

## CFD를 이용한 모형선과 실선 스케일의 반류 비교

양해욱\*, 김병남\*\*, 유재훈\*, 김우전†\*

목포대학교 기계조선해양공학부 해양시스템공학전공\*  
중소조선연구원\*\*

Wake Comparison between Model and Full Scale Ships Using CFD

Haeuk Yang\*, Byoung-Nam Kim\*\*, Jaehoon Yoo\* and Wu-Joan Kim†\*

Department of Ocean Engineering, Mokpo National University\*  
Research Institute of Medium & Small Shipbuilding\*\*

### Abstract

Assessment of hydrodynamic performance of a ship hull has been focused on a model ship rather than a full-scale ship. In order to design the propeller of a ship, model-scale wake is often extended to full-scale based upon an empirical method or designer's experience, since wake measurement data for a full-scale ship is very rare. Recently modern CFD tools made some success in reproducing wake field of a model ship, which implicates that there are some possibilities of the accurate prediction of full-scale wakes. In this paper firstly the evaluation of model-scale wake obtained by Fluent package was performed. It was found that CFD calculation with the Reynolds-stress model (RSM) provided much better agreement with wake measurement in the towing tank than with the realizable  $k-\epsilon$  model (RKE). In the next full-scale wake was calculated using the same package to find out the difference between model and full-scale wakes. Three hull forms of KLNG, KCS, KVLCC2 having measurement data open for the public, were chosen for the comparison of resistance, form factor, and propeller plane wake between model ships and full-scale ships.

※Keywords: CFD(계산유체역학), Stern viscous boundary layer(선미 점성경계층), Wake(반류), Model ship (모형선), Full-scale ship(실선)

접수일: 2009년 10월 5일, 승인일: 2010년 3월 5일

†교신저자: kimwujoan@mokpo.ac.kr, 061-450-2766

## 1. 서언

최근 조선소의 선형설계 과정에서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술이 활발히 활용되고 있으나, 아직은 실선 레이놀즈 수(Reynolds number)에서의 계산보다는 모형선 스케일에 국한되고 있는 실정이다. 이러한 이유는 실선 스케일에 대한 난류 유동장 해석을 위한 모델링 방법이 완벽하게 정립되지 않았다는 것과 수치계산 결과의 검증에 필요한 실선 계측자료를 구하기 어렵기 때문이라고 할 수 있다.

일반적으로 모형선과 실선 주위에서의 유동현상은 비교적 점성 경계층이 얇은 선수부에서는 유사하나, 선미부에서는 레이놀즈 수의 차이에서 나타나는 점성 경계층의 두께 차이로 말미암아 압력, 반류분포, 선미파 등에서 차이를 보이게 된다. 최종적으로 좋은 저항추진 성능을 가지는 선박, 특히 반류분포의 특성에 따른 우수한 추진성능을 가지는 선형을 설계하기 위해서는 실선 스케일에서의 유동현상에 대한 좀 더 정확한 해석이 필요하다. 최근에 높은 레이놀즈 수에서 벽함수 사용의 문제점을 분석하여 축대칭 주위 유동이나 평판 경계층 유동에 대한 점성 유동장 계산 방법을 개선하기 위한 연구(Choi 2009)가 수행된 적은 있으나, 위에 언급한 이유로 실선에 대한 CFD 계산결과를 선형설계에 직접 반영하지는 못하고 있는 형편이다.

현재 널리 사용되고 있는 상용 CFD 프로그램들이 모형선 스케일과 같은  $10^7$  정도의 비교적 낮은 레이놀즈 수에서 점성적으로나 정량적으로 모형시험 결과와 비교적 유사한 결과를 주고 있는 것으로 알려져 있다. 이를 근거로 본 연구에서는 실선 스케일에 해당하는 높은 레이놀즈 수에서 수치계산을 수행하여 실선의 유동 현상을 모형선 스케일에서의 유동장 해석결과와 비교 분석해 보았다. 수치계산 대상선형으로는 모형시험 결과가 공개되어 있는 KRISO 138K LNG carrier(KLNG), KRISO 3600TEU container ship(KCS), KRISO 300K VLCC(KVLCC2)를 선정 하였다. 각 선형에 대한 수치계산 조건은  $L_{pp}$ 를 기준으로 했을 때, 각 선형의 설계속도에 해당하는 Froude number(Fn)는 0.1964(KLNG), 0.26(KCS), 0.1423(KVLCC2)이며,

Reynolds number(Re)는 모형선 크기에 해당하는  $0.93 \times 10^7$ (KLNG),  $1.4 \times 10^7$ (KCS),  $0.46 \times 10^7$ (KVLCC2)와 실선 크기에 해당하는  $2.24 \times 10^9$ (KLNG),  $2.58 \times 10^9$ (KCS),  $2.13 \times 10^9$ (KVLCC2)에 대해 수치계산을 수행하였다. 그리고 난류 모형에 따른 저항계수와 반류분포의 차이를 파악하기 위해 비교적 사용빈도가 높은 Realizable k- $\epsilon$  model(이하 RKE)과 Reynolds-stress model(이하 RSM)을 사용하였다.

실선 계산의 경우, 모형선과는 달리 격자계 분포의 적정성이 검증되지 못했기 때문에 격자계 민감도를 확인하기 위해 KLNG선에 대하여 첫 번째 격자 중심에서의  $y^+(u, y/\nu, \text{이하 } y_1^+)$  분포 5가지에 대하여 RSM을 사용한 수치계산을 수행하여 저항계수 및 프로펠러 면에서의 반류 분포에 대한 영향을 조사하였다. 유동해석은 수치계산의 편의성을 위해 자유수면의 효과를 배제하고 이중모형(double body)에 대하여 수행하였다. 사용된 프로그램은 Fluent 6.3.26이며, WINDOWS PC CPU 2개를 활용하여 계산을 수행하였다.

## 2. 점성유동장 해석기법

본 연구에서는 Fluent 6.3.26 package를 사용하여 수치계산을 수행하였다. 난류유동의 지배방정식은 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식과 연속방정식이며, 난류모형에 따른 계산결과 차이를 비교하기 위하여 그동안 선박의 반류 추정을 위해 흔히 사용되었던 Realizable k- $\epsilon$  model

Table 1 Key features of CFD systems

CFD program	Fluent 6.3.26
Governing equation	Incompressible RANS Eqn.
Discretization	Cell centered FVM (Unstructured Grids)
Turbulence model	Reynolds Stress model (Linear Pressure-Strain) Realizable k- $\epsilon$ model
Wall function	Non-Equilibrium
Convection term	QUICK
Diffusion term	Central Difference Scheme
Velocity-pressure coupling	SIMPLEC Algorithm

(RKE)과 고차의 Reynolds stress model(RSM)을 사용하였다. 수치계산에 사용된 점성유동장 해석법은 Table 1에 정리하였다.

### 3. 모형선 제원 및 계산조건

실선과 모형선 스케일에서의 유동현상 차이를 파악하기 위하여 모형선에 대한 계측 결과가 공개되어 있으며, 방형 비척계수( $C_B$ )에서 뚜렷한 차이를 보이는 대표적인 선형으로서 138K LNG carrier (KLNG), 3600TEU container ship(KCS), 300K VLCC2(KVLCC2) 등 세 척을 대상 선형으로 선정하였다(Van et al. 2000, Kim et al. 2000, Van et al. 2003). 각 선박에 대한 정면도와 주요목을 Fig. 1~3과 Table 2~4에 각각 수록하였다.

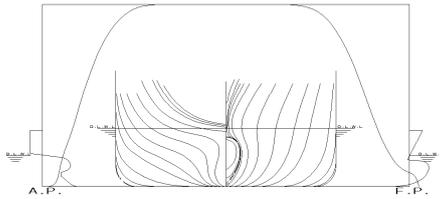


Fig. 1 Body plan of KLNG

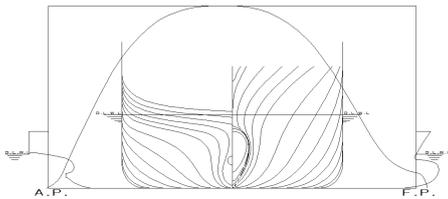


Fig. 2 Body plan of KCS

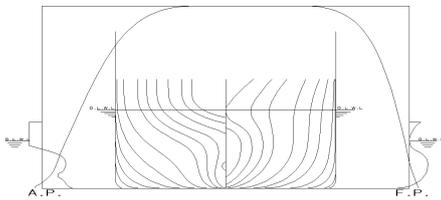


Fig. 3 Body plan of KVLCC2

Table 2 Principal particulars of KLNG

KLNG	Prototype	Model
Scale ratio	1	1/38.6364
$L_{PP}$ (m)	266	6.8847
B (m)	42.6	1.1026
T (m)	11.3	0.2925
Speed (m/s)	10.0317 (19.5kts)	1.6139
$C_B$	0.7493	
Froude No. (Fn)	0.1964	
Reynolds No. (Re)	$2.24 \times 10^9$	$0.933 \times 10^7$

Table 3 Principal particulars of KCS

KCS	Prototype	Model
Scale ratio	1	1/31.5994
$L_{PP}$ (m)	230	7.2786
B (m)	32.2	1.0190
T (m)	10.8	0.3418
Speed (m/s)	12.3466 (24 kts)	2.1962
$C_B$	0.6505	
Froude No. (Fn)	0.26	
Reynolds No. (Re)	$2.58 \times 10^9$	$1.4 \times 10^7$

Table 4 Principal particulars of KVLCC2

KVLCC2	Prototype	Model
Scale ratio	1	1/58.0
$L_{PP}$ (m)	320	5.5172
B (m)	58.0	1.0
T (m)	20.8	0.3586
Speed (m/s)	7.9732 (15.5kts)	1.047
$C_B$	0.8254	
Froude No. (Fn)	0.1423	
Reynolds No. (Re)	$2.13 \times 10^9$	$0.46 \times 10^7$

수치계산을 위해 사용된 경계조건을 살펴보면, 선체 표면에서는 경계면의 속도가 0이므로 그 경계면을 통한 대류항의 기여는 없고 단지 벽 전단응력으로 인한 접선방향의 점성효과(즉, viscous flux)만 고려하였고, 유입면은 균일속도 조건( $U=1, V=W=0$ )을, 유출면은 압력 경계조건을, 수직 중심면과 자유수면에는 대칭조건을 부여하였으며, 바깥 경계면은 균일류 조건을 사용하였다.

### 4. 격자 생성

수치계산을 위한 격자계는 Gridgen package를 사용하여 O-H 형태로 생성하였다. 계산영역은 상류방향에 대해서는 F.P.로부터 1.0  $L_{pp}$ , 하류 방향은 A.P.로부터 1.0  $L_{pp}$ , 횡 방향 및 깊이 방향은 선체중심선으로부터 1.0  $L_{pp}$ 를 택하였다.

우선 실선에서  $y_1^+$  변화에 의한 계산 결과를 비교하기 위하여 KLNG선의 격자수를 80만개 정도로 고정된 상태에서 다섯 가지  $y_1^+$  값 (1000, 2000, 4000, 6000, 8000)에 대하여 수치계산 결과로 얻어진 난류 유동장을 살펴보았다. 선체표면에 가장 가까운 격자 중심에서의  $y_1^+$  값을 Table 5에 나타내었다. 최소  $y_1^+$ 를 1000으로 선택한 이유는 1000 이하로 격자를 생성할 경우 격자의 세장비(aspect ratio)가 너무 커져 좋은 격자계를 생성할 수 없었을 뿐만 아니라 실선 스케일에서 수치계산의 효율성이 떨어지기 때문이다. 최대  $y_1^+$ 를 8000으로 선택한 이유는 현재까지 알려진 가장 높은 레이놀즈 수에서 유동장을 예측한 슈퍼파이프의 실험결과(Patel 1998)에서 확인된 바와 같이, 레이놀즈 수가 증가할수록 벽함수를 만족하는  $y_1^+$ 의 범위가 증가하여 실선 스케일인  $10^9$ 인 경우  $y_1^+=10000$ 까지 벽함수를 만족할 것이라 생각되었기 때문이다.

실선 스케일에서의 벽함수 법칙(logarithmic law of the wall)을 만족하는  $y_1^+$  범위를 검증하기 위해 앞서 언급한 슈퍼파이프 실험결과 중  $Re$ 가 가장 큰 35,259,000에 대하여 수치계산을 수행하여 계산 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 로그 영역의 기울기( $1/k$ )가 일치하는  $y_1^+$  범위는 5000까지로 보이며, 10000에서는 마찰응력이 크게 추정되어 기울기가 조금 차이나는 것으로 보인다. 또한 로그영역의 기울기( $1/k$ ) 확인을 위한 그림(Fig. 5)에서도 같은 결과를 보여주고 있다.

위와 같은 높은 레이놀즈 수에 대한 수치계산 검증은 바탕으로 KLNG선의  $y_1^+$  값을 변화시켜 계산한 결과에서 반류비교에 대한 좋은 결과를 보여준 1000을 KCS와 KVLCC2에 적용하여 실선 계산용 격자계를 생성하였다. 한편 모형선 스케일에서 유동계산을 수행하기 위해서는 그동안의 경험을 바

탕으로  $y_1^+$ 를 80으로 고정(Kim and Kim 2006, Kim et al. 2009)하여 실선과 동일한 격자수로 격자계를 생성하였다. Fig. 6은 실선 스케일의 유동장 해석을 위한 KLNG선의 격자계를 보이고 있다.

Table 5 Grid numbers and  $y_1^+$  for KLNG

$y_1^+$ (KLNG)		
Grid A (Model)	Grid B (Prototype)	Grid C (Prototype)
80	1,000	2,000
Grid D (Prototype)	Grid E (Prototype)	Grid F (Prototype)
4,000	6,000	8,000
axial×radial×girth		Total cell number
225×80×46		796,320

Table 6 Grid numbers and  $y_1^+$  for KCS

$y_1^+$ (KCS)	
Grid A (Model)	Grid B (Prototype)
80	1,000
axial×radial×girth	
225×80×46	
Total cell number	
796,320	

Table 7 Grid numbers and  $y_1^+$  for KVLCC2

$y_1^+$ (KVLCC2)	
Grid A (Model)	Grid B (Prototype)
80	1,000
axial×radial×girth	
240×60×65	
Total cell number	
924,808	

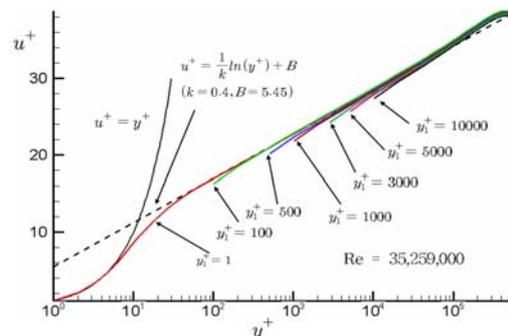


Fig. 4 Calculated velocity profiles in super pipe flow according to  $y_1^+$

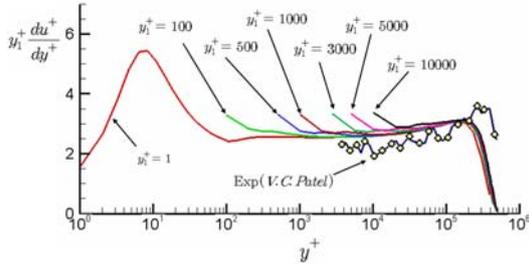


Fig. 5 Effect of  $y_1^+$  on the slope of the logarithmic law of the wall from the computed velocity profiles for super-pipe experiment

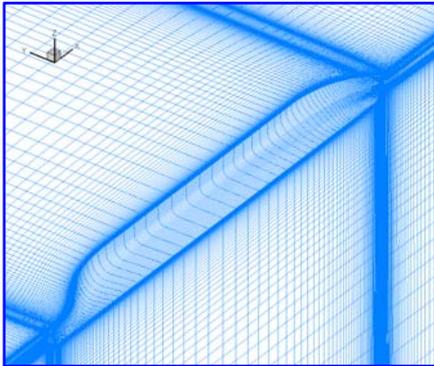


Fig. 6 Grids around KLNG(full scale)

### 5. 모형선 스케일의 수치계산과 모형시험 결과 비교

실선에 대해서는 계측자료를 구할 수가 없으므로 모형선 스케일의 수치계산과 모형시험 결과를 비교하여 CFD 유동해석 결과의 신뢰성을 확인하고자 하였다. 세 척의 대상 선형에 대해 각각 수치계산과 모형시험의 결과로 얻은 추진기면에서의 난류 분포를 비교 하였다. 앞서 설명한대로 자유수면을 포함하지 않은 이중모형으로 계산을 수행하였으며, RKE와 RSM 난류모형을 각각 사용하였다.

Fig. 7를 보면 KLNG의 경우 Realizable k-ε 난류모형(RKE)을 사용한 수치계산 결과로 얻은 추진기면의 난류 분포는 빌지 보오텍스에 의한 축방향 속도성분의 분포로 나타나는 갈고리 모양(hook-like shape)이 약하게 계산된 반면, 좀 더

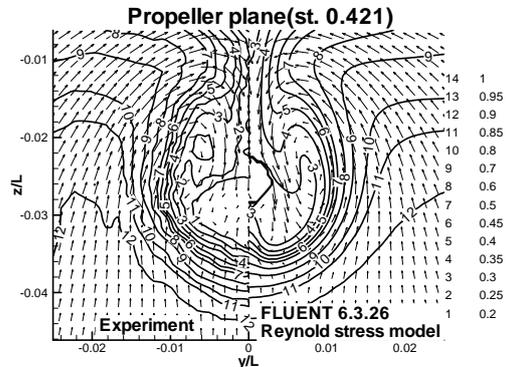
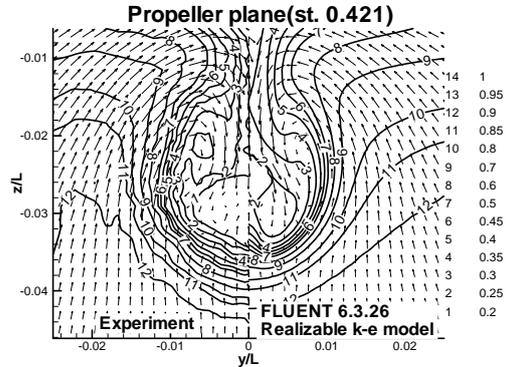


Fig. 7 Comparison of wake field using RKE and RSM turbulence model (KLNG)

고차의 난류모형인 Reynolds-stress model(RSM)로 수치계산을 수행한 결과에서는 보다 뚜렷한 갈고리 모양을 볼 수 있으며, 모형시험 결과와 상당한 일치성을 보이고 있다. 특히 RKE를 사용한 경우에는 전체적으로 경계층의 두께가 작게 추정되었음을 알 수 있으며, 전체적인 추진기면의 공칭난류 분포 또한 RSM을 사용하여 수행한 수치계산 결과가 모형 시험 결과와 좀 더 유사함을 알 수 있다.

KCS에 대해서 수행한 수치계산 결과를 도시한 Fig. 8을 보면 RKE의 경우 모형시험에 비해 0.8 이상의 난류 영역이 좀 더 좁게 보이나, RSM의 경우는 모형시험과 유사한 분포를 보이고 있다.

KVLCC2에 대하여 RKE와 RSM 난류모형을 사용하여 수치계산을 수행하여 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. RKE와 RSM 모두 모형시험과 상당한 일치를 보이고 있으나, RSM의 결과가 모형시험에 보다 가까운 것으로 판단된다. 특히 축방향 속도가

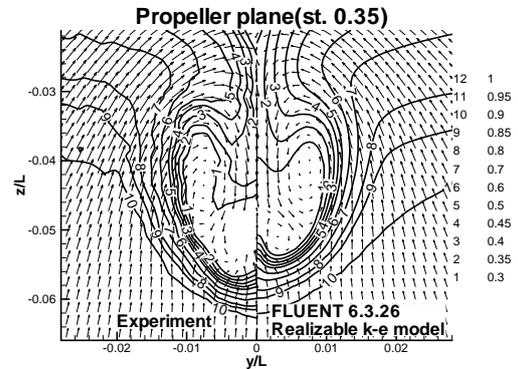
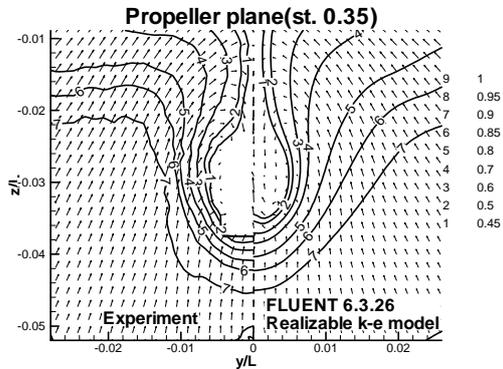


Fig. 8 Comparison of wake field using RKE and RSM turbulence model(KCS)

Fig. 9 Comparison of wake field using RKE and RSM turbulence model(KVLCC2)

0.3인 등속선의 모양을 보면 RKE의 경우 갈고리 모양의 깊이가 모형시험에 비하여 약하게 나타났으나, RSM을 사용한 계산 결과에서는 훨씬 강한 빌지 보오텍스가 모형시험 결과에 비슷한 곳에 위치해 있음을 확인 할 수 있다.

KLNG, KCS, 그리고 KVLCC2의 세 모형선에 대하여 RKE와 RSM 난류모형을 사용한 수치계산 결과를 종합해 본 결과, RSM를 사용한 경우에 빌지 보오텍스에 의한 축방향 속도의 갈고리 모양 등속선이 모형시험 결과를 훨씬 잘 재현하고 있으며, RKE를 사용한 경우에는 점성경계층의 두께가 얇게 추정되고 있음을 알 수 있었다. 모형선 스케일에서 수행한 수치계산 결과로부터 RSM 난류모형이 수치계산의 노력이 많이 필요하다는 약점이 있지만, 보다 정확한 난류분포를 제공함을 확인하였다.

### 6. 모형선과 실선 스케일에서의 유동장 비교

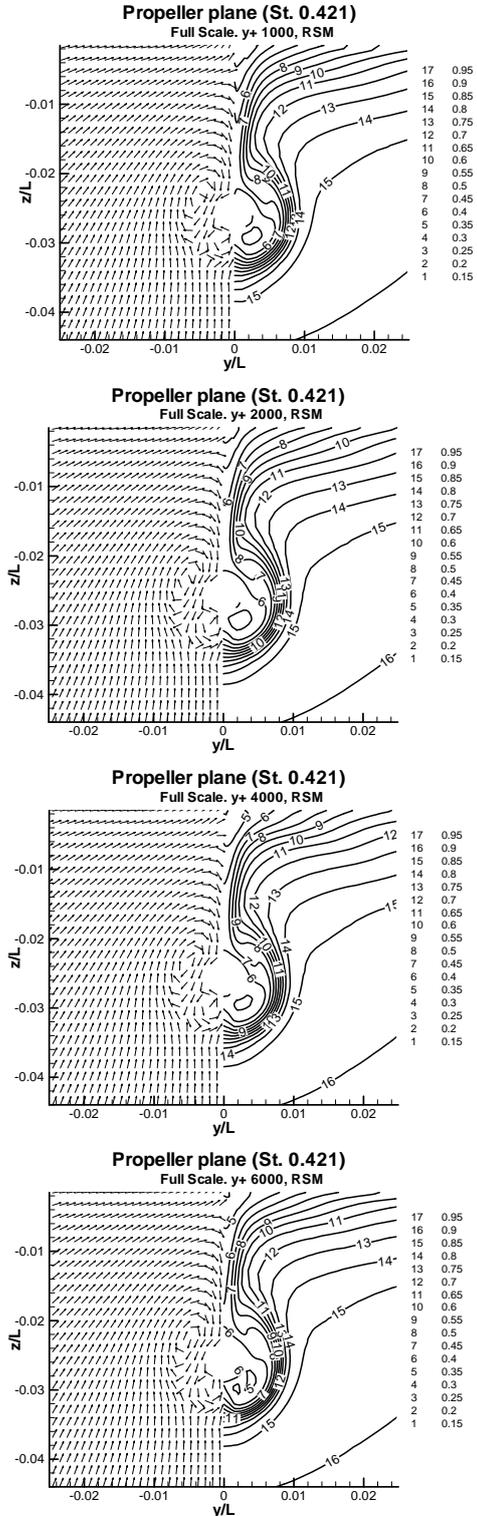
앞 절에서 살펴본 바와 같이 CFD 프로그램을 통한 모형선 스케일에서의 계산 결과가 모형시험과 유사한 결과를 주고 있음을 근거로 계산 조건을 실선 레이놀즈 수로 확장하여 KLNG, KCS, KVLCC2에 대하여 수치계산을 수행하였다. 실선 스케일에서의 난류유동 계산은 경험이 충분하지 못하여 선체 표면에서의 벽항수를 적용하기 위한 첫 번째 격자 위치 선정에 대한 검증이 필요하다. 본 절에서는 우선 KLNG에 대해서는 실선에서의  $y_1^+$  위치에 따른 영향을 조사하였으며, 이 결과를 바탕으로 KCS와 KVLCC2는 실선 스케일에서 계산한 결과를 모형선에 대한 계산 결과와 비교하였다.

6.1 KLNG의 유동계산 결과 비교

우선 Table 5에 제시된 바와 같이 KLNG 실선에 대하여 5 가지의  $y_1^+$  를 적용한 격자계에 대하여 수치계산을 수행한 후, 그 결과를 모형선에 대한 결과와 함께 비교하였다. Table 8은 수치계산 결과로 얻어진 마찰저항계수( $C_F$ ), 점성압력저항계수( $C_{VP}$ ), 그리고 마찰저항과 점성압력저항을 더한 점성저항계수( $C_v$ ) 값들을 비교한 것이다. 마찰저항의 경우, 모형선 크기에서 평면의 마찰저항 곡선을 변형하여 얻어진 ITTC1957 공식보다는 Schoenherr에 의해서 얻어진 ATTC 곡선이 평판의 마찰저항계수를 정확히 대변하고 있다고 판단되어 기준값으로 삼았다. 그리고 이를 바탕으로 점성압력저항계수와와의 비로서 형상계수(form factor)를 산정하였다. 모형선과 실선 모두에 대하여 RSM을 사용한 계산이 RKE를 사용한 경우보다는 ATTC 곡선과 가까운 결과를 보이고 있으며, RKE는 마찰저항계수와 점성압력저항계수를 모두 작게 추정하고 있다. 또한 실선 스케일에서 RSM을 사용하여 다른  $y_1^+$  에 대하여 수행한 결과를 비교해 보면  $y_1^+$  가 증가할수록 마찰저항 계수가 크게 추정되고 있는데, 이는 실제 벽함수를 적용하는 지점에 따라서 마찰응력의 산정에 약간씩 차이가 나타나기 때문으로 보인다.

Table 8 Resistance coefficients(KLNG)

Grid ( $y_1^+$ )	Scale (반류모형)	$C_F$ ( $\times 10^3$ )	$C_{VP}$ ( $\times 10^3$ )	$C_v$ ( $\times 10^3$ )	form factor
ATTC	Model	2.968	-	-	-
GridA (80)	Model (RKE)	2.797	0.582	3.379	0.208
GridA (80)	Model (RSM)	2.825	0.653	3.478	0.231
ATTC	Full	1.389	-	-	-
GridB (1,000)	Full (RKE)	1.295	0.253	1.548	0.195
GridB (1,000)	Full (RSM)	1.346	0.325	1.671	0.241
GridC (2,000)	Full (RSM)	1.361	0.336	1.697	0.247
GridD (4,000)	Full (RSM)	1.388	0.354	1.742	0.255
GridE (6,000)	Full (RSM)	1.398	0.356	1.754	0.255
GridF (8,000)	Full (RSM)	1.411	0.345	1.756	0.245



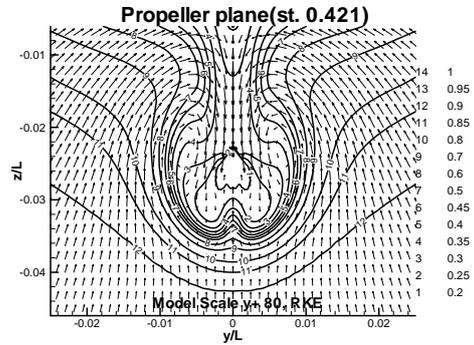
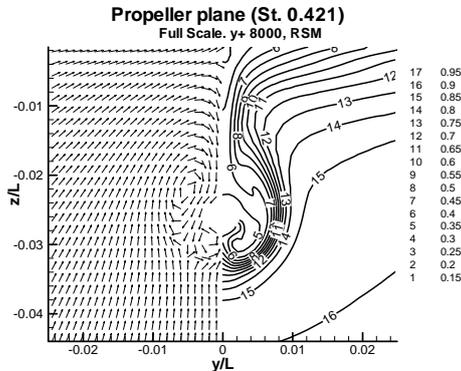


Fig. 10 Comparison of wake field with different  $y_1^+$  (KLNG, RSM)

RSM을 사용한 경우에 대하여  $y_1^+=1000, 2000, 4000, 6000, 8000$ 으로 변화시키면서 수행한 수치 계산 결과를 Fig. 10에 추진기 면에서의 축방향 속도분포와 횡방향 속도벡터로 나타내고 있다.  $y_1^+$ 가 변화하더라도 4000까지는 결과에 큰 차이를 보이고 있지 않다. 특히 축방향 속도가 0.45인 등속선에서 보이는 작은 갈고리 모양에서도 유사한 결과를 보이고 있다.  $y_1^+$ 가 6000인 경우에는 갈고리 모양의 위치가 약간 이동하였으며, 8000인 경우에는 갈고리 모양이 축방향 속도 0.4인 등속선에서 나타나고 있다. 이를 바탕으로  $y_1^+=4000$ 까지는 실선 스케일의 계산 결과가 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있었다.

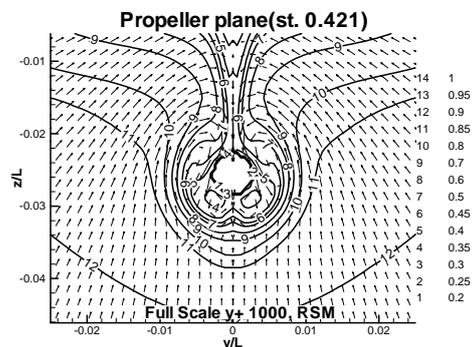
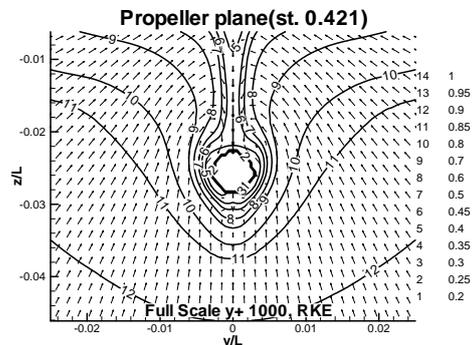
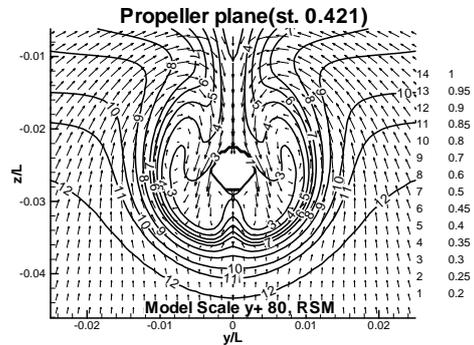


Fig. 11은 모형선 스케일과 실선 스케일의 추진기 면에서의 축방향 속도분포와 횡방향 속도벡터를 나타내고 있다. 실선 스케일의 경우 축방향 속도의 등속선이 모인 영역이 모형선 스케일에 비해 작게 형성됨을 알 수 있다. 이를 통해 실선의 경우 레이놀즈수가 커지면서 경계층이 얇아짐에 기인하여 종방향 속도성분이 급격히 변하는 영역이 좁아짐을 알 수 있다. 그리고 RSM으로 계산한 경우가 RKE으로 계산한 경우 보다 점성경계층의 두께가 두꺼우며, 갈고리 모양이 더 뚜렷하게 나타났다. 실선 스케일의 계산 결과에서는 모형선에 비하여 빌지 보호텍스가 약하게 형성되어 있으며, 경계층이 얇아진 이유로 보다 안쪽에 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11 Calculated wake field between full & model scales(KLNG, RKE/RSM)

Fig. 12는 실선 스케일과 모형선 스케일의 선체 표면 압력분포를 비교한 그림이다. 선수의 경우 미미한 차이를 보이거나 선미의 경우 압력분포에 큰 차이를 보이고 있다. 특히 중앙평행부에서 선미 쪽으로 폭이 좁아지는 발지 영역에서 실선 스케일에서는  $C_p = -0.2$ 의 등압선이 보이거나 모형선 스케일에서는 보이지 않고 있고 있으며, 선수부에 대해서는 전체적으로 큰 차이를 보이고 있다.

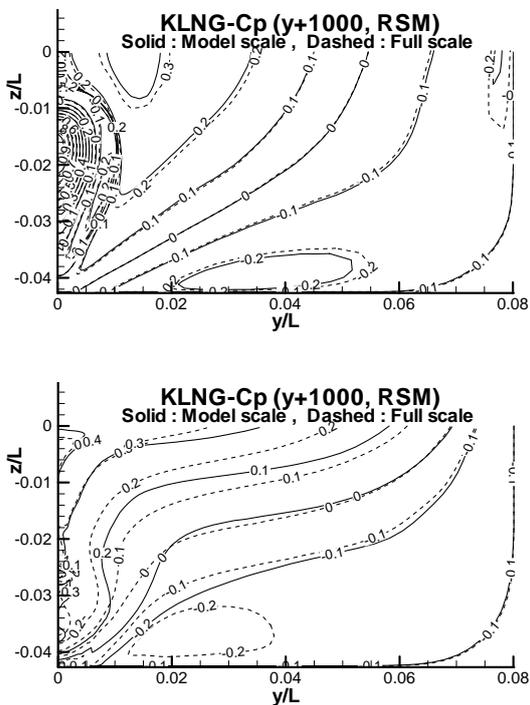


Fig. 12 Comparison of pressure distribution between model and full-scales of KLNG with RSM(top: bow, bottom: stern)

6.2 KCS의 유동계산 결과 비교

이번 절에서는 KCS에 대하여  $y_1^+ = 80$ (모형선),  $y_1^+ = 1000$ (실선)을 기준으로 생성된 격자계에서 난류유동 해석을 수행하였다. 먼저 RKE와 RSM을 사용하여 얻은 저항계수를 Table 9에 비교하였다. 앞 절에서 설명한 KLNG의 경우와 마찬가지로 RKE를 사용한 경우에는 마찰저항 및 점성압력저항이 작게 예측되고 있음을 알 수 있으며, 형상계수 또한 작게 추정되었다

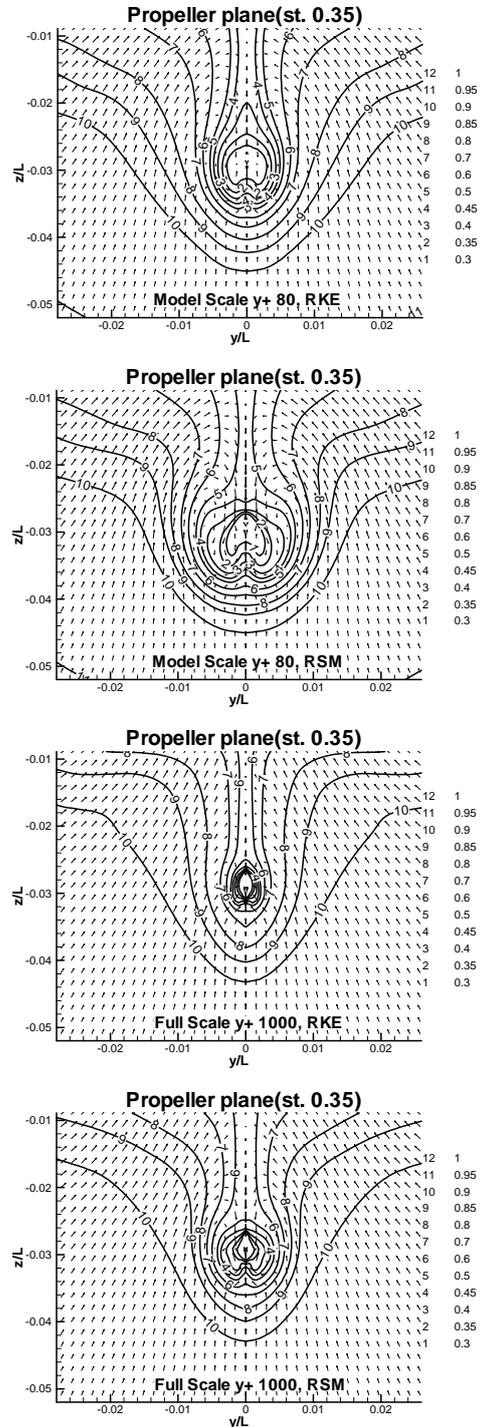
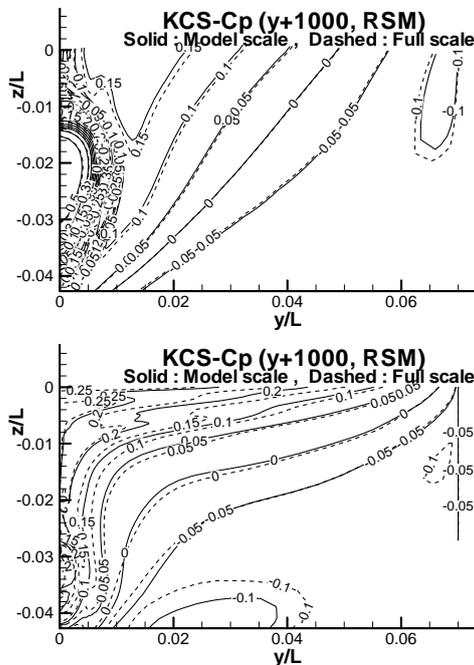


Fig. 13 Calculated wake field between full & model scales(KCS, RKE/RSM)

**Table 9** Resistance coefficients(KCS)

Grid ( $y_1^+$ )	Scale (난류모형)	$C_F$ ( $\times 10^3$ )	$C_{VP}$ ( $\times 10^3$ )	$C_V$ ( $\times 10^3$ )	form factor
ATTC	Model	2.760	-	-	-
GridA (80)	Model (RKE)	2.610	0.282	2.892	0.108
GridA (80)	Model (RSM)	2.632	0.305	2.937	0.116
ATTC	Full	1.366	-	-	-
GridB (1,000)	Full (RKE)	1.278	0.153	1.431	0.120
GridB (1,000)	Full (RSM)	1.324	0.169	1.494	0.128



**Fig. 14** Comparison of pressure distribution between model and full-scales of KCS with RSM(top: bow, bottom: stern)

Fig. 13은 KCS에 대한 모형선과 실선 스케일에서 추진기 면의 축방향 속도분포와 횡방향 속도벡터를 나타내고 있다. 모형선과 실선 스케일 모두 RSM으로 계산한 경우 RKE으로 계산한 것보다 속도분포가 좀 더 밖으로 퍼져있어 경계층이 보다 두껍게 계산되었으며, Fig. 8에서 확인한 바와 같이 RSM이 RKE보다 모형시험과 비슷한 결과를 주었

던 것으로 미루어 볼 때, RKE에 의한 실선 스케일 계산 결과는 지나치게 경계층이 작게 추정되는 것으로 보인다. Fig. 14는 선체 표면 압력분포를 비교한 그림이다. 선수의 경우 큰 차이를 보이지 않으나 선미의 경우 전체적으로 차이가 있으며 특히  $C_p = -0.1$  등압곡선의 경우 분포형태에 뚜렷한 차이를 보이고 있다.

**6.3 KVLCC2선의 유동계산결과 비교**

이번에는 KVLCC2에 대하여  $y_1^+ = 80$ (모형선),  $y_1^+ = 1000$ (실선)에 대한 난류유동 해석을 RKE와 RSM을 사용하여 수행하였다. 저항계수를 비교한 Table 10의 결과를 보면 앞의 KLNG, KCS와 마찬가지로 KVLCC2 또한 Table 10을 통해 RSM으로 계산한 경우 RKE으로 계산한 경우보다 큰 점성저항계수와 형상계수를 주고 있음을 알 수 있다.

**Table 10** Resistance coefficients(KVLCC2)

Grid ( $y_1^+$ )	Scale (난류모형)	$C_F$ ( $\times 10^3$ )	$C_{VP}$ ( $\times 10^3$ )	$C_V$ ( $\times 10^3$ )	form factor
ATTC	Model	3.341	-	-	-
GridA (80)	Model (RKE)	3.142	0.656	3.797	0.209
GridA (80)	Model (RSM)	3.211	0.677	3.888	0.211
ATTC	Full	1.397	-	-	-
GridB (1,000)	Full (RKE)	1.326	0.221	1.548	0.167
GridB (1,000)	Full (RSM)	1.391	0.271	1.662	0.195

Fig. 15에는 KVLCC2의 모형선과 실선 스케일의 추진기면에서의 반류분포를 보이고 있다. RKE를 사용한 경우에는 모형선에서는 뚜렷하던 갈고리 모양이 사라졌으며, 경계층이 많이 얇아진 형태로 나타났다. 하지만 보다 고차의 난류모형인 RSM을 사용한 경우에는 실선에서도 발지 보오텍스에 의한 갈고리 모양의 축방향 등속선이 나타나며, 경계층도 RKE에 비하여 두껍게 나타나고 있다.

RSM을 사용한 수치계산으로 얻어진 선체 표면 압력을 도시한 Fig. 16에서는 앞의 KLNG, KCS의 경우에서와 같이 선미 발지 부분에 가장 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

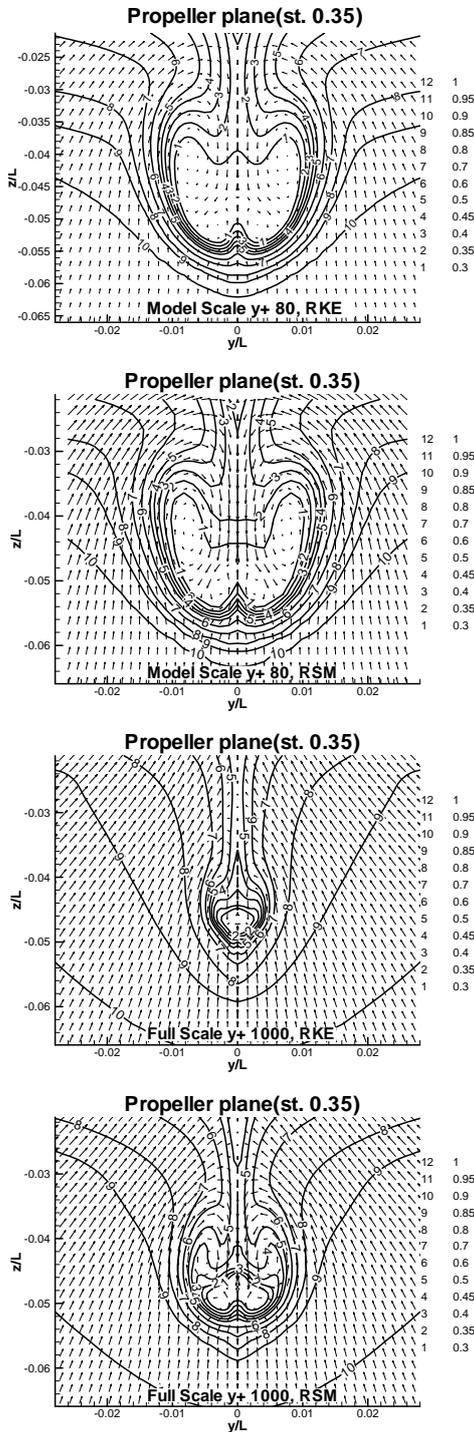


Fig. 15 Calculated wake field between full & model scales(KVLC2, RKE/RSM)

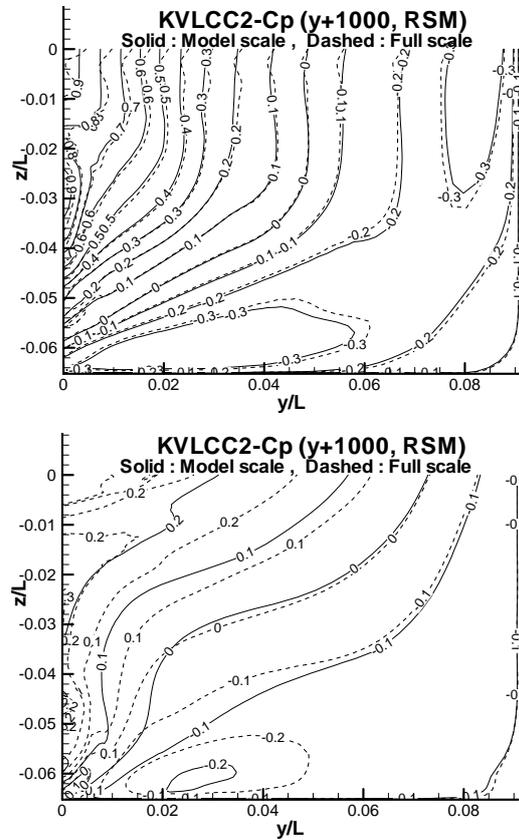


Fig. 16 Comparison of pressure distribution between model and full-scales of KVLC2 with RSM(top: bow, bottom: stern)

#### 6.4 프로펠러 반경에 따른 nominal wake

Fig. 17은  $y_1^+ = 80$ (모형선),  $y_1^+ = 1000$ (실선)의 격자계와 RSM 난류모형을 사용하여 얻은 계산 결과를 바탕으로 계산된 반류 분포로부터 추진기 설계에 흔히 활용되는 공칭반류의 회전방향 평균을 도식한 그림이다. 그리고 비교를 위해 수조 모형시험에서 추력일치법을 사용하여 얻어진 모형선의 유효반류와 ITTC 방법에 의해 실선으로 확장한 유효반류의 비를 구하고, 이를 모형선 스케일에서의 유효해석을 통해 계산된 공칭반류에 곱한 값을 함께 표시하였다. 유효반류의 비로 변환된 곡선은 모형선 반류의 반경방향 분포는 같고 단지 값을 줄인 결과로서 실제 실선계산으로부터 얻어진 반류분포와 많은 차이를 보이고 있다. 또한 실선의 반류분

포는 KLNG와 KVLCC2와 같이 비교적 비대한 선미의 경우에는 완전히 다른 형태를 보이고 있으며,  $r/R=0.7$ 까지의 곡률이 확연히 다를 수 있다.

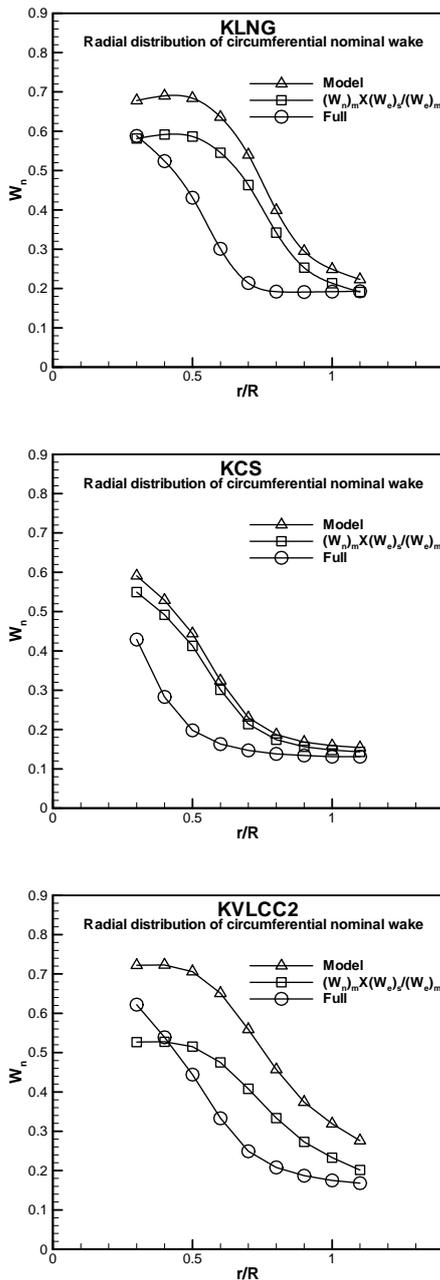


Fig. 17 Radial distribution of nominal wake(from top, KLNG, KCS, KVLCC2)

모형선의 공칭 반류를 실선으로 확장하기 위한 방법은 흔히 점성 경계층의 두께를 기준으로 포텐셜 반류를 제외한 점성 반류를 스케일링하는 것이 보통인데, 3차원 경계층에서 발생하는 유동박리 중의 하나인 필지 보조텍스의 위치와 크기 등을 실선 스케일로 확장하는 방법이 제시되기 전까지는 정확한 확장법을 구하기가 어려운 것이 사실이다. 본 연구에서는 모형선과 실선의 반류를 수치계산을 통하여 비교함으로써 그 차이를 알아보고, 향후 모형 시험에서 얻어진 반류를 실선으로 확장하는 방법을 찾기 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

### 7. 결론

모형선과 실선 스케일의 저항 추정과 반류분포 등에 대한 차이를 확인하기 위해 난류 유동장에 대한 수치계산을 수행하였다. 모형시험 결과가 공개되어 있는 KRISO 138K LNG Carrier (KLNG), KRISO 3600TEU container ship (KCS), KRISO 300K VLCC (KVLCC2) 등 세 척을 선정하여 각각 모형선과 실선 스케일에 대해 Fluent package를 사용하여 저항계수와 반류 분포를 비교하였다.

우선 모형선 스케일에 대하여 수치계산을 수행하여 모형시험 결과와 직접 비교함으로써 그 정도를 확인하였다. RSM을 사용한 수치계산이 RKE에 비해 보다 정확한 수치 해를 제공하는 것으로 판단되었으며, 특히 점성경계층의 두께와 갈고리 모양의 축방향 등속선 분포에서 확연한 차이를 보였다.

다음으로 실선 스케일에서의 수치계산을 수행하여 모형선에 대한 수치계산 결과와 비교하였다. 실선에서는 필지 보조텍스의 형성이 훨씬 약하며, 점성경계층의 두께도 얇아 반류의 영역이 확실히 작게 나타났다. RKE를 사용한 수치계산에서는 RSM을 사용한 경우에 비해 점성경계층의 두께가 지나치게 얇아지는 경향을 보였으며, 필지 보조텍스에 의한 갈고리 모양의 등속선은 거의 나타나지 않았다. 실선 스케일에서의 계측자료를 구하는 것이 거의 불가능한 현재의 상황에서 RSM을 사용한 결과가 RKE에 비해 우수하다고 단정 지을 수는 없다. 하지만 모형선 스케일에서의 RSM을 사용한 수치계산 결과가 보다 정확한 점을 상기해볼 때, RSM

을 사용한 결과가 실선 스케일에서도 보다 정확할 것으로 생각된다.

모형선과 실선 스케일에서 수치계산으로 얻어진 공칭반류의 반경방향 분포를 비교해 보았는데, 세 척 모두 모형선과 실선의 공칭반류 분포가 곡률에서 큰 차이를 보이고 있다. 수조 모형시험에서 추력일치법을 사용하여 얻어진 모형선과 실선의 유효반류의 비로 스케일링을 하더라도 그 분포와 형상이 바뀌지 않기 때문에 실제로 모형선의 결과를 실선으로 확장하는 방법을 본 논문에서 직접 제시하기에는 어려움이 있었다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업과 목포대학교 중형조선혁신센터 및 조선기본설계연구단의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

### 참 고 문 헌

- Choi, J.K., 2009, Problem Analysis Using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow, Master's Thesis, Chungnam National University.
- Kim, B.N., Kim, W.J., Kim, K.S. and Park, I.R., 2009, "The Comparison of Flow Simulation Results around a KLNG Model Ship," Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 3, pp. 219-231.
- Kim, H.T. and 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, Vol. 43, No. 6, pp. 656-666.
- Kim, W.J., Van, S.H., Kim, D.H. and Lee, C.J., 2000, "Experimental Study on Local Flow Characteristics and Propulsive Performance of Two KRISO 300K VLCCs with Different Stern Shapes," Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 3, pp. 11-20.
- Patel, V.C., 1998, "Flow at High Reynolds Number and over Rough Surfaces-Achilles Heel of CFD," Journal of Fluids Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 1-26.
- Van, S.H., Kim, W.J. and Kim, D.H., 2000, "Experimental Investigation of Local Flow around KRISO 3600TEU Container Ship Model in Towing Tank," Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 37, No. 3, pp. 1-10.
- Van, S.H., Yoon, H.S., Lee, Y.Y., Park, I.R., Lee, C.J. and Kim, W.J., 2003, "Measurement of Flow around KRISO 138K LNG Carrier Model," Journal of The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 2, pp. 1-10.



< 양 해 옥 >



< 김 병 남 >



< 유 재 훈 >



< 김 우 전 >