불확실성 해석을 수행하여 통계적 신뢰도와 비교할 필요가 있다.

Table 6 Grid systems for uncertainty analysis

Solver	Grid level	Reference	Prism thickness	y+	No. of cells
STAR-CCM+	GS1	0.212	0.00716	20	710,711
	GS2	0.150	0.00506	14	1,366,419
	GS3	0.106	0.00358	10	2,932,140
OpenFOAM	GS1	0.212	0.02864	80	699,312
	GS2	0.150	0.02023	55	1,344,486
	GS3	0.106	0.01431	40	2,885,092

Table 7 Verification of grid systems

Solver	Grid level	CTM	RG	pG	CG	δ^*RE
STAR-CCM+	GS1	3.821	0.575	1.599	0.740	-0.104
	GS2	3.687				
	GS3	3.610				
OpenFOAM	GS1	3.841	0.568	1.632	0.760	-0.126
	GS2	3.672				
	GS3	3.576				

4. 결론

본 연구에서는 컨테이너선 60 경우, 탱커 및 대형원유운반선

53 경우, 액화천연가스운반선 151 경우 등 총 264 경우에 대해 STAR-CCM+와 OpenFOAM을 이용하여 저항을 해석한 결과에 대해 통계적 신뢰도를 분석하였다. 그 결과 컨테이너선과 대형원유운반선은 STAR-CCM+와 OpenFOAM에서 모두 정규성을 보여 주었다. 95%의 신뢰도를 갖는 오차 구간은 STAR-CCM+에서 [-2.64%,+2.32%]이며, OpenFOAM에서 [-1.82%, +1.87%]였다. 액화천연가스운반선의 경우 쌍축 선형에서는 정규성을 보였으며, 95%의 신뢰도를 갖는 오차 구간은 [-2.29%,+1.46%]였다. 단축 액화천연가스운반선의 경우 저항값의 오차가 비정규 분포를 보여 Johnson 변환을 적용하였으며, 그 결과 [-2.51%,+2.64%]의 신뢰 구간을 보여주었다. 한편 KCS의 설계 속도 및 설계 흡수에서 격자의 불확실성 해석을 수행한 결과 격자에 의한 비보정 불확실성은 STAR-CCM+와 OpenFOAM에서 각각 4.4%와 5.1%로 추정되었다. 통계적 신뢰도와 달리 OpenFOAM에서 격자 불확실성이 더 큰 것은 격자 불확실성 해석이 개별적 해석 조건 내에서만 유효하며 격자의 불확실성 해석만으로는 격자 구성의 일반적 신뢰도를 확인하기 어렵다는 것을 의미한다.

References

- Choi, J.E. Kim, J.H. Lee, S.B. & Lee, H.G., 2009. Computational Prediction of Speed Performance for a Ship with Vortex Generator. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 46(2), pp.136-147.
- Lee, S.B., 2013. Application of OpenFOAM to prediction of hull resistance. *8th International OpenFOAM Workshop*, Jeju, Korea, 11-14 June 2013.
- Lee, S.B. Han, B.W. Park, D.W. Ahn Y.W. Go, S.C. & Seo, H.W., 2012. Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fluctuations in Moonpool. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 49(6), pp.484-490.
- 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.
- Roache, P., 2003. Errors bars for CFD. *AIAA 2003-408 41st Aerospace Sciences Meeting*, Reno, Nevada, 6-9 January 2003.
- Stern, F. Wilson, R.V. Coleman, H.W. & Paterson E.G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part 1: Methodology and Procedures. *Journal of Fluids Engineering*, 123, pp.793-802.
- Stern, F. Wilson, R.V. & Shao J., 2006. Quantitative

V&V of CFD Simulations and Certification of CFD codes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 50, pp.1335–1355.

Wilson, R.V. Stern, F. Coleman, H.W. & Paterson E.G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations–Part 2: Application for Rans Simulation of a Cargo/Container Ship. *Journal of Fluids Engineering*, 123, pp.803–810.

Xing, T. & Stern F., 2008. *Factors of Safety for Richardson Extrapolation for Industrial Applications.*

IIHR Technical Report No. 466. Iwowa: The university of Iwowa

