

다른 축척비를 가진 KLNG 선형주위 유동장 시뮬레이션

하윤진¹·이영길^{2,†}·강봉한¹
인하대학교 대학원 조선해양공학과¹
인하대학교 항공·조선·산업공학부 조선해양공학전공²

Numerical Simulation of Turbulent Flow around KLNG Hull Form with Different Scale Ratio

Yoon-Jin Ha¹·Young-Gill Lee^{2,†}·Bong-Han Kang¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Inha University¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²

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.

In this study, flow characteristics around the hull form of KLNG are investigated by numerical simulations. The numerical simulations of the turbulent flows with the free surface around KLNG have been carried out at Froude number 0.1964 using the FLUENT 6.3 solver with Reynolds stress turbulence model. Several GEOSIM models are adopted to consider the scale effect attendant on Reynolds number. Furthermore, a full scale ship is calculated and the result is compared with the numerical results of GEOSIM models. The calculated results of GEOSIM models and the full scale ship are compared with the experiment data of MOERI towing tank test and Inha university towing tank test. Moreover, wake distribution on the propeller plane of the full scale ship is estimated using the numerical results of GEOSIM models. The prediction result is directly compared with the simulation result in full scale.

Keywords : Wake(반류), Full scale ship(실선), GEOSIM model(상사모형선), Scale effect(축척효과), Flow characteristics(유동특성)

1. 서론

최근 IMO는 전 세계 이산화탄소 배출량의 3.3%를 차지하는 선박들에 대하여 2025년까지 이산화탄소 배출량을 30% 줄이도록 의무화하고, 2013년부터 선박제조연비지수가 일정한 수준을 넘지 못하면 운항하지 못하도록 규제하고 있다. 이를 만족하기 위하여 새로이 건조될 배들은 기존의 선박보다 저항 및 추진 성능의 향상이 필요해 졌고, 그러기 위하여 실선의 유체역학적 성능을 정도 높게 추정할 필요가 있게 되었다. 실제 선박의 유체역학적 성능을 추정하기 위하여, 일반적으로 많은 경우 모형선에 대한 시험에 의존한다. 100여년 전만 하더라도 새로운 배의 유체역학적 성능을 추정하기 위하여 기존 유사선형의 시운전 자료로부터 얻은 실선 데이터를 사용하였지만, 현대적 예인수조를 만들어 상사법칙을 근거로 하는 모형시험 해석법이 제안되면서 모형시험에 대한 의존성이 비약적으로 증가하였다 (Park, et al., 1994; Anthony, et al., 2011). 그러나 배에 대한 모형시험은 프루드 수(froude number)에 의한 역학적 상사조건에서 수행되기 때문에, 근래의 선형과 같이 높은 레이놀즈 수(reynolds number)

를 가지는 비교적 고속의 대형 선박에 대하여 유체역학적 성능을 정도 높게 추정하기는 그리 쉬운 일이 아니다. 즉, 이러한 방법은 레이놀즈 수에 의한 축척효과의 영향으로 인하여 실제 선박주위의 유동은 모형시험에서의 그것과 차이가 있게 된다. 이러한 축척효과에 기인한 선체주위의 유동 특성을 조사하는 방법 중의 하나로, 축척비가 다른 기하학적으로 상사된 모형선들의 실험결과를 비교하는 방법 (Garcia-Gomez, 2000)이 있다. 또 한편으로는, 최근 수치해석 기법과 컴퓨터의 급속한 발전으로 인하여 수치시뮬레이션을 이용한 실선 크기의 선체주위 유동해석에 많은 연구가 수행되고 있다 (Choi, et al., 2011; Kim, et al., 2011). 후자의 경우는, 실선에 대한 난류 유동장 해석을 위한 모델링 방법이 완벽하게 정립되어 있지 않고, 수치계산 결과의 검증에 필요한 실선 계측자료들이 충분히 확보되어 있지 않기 때문에 (Yang, et al., 2010), 실선에 대한 수치해석 기법은 모형선에 대한 수치해석 기법에 비해 그 활용도가 떨어지는 것이 사실이다.

본 연구에서는, 근래에 많은 관심을 보이고 있는 LNG 운반선에 대하여 위에서 언급한 내용을 연구할 목적으로, KRISO 138K LNG Carrier(KLNG)를 대상선형으로 선정하였다. 실선 크기에 대한 유동장 해석의 정성적 검증을 위하여 상사모형선을

이용한 수치시뮬레이션을 통해 축척비가 서로 다른 모형선 주위 유동장의 축척효과를 파악해 볼때 동시에 모형시험 결과들과도 비교 분석해 보았다. 즉, 현재 널리 사용되는 수치시뮬레이션 방법들은 모형선 정도 크기의 비교적 낮은 레이놀즈 수에서 그 계산결과가 모형시험 결과와 비교적 유사한 결과를 보여주고 있는 것을 바탕으로, 실선주위의 유동장에 대해서도 수치계산하여 모형선 주위 유동장과 비교 분석하였다. 또한, 선박의 저항 및 추진성능 평가 및 추진기를 설계하는데 기초자료로 흔히 사용되는 실선 프로펠러 면에서의 공칭반류 추정에 대하여도 연구하였다. 상사모형선들을 이용한 수치시뮬레이션 결과로부터 추정된 실선의 공칭반류 분포와 실선에 대한 계산으로부터 얻어진 공칭 반류 분포를 서로 비교 분석하여 모형선으로부터 실선의 반류분포를 추정하는 기법의 활용성에 대해서도 검토해 보았다.

2. 대상선형과 계산조건

수치 시뮬레이션을 활용하여 모형선과 실선 주위의 유동장을 비교 분석하기 위해 모형시험 결과가 공개되어 있는 KRISO 138K LNG Carrier(KLNG)를 대상 선형으로 선정하였고, 상사모형선 주위 유동장을 서로 비교하여 축척효과를 확인해 보고자 3가지 축척비를 가지는 상사모형선에 대하여 수치계산을 수행하였다. 대상선형의 주요요목을 Table 1에 정리하였다. 1/69과 1/103의 축척비를 가지는 상사모형선들에 대하여 인하대학교 선형시험수조, 1/34 축척비의 상사모형선 실험은 MOERI에서 수행되었고 각 모형선은 타 장치가 부착된 상태이다. 또한 반류분포에 대한 수치시뮬레이션 검증을 위해 MOERI의 시험 결과와 동일한 크기의 모형선(축척비 : 1/38.6364)에 대한 수치해석도 추가로 수행하였고, MOERI의 모형선에 대한 제원도 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Principal particulars of KLNG

KLNG	Full-scale	Model			
Scale ratio	1	1/34	1/38.6364	1/69	1/103
LWL(m)	263.866	7.761	6.829	3.824	2.562
B(m)	42.6	1.253	1.103	0.617	0.414
T(m)	11.3	0.332	0.292	0.164	0.11
$V_s(m/s)$	10.03	1.719	1.614	1.207	0.988
Froude No.	0.1964				
Reynolds No.	2.24×10^9	9.07×10^6	9.33×10^6	3.14×10^6	1.72×10^6

1/38.6364 축척비의 모형실험은 모형선에 타 장치가 부착되지 않은 선체 단독실험이지만 타 장치로 인한 유동의 교란이 추진기면까지 영향을 크게 미치지 않을 것이라 판단하였다.

Table 2 Grid information of numerical simulations

KLNG	Full-scale	Model			
Scale ratio	1	1/34	1/38.6364	1/69	1/103
No. of cells	about 7×10^5				
y_1^+	1500	10			
	3000				
	6000				

좌표계와 격자계로는 유동의 진행 방향을 X축, 선체의 폭 방향을 Y축, 그리고 선체의 수직 상방을 Z축으로 하는 우수 좌표계로 격자를 생성하였고, 유입면은 선체로부터 배 길이의 1배, 유출면과 폭 방향 경계면은 선체로부터 배 길이의 2배만큼 떨어져 하였다. 좌표계의 원점은 선체의 중앙 횡단면과 중앙 종단면, 그리고 선체의 설계수선면이 서로 만나는 점으로 하였다. 선체 뒷부분에 위치하는 타는 격자 생성을 용이하게 하기 위하여 단순화 시켜서 타 상단의 형상을 선저까지 확장하였다. 격자 수는 약 70만개 정도로 현 시스템에서 최대로 사용하였으며, 격자수를 고정시키고, 실선에서는 y_1^+ 에 따른 계산 결과를 서로 비교해 보기 위하여 선체 근처 영역에서는 격자계를 따로 작성하였다. 즉, y_1^+ 에 따라(1500, 3000, 6000) 선체 근처 영역의 격자 간격을 조정하였다. 레이놀즈 수가 증가할수록 벽함수를 만족하는 y_1^+ 의 상한 값이 증가하여, 실선의 경우($R_n=2.24 \times 10^9$) y_1^+ 가 10000까지 벽함수를 만족할 것이라 생각되기 때문에(Yang et al., 2010; Choi and Kim., 2010) 사용되는 격자수를 감안하여 그 상한 값 이하에서 3가지 y_1^+ 값을 선택하였다. y_1^+ 가 1500보다 작은 경우에는 격자의 세장비(aspect ratio)가 그 이상의 경우보다는 비교적 커지게 되어서 현재의 격자수로는 본 유동계산에 적절한 좋은 격자계를 생성할 수 없었다. 계산들에 사용된 격자계에 대한 이러한 정보를 Table 2에 정리하였고, 대표적으로 실선 크기의 계산에 사용된 격자계를 Fig. 1에 나타내었다.

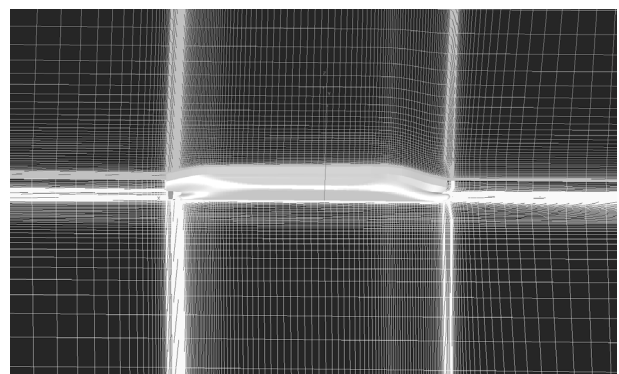


Fig. 1 Partial view of a grid system for KLNG hull (full-scale)

수치계산은 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하여 진행되었다. 지배방정식들은 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이 채용되었으며, 속도-압력 연성은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equation) 알고리즘을 이용하여 계산되었다.

지배방정식 중의 대류항은 2차 상류차분법을 이용하여 이산화되었으며, 자유수면의 위치는 Volume Of Fluid(VOF)법을 이용하여 정의되었다. 난류모델로는 Kim and Kim (2006)과 Yang, et al. (2010)의 연구를 참고하여 Reynolds stress turbulence model이 사용되었다.

3. 수치시뮬레이션 결과

3.1 상사모형선에 대한 계산결과 비교

축척효과에 의한 선체주위 유동특성의 변화를 조사하기 위하여 축척비가 서로 다른 상사모형선들에 대하여 수치시뮬레이션을 수행하였고, 그 계산결과들과의 비교를 위하여 계산에 사용된 것과 동일한 축척비를 가지는 모형선들에 대한 MOERI의 실험결과들을 참고함과 동시에 인하대학교 선형시험수조에서 모형시험을 수행하였다. 그러나 본 연구에서는 저항시험만을 수행하였기 때문에 선체주위의 유동장에 대한 검증을 위해 MOERI의 반류 계측실험 결과와 수치계산 결과를 비교해 보았다.

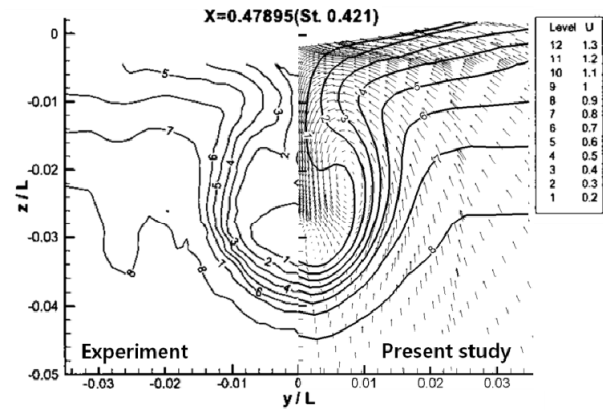


Fig. 2 Axial velocity contours and velocity vectors on the propeller plane of KLNG hull(scale ratio : 1/38.6364, (Kim & Kim, 2006))

반류 분포를 실험 결과와 비교하기 위해 1/38.6364의 축척비를 가지는 모형선에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였고 Fig. 2에 수치 계산과 모형 시험의 결과로 얻은 추진기면에서의 축방향 속도 성분 분포를 서로 비교 하였다. 각 방향의 길이를 수선면의 길이로, 각 방향의 속도는 유입속도로 무차원화 시켰다. Fig. 2를 보면, 프로펠러 면 중심위치에서는 모형 시험 결과와 다소 차이를 보이고 있다. 이는 Kim and Kim (2006)에서와 마찬가지로 Fluent의 경우 낮은 속도 영역을 제대로 시뮬레이션하지 못한 것에 기인하는 것으로 생각된다. 또한 격자계 수정을 통하여 향후 더 정도 높은 수치계산을 위한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 하지만 밀지 보오텍스에 의한 반류 분포에서의 갈고리 모양이 비교적 실험결과와 근접함을 확인할 수 있다. 또한

모형 시험 결과와 본 수치 계산에서의 경계층의 묘사가 근접한 결과를 확인할 수 있다. 이를 통해 선체 주위의 유동장에 대한 수치 계산의 신뢰성을 확인하였고 상사모형선들에 대한 유동장 계산 결과를 서로 비교 분석해보았다.

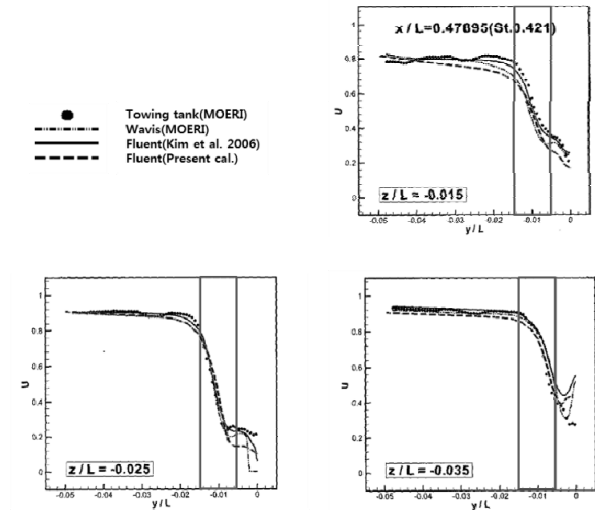


Fig. 3 Comparison of velocity profile at St. 0.421

각 z/L 위치에서 축방향 속도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 추진기의 r/R이 0.3에서 1이 되는 지점을 사각형으로 표시하였고 MOERI의 예인수조 실험 자료 및 유동장 해석 코드인 WAVIS를 사용해 얻은 수치해석 결과 그리고 Kim and Kim (2006)의 Fluent 계산결과와 비교하였다. Kim and Kim (2006)의 Fluent 계산결과는 자유수면을 대칭면으로 근사한 이중모형 유동에 대한 수치해석 결과이다. 사각형 내부영역에서 축방향 속도 분포는 실험결과와 대체로 유사한 경향을 확인할 수 있다. 하지만 추진기 허브 근처인 r/R이 0.3이하는 대체적으로 모형 시험결과와 다소 차이를 보이고 있는데, 앞서 언급한 것과 마찬가지로 Fluent 계산의 경우 낮은 속도 영역을 제대로 시뮬레이션하지 못한 것에 기인하기 때문이라 생각된다 (Kim & Kim, 2006). 다만, z/L=-0.015에서 폭 방향으로 멀어질수록 실험결과와 차이를 보이는 데 이는 폭 방향으로 멀어질수록 격자가 성기게 생성된 것이 원인이라 생각되고 격자를 좀 더 조밀하게 생성한다면 해결될 것으로 보인다. Fig. 4는 St.1에서의 축방향 속도 분포와 속도 벡터를 나타낸 것이다. 선체 중앙 횡단면에 비해 더욱 오목해진 선체의 측면을 따라 회전하는 성분이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 밀지 보오텍스가 형성되는 과정으로서 회전하는 유동에 의해 경계층 안에 존재하는 운동량이 적은 유체가 매우 낮은 속도를 가지며 모이게 됨을 알 수 있다 (Van, et al., 2003). 이러한 밀지 보오텍스는 추진기가 존재하는 추진기면에서 더욱 확실히 볼 수 있다. 모형선이 커질수록 즉, 레이놀즈수가 커질수록 경계층이 얇아지는 것을 볼 수 있고 밀지 보오텍스의 강도가 약해지는 것을 함께 도시한 접선벡터로부터 알 수 있다. Fig. 5는 다른 축척비를 가지는 상사모형선들의 추진기면에서의 축방향 속도 성분 분포를 도시한 것이다. 모형선의 크기

가 커질수록 추진기 축 위치의 낮은 속도 영역이 줄어들고 빌지 보조텍스에 의해 생성되는 갈고리 모양의 축방향 속도 성분 분포가 완만해 지는 것을 확인할 수 있다. 특히 1/103 크기의 모형의 경우 갈고리 모양이 아닌 넓은 영역에서 낮은 속도 영역이 확인되는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈 수가 상대적으로 낮기 때문에 수치시뮬레이션이 어려운 것으로 생각되며 격자계의 수 증가와 낮은 레이놀즈 수 영역에서의 계산을 수행할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 선체 주위 유동은 선미로 갈수록 오목한 선형으로 인해 역압력 구배가 생기게 되고 (Van, et al., 2003) 유동이 선체를 따라 흐르지 못하고 떨어져 나가 추진면에서 갈고리 모양의 축방향 속도 분포를 나타내게 된다. 그리고 모형선의 크기가 커질수록 레이놀즈 수가 커지게 되므로 점성 경계층이 얇아지게 되고 빌지 보조텍스의 강도가 약해지는 것을 볼 수 있다.

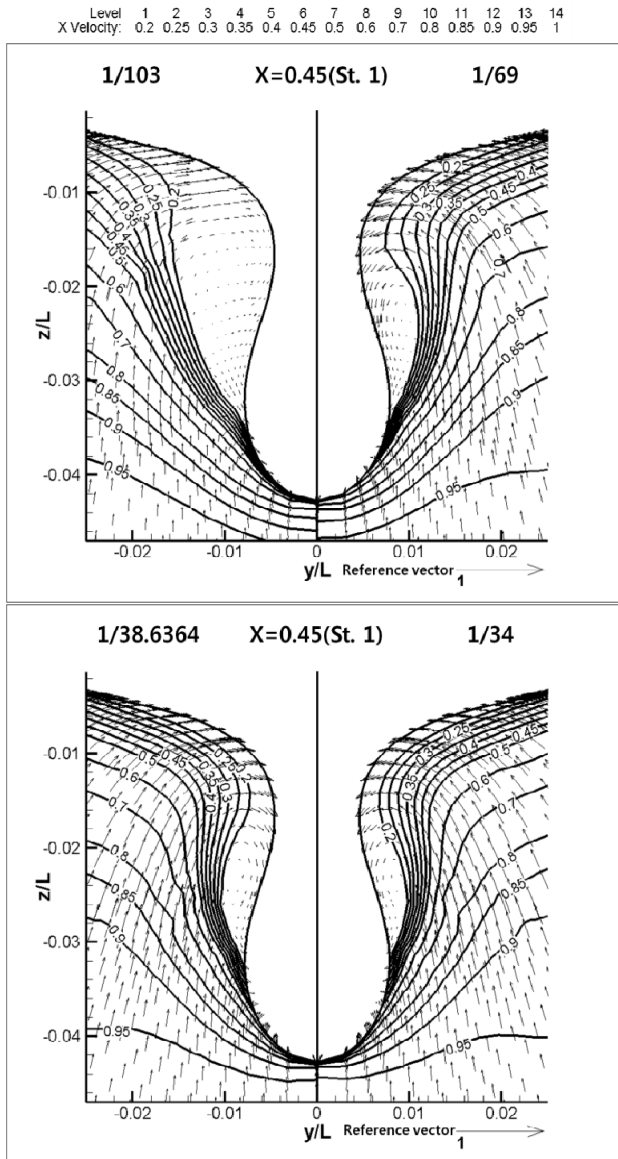


Fig. 4 Axial velocity and velocity vector on the X=0.45 plane

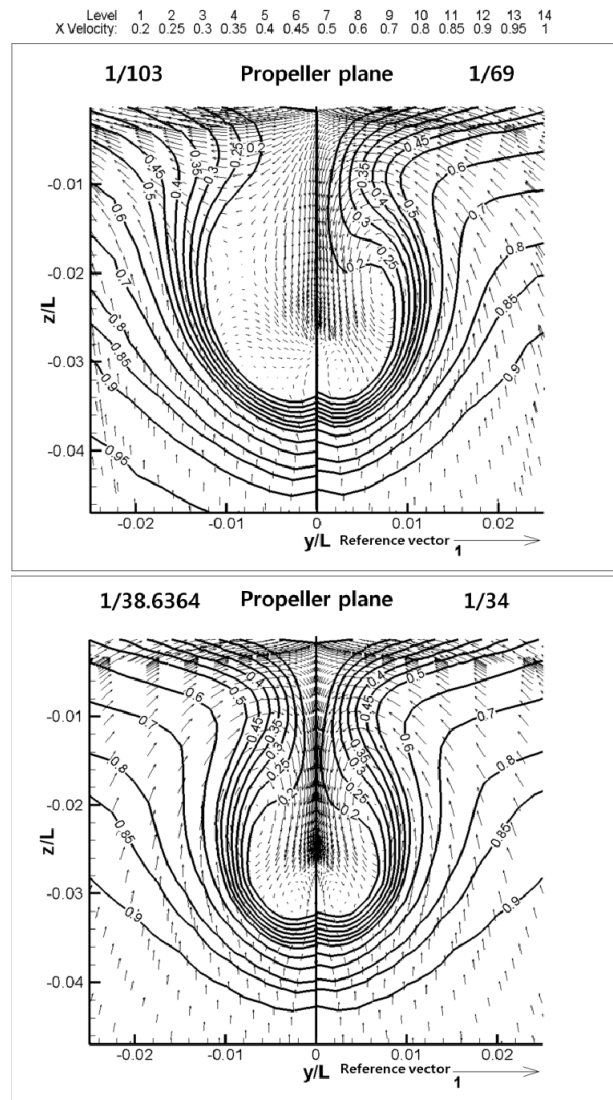


Fig. 5 Axial velocity and velocity vector on the propeller plane

Fig. 6은 상사모형선들의 선체 표면에서 한계 유선(limiting-streamline)을 나타낸 것이다. 먼저, 1/103 크기의 모형선에 대한 결과를 보면 한계 유선이 선미부로 가면서 선미 하단부의 선미벌브쪽으로 비교적 심하게 꺾여 내려가는 것을 볼 수 있고 심지어 역류까지 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 추진기 축 위치 아래 부분에 한계 유선들의 특이점이 발생하는 것을 볼 수 있다.

1/69, 1/38.6364와 1/34 크기의 모형선에 대한 계산 결과를 보면, 마찬가지로 선미부로 갈수록 한계 유선들이 선미 하단부의 선미벌브쪽으로 꺾이는 것을 볼 수 있는데 1/103크기의 모형선에 대한 결과와 비교했을 때 꺾이는 정도가 비교적 완만하며 역류는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있고, 추진기 축 위치 하단부에 발생하는 특이점도 약해진 것을 볼 수 있다. 1/69, 1/38.6364와 1/34 크기의 모형선들에 대한 결과를 서로 비교해 보면, 한계 유선의 흐름이 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있다.

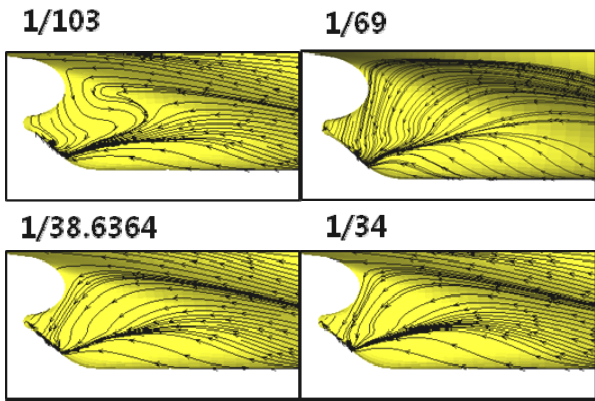


Fig. 6 Comparison of limiting-streamline on the hull surface at different scale ratio

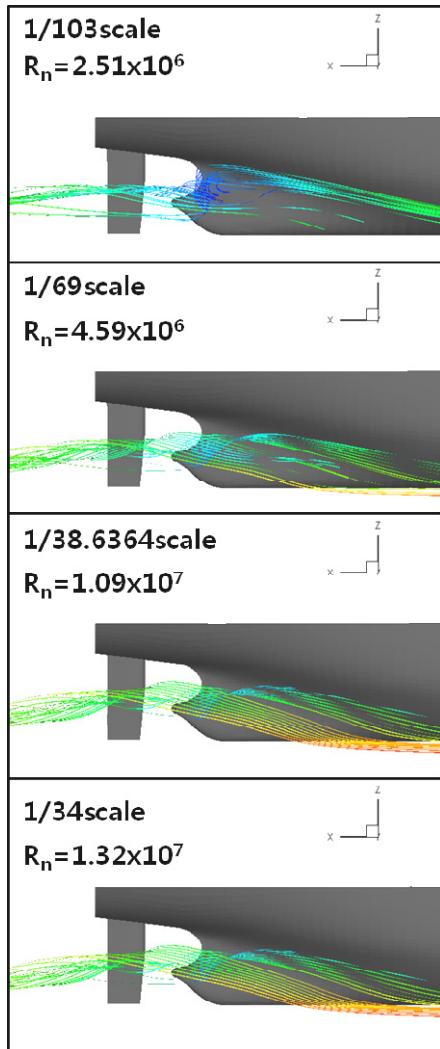


Fig. 7 Stream-ribbon around the KLNG hull

이러한 유선의 흐름을 확인하기 위해 Fig. 7에 선미부 근처에서의 Stream-ribbon을 나타내었다. 한계 유선으로 확인했듯이 1/103크기의 모형선 선미부에서 역류가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 1/69, 1/38.6364와 1/34 크기의 모형선 주위에

서는 역류가 발생하지 않았고 유동 흐름 또한 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 다만, 레이놀즈 수가 커질수록 선저부에서의 유속이 빨라지는 것을 확인할 수 있는데 이는 경계층이 얇아지기 때문이라 생각된다. Fig. 8은 MOERI에서 수행된 파형계측결과와 상사모형선들의 계산 결과를 비교하였다. 선수 선미 일부를 제외하고 정성적으로 유사한 결과를 보여준다. Table 3에 상사모형선들에 대한 계산 결과를 인하대학교 선형시험수조에서 수행된 모형시험 결과와 비교해 보았다. 모형 시험결과와 오차 5% 이내로 비교적 유사한 결과를 보여준다.

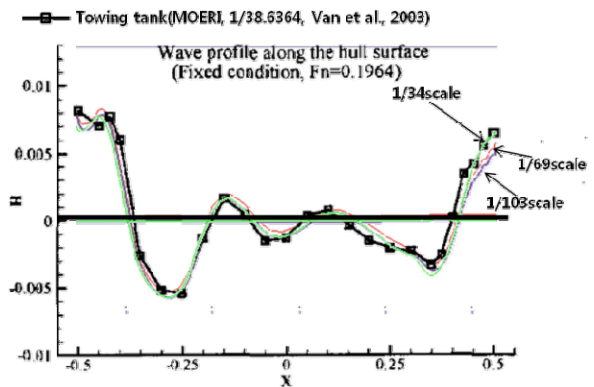


Fig. 8 Wave profile around the KLNG hull

Table 3 Comparison of resistance coefficients

Scale ratio	Exp. C_{TM} ($\times 10^{-3}$)	CFD C_{TM} ($\times 10^{-3}$)
1/103	5.179	5.411
1/69	4.393	4.312
1/34	3.747	3.673

3.2 상사모형선과 실선에 대한 계산결과 비교

레이놀즈 수에 의한 축척효과의 영향으로 인하여 실제 선박 주위의 유동은 모형시험과 차이가 있게 된다. 이와 같이 모형선과 실선의 축척효과의 정도를 파악해 보고자 실제 크기의 KLNG 선형에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

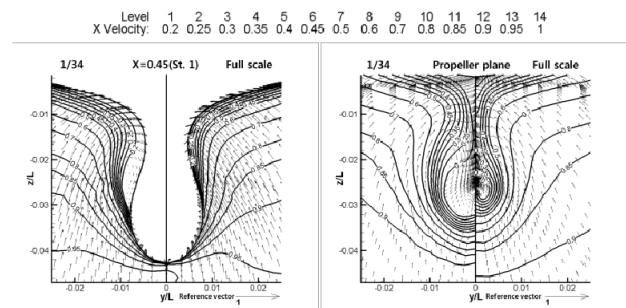


Fig. 9 Comparison of wake field between 1/34 scale model and full-scale

3가지 y_1^+ 에 따른 실선 수치 계산 결과 중 비교적 벽함수를 만족하고 있다고 판단되는 $y_1^+=1500$ 의 실선에 대한 계산 결과를 상사모형선 계산 결과들과 비교하였다. 다만, 실선 크기의 수치 계산 결과에서 유속이 1에 가까워 질수록 모형선에서의 결과들과 달리 등속선 간격이 넓어지고 있는데, 이는 현재 사용된 격자의 수가 실선 크기의 계산에 필요한 적정 격자 수보다 적기 때문이라 생각된다. Fig. 9는 St.1과 St.0.421의 축방향 속도 성분을 표현한 것으로 모형선들 중 가장 레이놀즈 수가 큰 1/34 크기의 모형선에서 발생하는 빌지 보오텍스가 실선계산에서는 발견되지 않는 것을 볼 수 있다. 계산 결과들을 보면, 레이놀즈 수가 커질수록 빌지 보오텍스에 의한 갈고리 모양이 약해지고 실선 크기에 이르러서는 거의 사라지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 경계층이 점차 얇아지고 반류 분포 중심면에 보이는 낮은 유속 부분의 범위가 점차 좁아지게 된다. 상사모형선들과 실선에 대한 선체 표면에서의 한계 유선을 Fig. 10에서 보여주고 있다. 실선 계산을 보면, 한계 유선들이 선미 하부로 완만하게 꺾여 내려가고 있고 모형선의 결과들에 비해 유선들이 밀집되는 경향이 약하다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 전체적인 한계 유선의 패턴은 비교적 유사한 것을 확인할 수 있다.

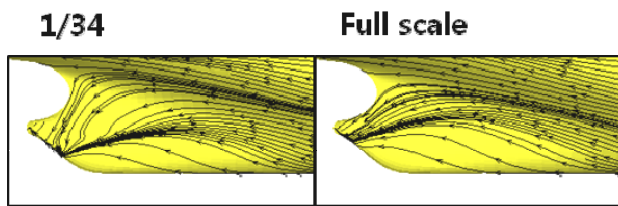


Fig. 10 Comparison of limiting-streamline on the hull surface between 1/34 scale model and full-scale

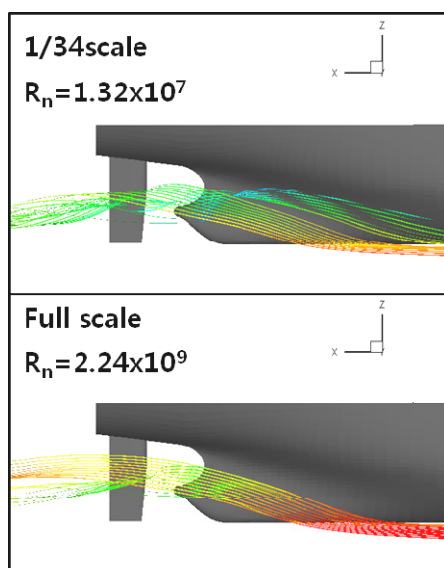


Fig. 11 Stream-ribbon around the KLNG hull

Fig. 11과 같이 Stream-ribbon을 보면, 실선 계산에서는 선

미부 유동이 약간 교란되는 것을 볼 수 있지만 대체로 곧게 뻗어 나가는 것을 확인할 수 있다. 실선 크기에 대한 난류유동 계산은 경험이 충분하지 못하여 해석 방법이 정립되어 있지 않으므로 선체 표면에서의 벽함수를 적용하기 위한 y_1^+ 에 따른 유동장의 변화를 확인하여야 한다 (Yang, et al., 2010). y_1^+ 에 따른 수치 계산 결과를 Table 4에 정리하였다. 여기서 마찰저항계수 (C_f)는 선체 표면의 전단 응력을 선체의 길이방향으로 적분한 값이다. y_1^+ 가 작아짐에 따라 마찰저항계수가 줄어들고 전저항 역시 마찬가지로 줄어들며 수렴해 가는 것을 확인할 수 있다. 마찰저항계수가 ITTC1957 곡선보다는 ATTC 곡선이 평판의 마찰저항계수를 정확히 대변하고 있다고 판단되어 (Yang, et al., 2010) 수치 계산에서 얻어진 전단응력을 선체 길이 방향으로 적분한 마찰저항계수와 비교해 보면, 수치 계산에서 얻어진 마찰저항계수가 낮게 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 격자로 인해 선체 후미로 갈수록 유동장 계산의 정도가 떨어지게 되어 발생한 것으로 보인다.

Table 4 Comparison of frictional resistance coefficients at different y_1^+ (full scale)

y_1^+	$C_f (x 10^{-3})$	ATTC line	Diff. (%)
1500	1.343	1.389	3.312
3000	1.372	1.389	1.224
6000	1.381	1.389	0.576

3.3 실선의 반류 추정

실선의 직접적으로 계산하는 것은 모형선을 계산하는 것보다 많은 노력과 시간이 필요하다. 게다가 실선의 계산결과를 제대로 검증하기는 매우 어렵기 때문에 한계가 있는 것이 사실이다. 현재 유동해석 프로그램들은 모형선에 대하여 매우 만족할 만한 결과를 보여주고 있으므로 모형선 계산결과를 바탕으로 실선의 반류를 추정할 수 있다면 이러한 약점을 극복할 수 있을 것이라 생각된다. 실선 반류를 추정하는 기존의 방법은 일반적으로 모형시험에서 추력일치법을 사용하여 얻어진 모형선의 유효반류와 ITTC 방법에 의해 실선으로 확장한 유효반류의 비를 구하고, 이를 모형선의 유동해석을 통해 계산된 공칭반류에 곱하여 사용한다 (Dyne, 1980). 이러한 방법은 모형선 반류의 반경방향 분포는 같고 단지 값의 크기만을 줄여주어 실제 실선계산에서 얻어진 반류 분포와는 많은 차이가 있다. 상사모형선 계산에서 확인하였듯이 축척비가 커짐에 따라, 즉, 레이놀즈 수가 커짐에 따라 반류의 분포가 실선의 반류에 근접해 가는 것을 생각해 볼 때, 모형선의 반류분포로부터 실선의 반류분포를 추정할 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. Fig. 12는 몇 축척비에 대하여 추가 계산을 수행한 후 상사모형선의 각 r/R 에서의 공칭반류를 실선의 레이놀즈 수까지 외삽하여 실선의 공칭 반류를 추정하는 것을 보여주고 있다. 날개의 각 위치에서 레이놀즈 수가 커짐에 따라 공칭반류 값의 변화가 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 특히, r/R 이 0.5 ~

1.0은 빌지 보오텍스의 영향으로 인하여 그 기울기 변화가 매우 다른 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 유효반류의 비로 단지 크기만을 줄이는 기존 방법의 실선 반류추정이 실선의 반류분포와 차이가 발생하는 원인이라 생각한다. 따라서 레이놀즈 수 10^7 이하에서는 빌지 보오텍스로 인하여 추정이 어려울 것으로 생각되어 일반적으로 난류영역으로 생각되는 위치 즉, 레이놀즈 수 10^7 이상에서 실선 반류를 추정하여 보았다. 실선 반류추정방법은 ITTC 유효반류 추정방법을 참고하여 레이놀즈 수에 따른 마찰저항곡선의 계형과 비교적 유사한 계형을 가지는 합수형태를 이용하였다. 실선 계산을 통해 얻어진 각 r/R 에서의 축방향 속도 성분의 분포와 실선 반류분포를 추정한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 또한, Yang, et al. (2010)의 실선계산 결과 그리고 Yang, et al. (2010)에서 Dyne의 방법을 이용한 추정결과를 서로 비교하였다. Yang, et al. (2010)은 KLNG선형의 설계수선면에 대칭조건을 부여한 이중모형으로 계산을 수행하였으며, 타 장치는 부착되지 않은 상태이다.

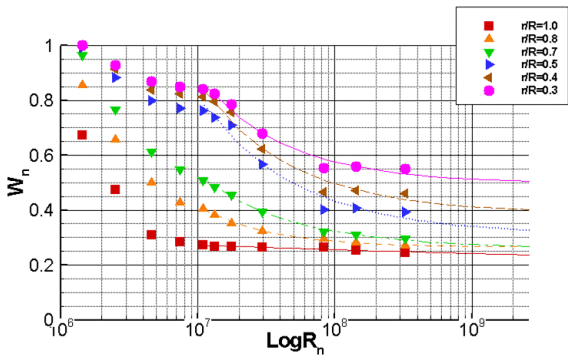


Fig. 12 Prediction of nominal wake at the r/R

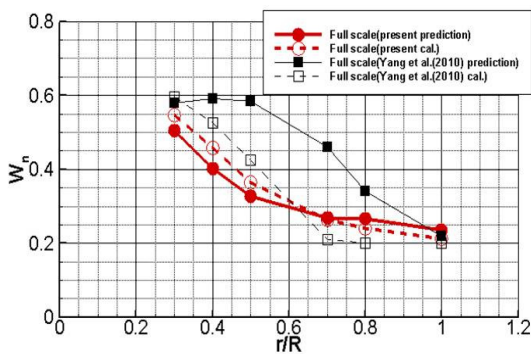


Fig. 13 Comparison of nominal wake at the r/R

본 연구의 실선계산 결과와 Yang, et al. (2010)의 실선계산 결과를 비교해 보면, 계산결과가 조금 다르긴 하지만 비교적 유사한 공칭반류 분포를 보이는 반면, 모형선 계산 결과를 토대로 추정된 실선의 공칭반류 분포는 그 경향이 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 한편 모형선 반류를 이용하여 실선 반류를 추정할 결과를 보면, 그래프의 형상이 실선계산 결과들과 일치하지 않지만, 기존의 추정방법에 비해 r/R 전 구간에서 실선 반류분포 곡선과

의 차이가 확연히 줄어들었음을 볼 수 있고 비교적 실선계산의 공칭반류에 근접하는 것을 확인할 수 있다. 추진기의 최대 추력이 이 구간 사이에서 발생하고 추진기 설계 시 기초 자료로 활용된다는 사실로 볼 때, 기존의 추정 방법에 비해 비교적 정도 높은 추정 방법이라 판단된다. 실선 반류분포 추정 결과가 실선 계산 결과의 그래프와 조금 그 차이를 보이고 있는데, 이는 레이놀즈 수 10^7 이상에서도 모형선 계산에서 발생하는 빌지 보오텍스의 영향이 포함되어진 것으로 보이고 실선의 반류를 추정하기 위해 사용되는 상사모형선 계산결과의 수가 더 많아지고 실선의 빌지 보오텍스 추정 방법 등이 좀 더 연구된다면 모형선 계산 결과로부터 실선계산과 유사한 반류 분포곡선을 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

4. 결론

본 연구는 모형 시험에서의 축척효과의 확인 및 그 정도를 파악하기 위해 수치 시뮬레이션을 활용해 축척비가 다른 상사모형선 주위의 유동장을 비교하였다. 또한, 실선 크기에 대한 수치 계산을 함께 수행하여, 모형선과 실선의 유동 특성에 대해서도 파악해 보았다. 상사모형선들의 유동 특성에 대해 비교하여 보면, 레이놀즈 수가 커질수록 빌지 보오텍스의 영향이 줄어들어 선미부에서의 유동이 선미 하단으로 꺾여서 흐르는 경향이 줄어들고 추진기면에서의 갈고리 모양을 가지는 축방향 속도 분포도 점차 사라지게 된다. 상사모형선과 실선의 한계 유선과 stream-ribbon 등을 비교해 보면 1/69크기의 모형선 이상에서는 비교적 유사한 경향을 띠는 것을 확인할 수 있다. 실선계산의 경우, 보다 정도 높은 시뮬레이션을 하기 위해 $y_1^+ = 1000$ 이하에서의 계산과 매우 조밀한 격자 생성이 요구되는 것을 알 수 있었다. 모형선과 실선 주위 유동은 서로 다르지만, 레이놀즈 수 3.14×10^6 이상에서는 선미부에서의 유동이 비교적 유사하고, 레이놀즈 수 3.14×10^6 이하일 때에는 그 경향이 다르므로 수치해석을 활용한 저항 성능 또는 추진 성능을 추정할 시 프루드 수만이 아니라 레이놀즈 수도 고려하여 연구를 수행할 필요가 있다고 생각된다. 또한, 상사모형선의 수치해석 결과들을 이용해 실선의 반류를 추정해 보았다. 실선 주위의 유동장 계측 자료를 구하기 매우 어렵기 때문에 상사모형선 계산 결과를 바탕으로 정성적 비교를 수행하였고, 실선에 대한 수치해석 결과가 실제 실선의 유동장과 정성적으로 유사할 것이라 생각하고 유효반류 비를 이용한 실선의 반류 추정방법은 그 경향이 실선 계산 결과와 서로 근접하지 않는 것을 확인하였다. 이것을 개선하기 위해 각 r/R 위치에서의 상사모형선 계산결과를 외삽하여 실선반류를 추정하였고 실선계산결과와 비교해 보았을 때, 비교적 유사한 경향을 보이고 있는 것을 확인하였다. 실선 반류를 추정할 때 모형선의 빌지 보오텍스로 인한 반류 분포의 영향이 반영되면서 추진기 허브근처에서의 공칭반류가 실선 계산결과와 차이를 보이고 있는데 이는 빌지 보오텍스의 추정 방법에 대해 연구 된다면 해결될 것으로 보인다. 실선의 계산결

과를 검증하기는 매우 어렵기 때문에 비교적 만족할 만한 결과를 보여주는 모형선의 계산결과들로부터 실선반류를 추정하는 방법의 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 '고정도 예인시험 시스템 구축'(과제번호: 10033777)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Anthony F. M. Stephen R. T. & Dominic A. H., 2011. *Ship Resistance and Propulsion*. Cambridge university press: Cambridge.

Choi, J.E. Kim, J.H. & Lee, H.G., 2011. Computational Study of the Scale Effect on Resistance and Propulsion Performance of VLCC. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.222-232.

Choi, J.K. & Kim, H.T., 2010. A Study of using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.647-655.

Dyne, G., 1980. A Note on the Design of Wake Adapted Propellers. *Journal of Ship Research*, 24(4), pp.227-231.

Garcia-Gomez, A., 2000. On the Form Factor Scale Effect. *Ocean Engineering*, 27, pp.97-109

Kim, H.T. & Kim, H.T., 2006. Research of Elements Giving Effects on the Numerical Analysis for the LNG Carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(6), pp.656-666.

Kim, J. Park, I.R. Kim, K.S. Van, S.H. & Kim, Y.C., 2011. Development of a Numerical Method for the Evaluation of Ship Resistance and Self-Propulsion Performances. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.147-157.

Park, Y.J. Kim, E.C. & Lee, C.J., 1994. A Study on the Model-Ship Correlation Analysis of Powering Performance. *Transcations of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(1), pp.32-41.

Van, S.H. Yoon, H.S. Lee, Y.Y. Park, I.R. Lee, C.J. & Kim, W.J., 2003. Measurement of Flow around KRISO 138K LNG Carrier Model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(2), pp.1-10.

Yang, H. Kim, B. N. Yoo, J. & Kim, W. J., 2010. Wake Comparison between Model and Full Scale Ships Using CFD. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.150-162.



하윤진

이영길

강봉한