

## KLNG선 모형 주위의 유동계산 비교

김병남\*, 김우전<sup>†\*</sup>, 김광수\*\*, 박일룡\*\*

목포대학교 공과대학 선박해양시스템전공\*  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소\*\*

The Comparison of Flow Simulation Results around a KLNG Model Ship

Byoung-Nam Kim\*, Wu-Joan Kim<sup>†\*</sup>, Kwang-Soo Kim\*\* and Il-Ryong Park\*\*

Department of Naval Architecture & Marine Eng., Mokpo National University\*  
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI\*\*

### Abstract

Numerical simulations have been carried out for a 138K LNG Carrier (KLNG) model ship with free surface, using WAVIS 2.0 and Fluent 6.3.26 with various  $y^+$  values and different grid densities. Level-set method for free surface capturing was adopted in WAVIS, while VOF has been used in Fluent. The calculated results were compared with the experiment data. Resistance coefficient, wave pattern, wave profile along the hull surface, axial velocity contours and transverse vectors had been analyzed. When the first  $y^+$  value was fixed at 60, the simulation results from both WAVIS and Fluent were improved as the number of grids increased. The convergence time of WAVIS was much shorter than that of Fluent. Furthermore, WAVIS predicted the velocity field and the wave profile along the hull surface better than Fluent. However, Fluent gave better wave patterns.

※Keywords: WAVIS, Fluent, Level-set method, VOF, Wave pattern(파형), Velocity field(속도장)

### 1. 서 언

수치계산용 컴퓨터와 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 기술의 발달에 힘입어 많은시간과 비용이 드는 수조시험

을 수행하기 전에 CFD 프로그램을 이용하여 설계된 선박 주위의 유동계산 결과를 선형설계에 활용하는 경우가 많아지고 있다. 현재 조선소에서 사용되어지고 있는 CFD 프로그램은 해양시스템안전연구소(MOERI)에서 개발된 WAVIS, 미국 ANSYS사의 Fluent, 스웨덴의 Flowtech에서 개발한 Shipflow 등이 있다. 이러한 CFD프로그램을 선형설계에 효과적으로 활용하기 위해서는 모형시험과

접수일: 2008년 6월 5일, 승인일자: 2009년 2월 4일

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

같은 조건에서 계산된 결과를 모형시험에서 계측된 결과와 직접 비교하는 과정이 필요하다고 하겠다.

본 연구에서 선택한 138K LNG선은 MOERI에서 선형개발, 모형시험, 유동장 계측 등(Van et al. 2003, Van et al. 2006)을 수행하였고, 이중모형을 풍동에 설치하여 나선 및 프로펠러 회전하는 상태에 대하여 선미 후류 유속계측(Kim et al. 2005a)을 수행한바 있다. 또한 김진 등(Kim et al. 2005b)은 WAVIS 코드를 사용하여 자유수면을 포함한 저항상태의 선체주위의 유동해석을 수행한 바 있다. 한편 CFD 프로그램의 성능 비교를 위해 김희택과 김형태(Kim and Kim 2006)는 자유수면을 포함하지 않은 이중모형에 대하여 Fluent와 WAVIS코드를 이용하여 얻어진 수치계산 결과를 모형시험과 직접 비교함으로써 선형 평가를 위한 CFD 시스템의 성능을 비교하였다.

본 연구에서는 조선소에서 가장 널리 활용되고 있는 WAVIS와 Fluent(Rhee and Skinner 2005) 프로그램을 이용하여 138K LNG선(KLNG) 선형에 대한 유동계산을 모형시험 조건인 Froude number( $Fn$ )=0.1964, Reynolds number( $Re$ )=9.33×106에서 수행하였다. 실제 저항성능 평가를 위해 사용되는 CFD 프로그램의 계산 조건과 격자계에 따른 민감도를 평가하기 위해 자유수면의 영향을 포함하고, 첫 번째 셀 중심의  $y^+$  (이하  $y_1^+$ ) 및 각 방향의 격자수를 변화시켜 각 프로그램에서 계산된 결과를 MOERI의 예인수조에서 실험한 결과와 비교 분석함으로써 두 프로그램의 계산 정도를 파악하고자 하였다. 자유수면을 시뮬레이션하기 위해서는 격자해상도가 매우 높아야 함으로 인해, 과도한 계산시간이 소요되기 때문에 LINUX PC 클러스터에서 24개의 CPU를 병렬로 사용하여 계산시간을 단축하였다.

## 2. 점성유동장 해석기법

본 연구에서는 난류 유동의 지배방정식으로 Reynolds-averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 연속방정식을 사용하였다. WAVIS는 Fluent와 달리 속도( $U_\infty$ ), 수선간 길이(LPP), 그리고 유

체의 밀도( $\rho$ )로 방정식을 무차원화하여 해를 구한 반면, Fluent는 차원을 가지는 지배방정식을 사용하는 차이를 가지고 있으나, 본 논문에서는 계산 결과를 모두 무차원화된 그림으로 나타냈다.

WAVIS는 점성 유동장 해석기법이 개발자에 의해 선택되어 고정되어 있는 반면, Fluent는 사용자가 해석기법에 대하여 선택을 할 수 있으나, 여기서는 Fluent에서 추천한 해석기법을 사용하였다. 두 프로그램에서 사용된 점성유동장 해석법 차이를 Table 1에 명시하였다. 벽함수와 대류항의 이산화에서 약간의 차이를 보이나, 보다 큰 차이는 기본 격자계 이산화 형식과 자유수면의 처리 방식이라고 할 수 있다. 이 두 차이에 의해 나타나는 수치계산 결과의 차이는 5절에서 언급하기로 한다.

Table 1 Key features of CFD systems

구 분	WAVIS 2.0	Fluent 6.3.26
Governing equation	Incompressible RANS Eqn.	
Discretization of momentum transport equation	Cell centered FVM	
	Structured Grid Based	Unstructured Grid Based
Turbulence model	Realizable k- $\epsilon$ model	
wall function	Lauder and Spalding	Non-Equilibrium
Convection term	MUSCL	QUICK
Diffusion term	Central Difference Scheme	
Velocity-pressure coupling	SIMPLEC Algorithm	
Free surface capturing	Level-set method	VOF

## 3. 모형선 제원 및 계산조건

수치계산을 위한 대상 선형은 MOERI에서 개발한 KLNG선으로 주요목적 정면도를 Table 2와 Fig. 1에 각각 나타내었다. MOERI 예인수조에서 모형시험을 위해 사용한 모형선은 1/38.6364의 축적비로 제작 되었으며, 유동장 계측은 설계속도

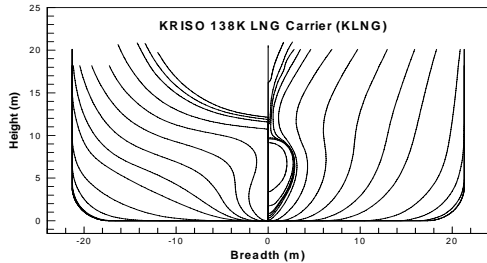


Fig. 1 The body plan of KRISO 138K LNG carrier (KLNG)

Table 2 Principal particulars of the test ship

KLNG	Prototype	Model
Scale ratio	38.6364	
$L_{PP}$ (m)	266.0	6.8847
B (m)	42.6	1.1026
T (m)	11.3	0.2925
Displacement ( $m^3$ )	95940.0	1.6635
Wetted surface area ( $m^2$ )	13831.0	9.2653
$C_B$	0.7493	
$C_M$	0.9857	
Speed (m/s)	10.0317	1.6139
Froude No. (Fn)	0.1964	
Reynolds No. (Re)	$2.24 \times 10^9$	$9.33 \times 10^6$

에 해당되는 Froude number(Fn)=0.1964, Reynolds number(Re)= $9.33 \times 10^6$  에서 수행되었다.

수치계산을 위해 사용된 각 경계면에서의 경계 조건을 살펴보면, 선체 표면에서는 경계면의 속도가 0 이므로 그 경계면을 통한 대류항에 의한 기여는 없고 단지 벽 전단응력으로 인한 접선 방향의 viscous flux만 고려하였으며, 유입면은 균일속도 조건( $u=1, v=w=0$ )을, 수직중심면은 대칭조건을 부여하였으며, 바깥 경계면은 균일류 조건을 주는 등 WAVIS와 Fluent 모두 같은 조건을 사용하였다. 그러나 자유수면의 처리 방식은 수면 위 공기 영역까지 격자계를 생성하고, 그 상방까지 연장된 격자면에 대칭조건을 부여하고, 앞서 설명

한 바와 같이 실제 자유수면은 각각 Level-set 방법과 VOF방법을 사용하여 구하였다. 유출면에 대해서는 WAVIS는 내부영역로부터 속도를 외삽하였으며, Fluent는 압력 경계조건을 사용하였다.

#### 4. 격자 생성

수치계산을 위한 격자계는 O-H 형태이며, Gridgen을 사용하여 생성하였다. WAVIS의 계산영역은 실선의 수선간 길이(LPP)로 무차원화 하여 선체중심면(centerplane)과 중앙면(midship), 그리고 정수면(calm free-surface)을 기준으로 무차원화된 좌표계상에서  $-1.5 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq 1, 0.033 \leq z \leq -10$ 이며, Fluent 역시 동일한 조건으로 계산하기 위하여 WAVIS의 격자를 모형선의 수선간 길이(LPP)를 곱하여 얻어진 길이 차원을 가지는 좌표계  $-10.327m \leq x \leq 17.328m, 0m \leq y \leq 6.8847m, 0.2275m \leq z \leq -6.8847m$  구간에 분포된 얻어진 격자계를 사용하였다. 두 격자계는 차원에서 차이가 있을 뿐 동일한 격자계로 볼 수 있다.

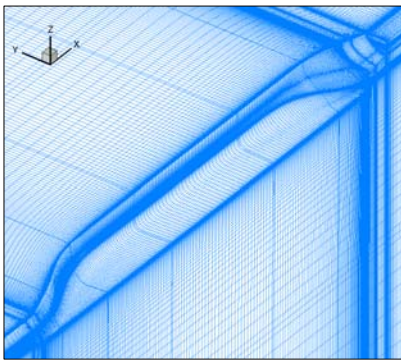
WAVIS와 Fluent의 계산결과를 비교하기 위하여 격자수를 고정한 상태에서  $y_1^+$  변화(Grid A, B, C) 및  $y_1^+$ 를 고정한 상태에서 격자수를 변화하여 수치 계산 결과(Grid D, A, E, F)로 얻어진 난류 유동장 및 파형을 살펴보았다.  $y_1^+$ 를 변화시킨 경우는 260만개의 격자수를 기준으로 세 가지  $y_1^+$  값(60, 120, 240)에 대하여 계산을 수행하였으며, 선체표면에 가장 가까운 격자 중심에서의  $y_1^+$  값을 Table 3에 나타내었다. 또한, 격자수 변화도 260만개를 기준으로 총 격자수를 2배 정도 증감 하여 Grid D, E를 생성하였으며, Grid F는 2.5배 정도 되도록 격자를 생성하였다. Table 4는 동일한  $y_1^+$ 에 대하여 축방향, 폭방향, 회전방향의 격자수 및 총 격자수를 표기하였다. Fig. 2는 KLNG 모형선 주위의 대표적인 격자계를 보여주고 있다.

Table 3 Grid A, B, C with  $y_1^+$  variation

axial×radial×girth	Total cell number	$y_1^+$		
		Grid A	Grid B	Grid C
400×75×163	2,663,388	60	120	240

**Table 4** Grid D, A, E, F with total grid number variation

$y_1^+ = 60$	axial×radial×girth	Total cell number
Grid D	324×55×130	1,347,950
Grid A	400×75×163	2,663,388
Grid E	504×94×200	5,122,419
Grid F	587×108×214	6,811,912

**Fig. 2** Generated grid system

## 5. 계산결과

본 연구에서는 모형시험 조건인  $Fn=0.1964$ ,  $Re=9.33 \times 10^6$ 에서 WAVIS와 Fluent를 이용하여 수치계산을 수행하였으며, 계산된 결과를 예인수 조에서 예측한 결과(Van et al. 2003, Van et al. 2006)와 비교하였다.

### 5.1 $y_1^+$ 변화에 의한 수치 계산 결과 비교

동일한 격자수 260만개(Grid A, B, C)를 기준으로 선체표면에서의 첫 번째 격자중심에서의 벽좌표(wall coordinate)인  $y_1^+$  변화에 의한 영향을 조사하였다. Table 5는 마찰저항계수( $C_F$ ), 압력저항계수( $C_P$ ), 그리고 전저항계수( $C_T$ ) 값들을 비교한 것이다. 여기서 수치계산의 결과로 얻어진 마찰저항계수와 압력저항계수는 선체표면에서 전단응력과 압력을 직접 적분하여 얻어진 값이다.

특히 압력저항은 점성압력저항과 조파저항을 함께 포함하고 있는 값으로 간주된다. Table 5의 저

항 계수 값은 수렴 history의 마지막 3 phase에 대하여 평균을 내어 값을 구하였다. 마찰저항 값을 보면 WAVIS는 Grid A, B, C의 계산결과가 실험결과와 유사하게 추정됨을 확인할 수 있으나, Fluent는 Grid A, B, C 모두 실험 결과 보다 작게 추정되었다. 압력저항계수를 보면 WAVIS의 경우 Grid B, C가 모형시험보다 과도하게 추정되거나 작게 추정된 반면, Grid A는 모형시험 결과와 가까운 결과를 보이고 있으며, Fluent에서는 Grid A가 실험 결과보다 과도하며, Grid B, C는 낮게 추정되었다. 전체저항은 두 프로그램 모두  $y_1^+=60$ 일 때 가장 가까웠다.

**Table 5** Calculated resistance coefficients with  $y_1^+$  variation

Grid ( $y_1^+$ )	Solver	$C_F$ ( $\times 10^3$ )	$C_P$ ( $\times 10^3$ )	$C_T$ ( $\times 10^3$ )
	Exp. (MOERI)	3.053*	0.863**	3.916
GridA (60)	WAVIS	2.933	0.918	3.851
	Fluent	2.790	0.956	3.746
GridB (120)	WAVIS	2.997	0.987	3.984
	Fluent	2.758	0.792	3.550
GridC (240)	WAVIS	3.041	0.685	3.726
	Fluent	2.778	0.825	3.603

\* ITTC 1957 friction line으로부터 얻어진 마찰저항계수

\*\* 모형시험 결과의 잉여저항계수 ( $C_R$ )

Fig. 3은 수치계산 결과인 선측파형(hull wave profile)을 모형시험 결과와 비교하여 나타내었다.

$y_1^+=60$ 일 때, WAVIS, Fluent 둘 다 실험값에 가장 근접함을 알 수 있다.  $y_1^+=240$ 일 때 WAVIS는 선수 앞부분 및 선미부에서 실험과 많은 차이를 보이고 있으며, Fluent의 경우  $y^+$ 가 변화하더라도 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 이는 WAVIS의 경우, 벽함수가 적용되는 첫 번째 격자점의 위치에 따라서 선체표면 근처의 압력 및 유동장에 변화가 생길 수 있다는 것을 말하고 있다. WAVIS의 경우, 표준형 벽함수를 채택하고 있어 첫 번째

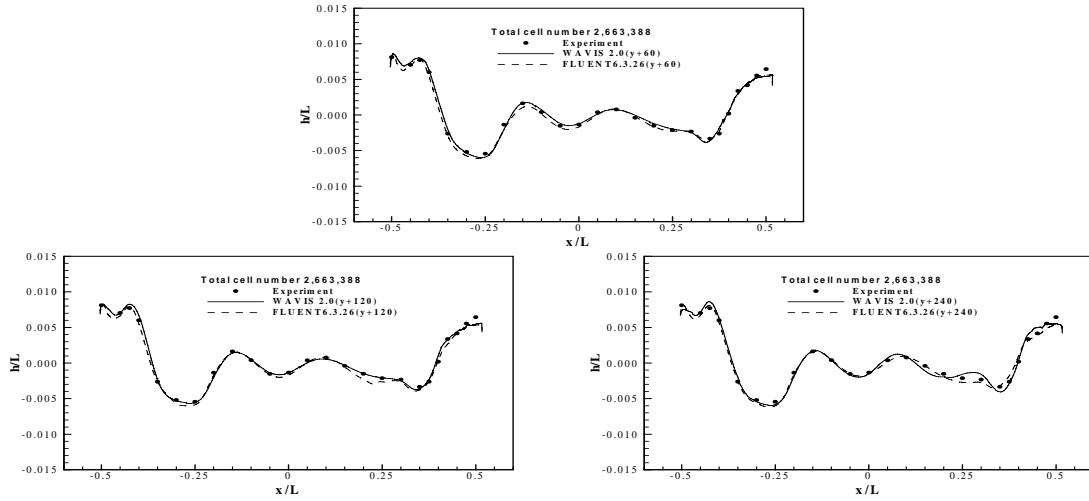


Fig. 3 Comparison of wave profile along the hull surface with different  $y_1^+$

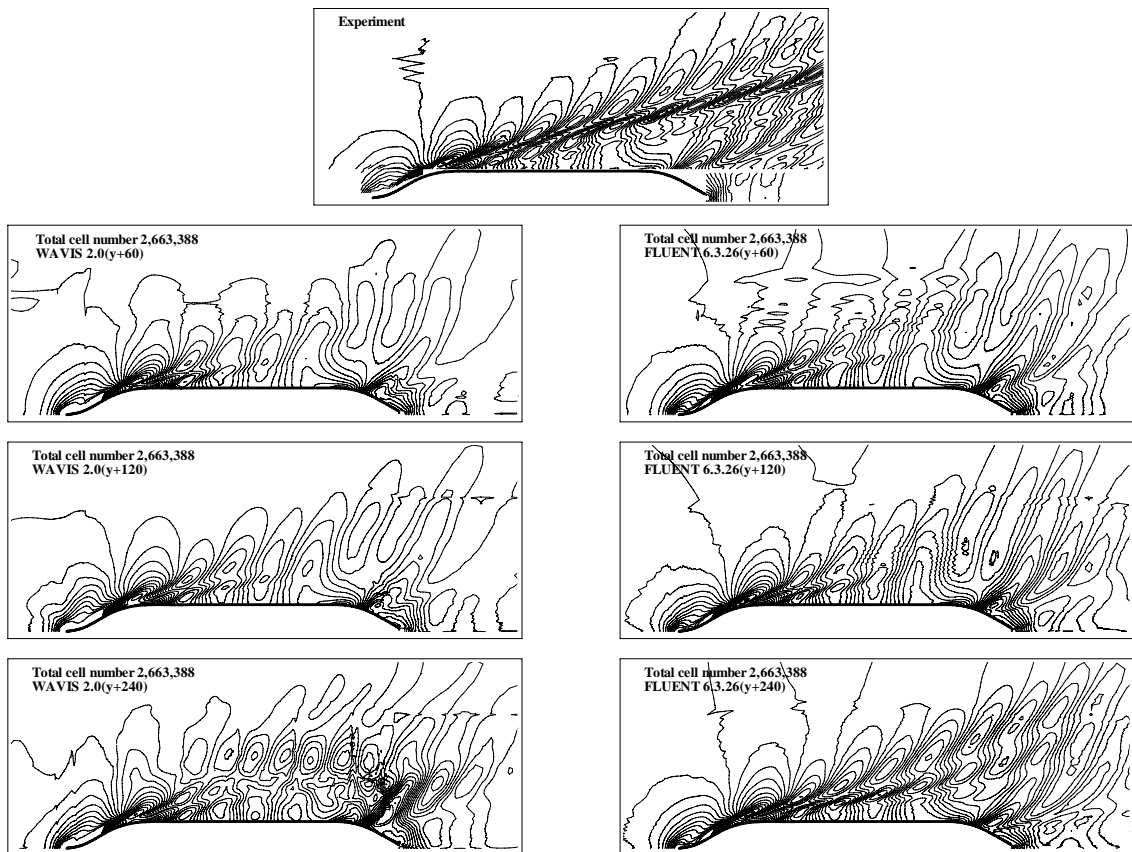


Fig. 4 Comparison of wave patterns with different  $y_1^+$

격자계의 위치가 너무 멀리 떨어져 있을 때에는 선수미의 압력 구배에 의한 영향이 정확히 반영되지 못하는 상황이 벌어지는 것으로 생각된다. 현재의 WAVIS 2.0을 사용할 때는  $y_1^+$ 의 분포에 보다 많은 신경을 써야 할 것으로 생각되며, 향후에는 Fluent에서 채택하고 있는 non-equilibrium 벽 함수의 채용도 고려해보아야 할 것으로 판단된다.

한편 Fig. 4는 수면에서의 전체 파형(wave pattern)을 보여주고 있다. 동일한 격자수를 유지하였기 때문에  $y_1^+$ 가 클수록 선체표면 근처 보다는 바깥쪽에 상대적으로 많은 격자가 분포하기 때문에 전체적인 파형을 추정하기에는 유리한 격자 분포를 가지게 된다. 하지만 앞서 언급한대로 WAVIS는  $y_1^+$ 에 따라서 선체표면의 압력장 변화가

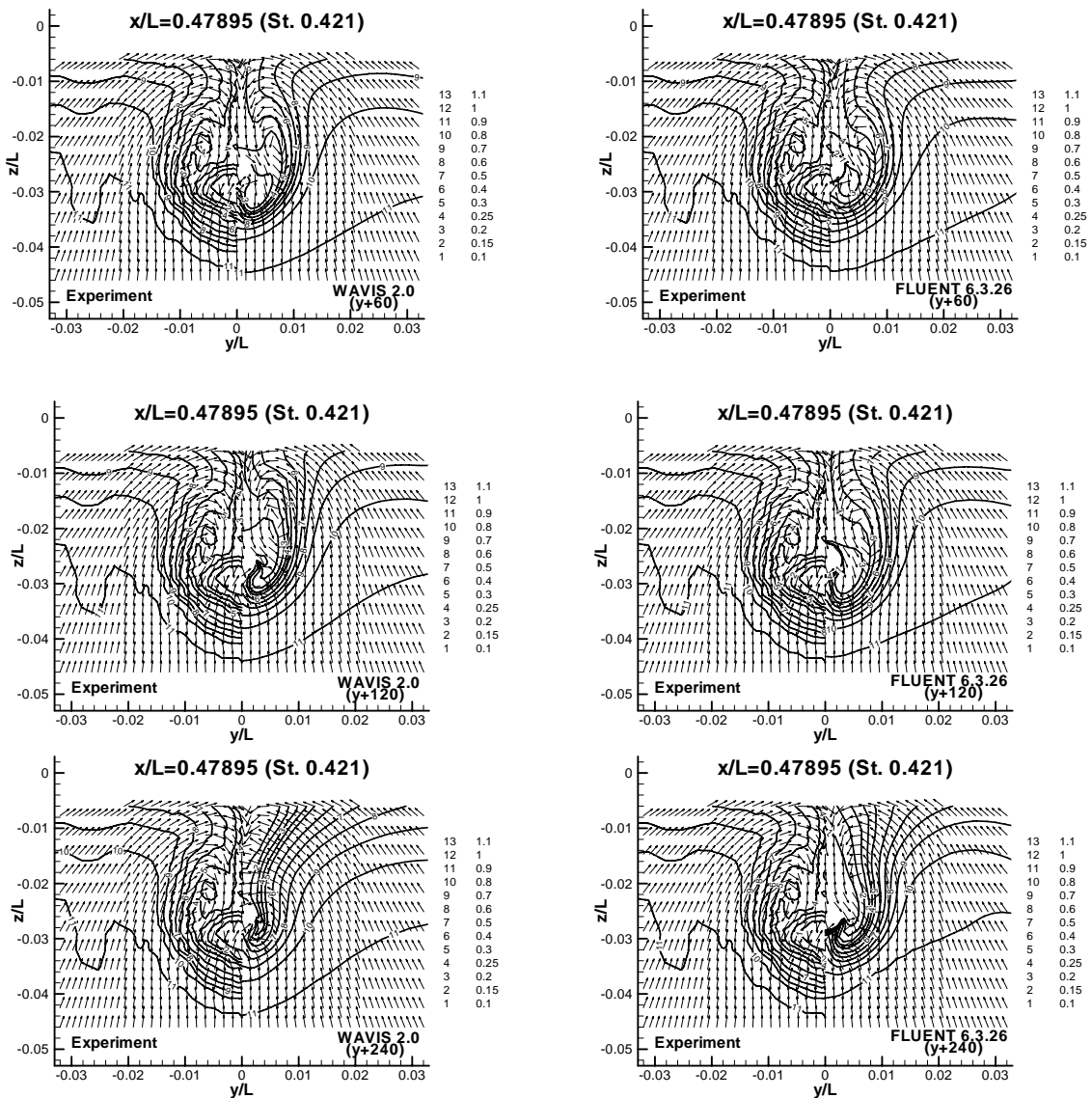


Fig. 5 Comparison of velocity fields with different  $y_1^+$

민감하여  $y_1^+$ 가 커지는 경우에 전체적인 파형이 부정확해짐을 알 수 있었다. 한편, Fluent의 경우에는  $y_1^+$ 가 커져서 격자계가 바깥쪽에도 충분히 분포한 경우가 실험과 좀 더 가까워짐을 확인 할 수 있다.

Fig. 5는 추진기 면에서의 축 방향 속도 분포와 횡 방향 속도벡터를 실험과 비교하여 나타내었다.

WAVIS와 Fluent 둘 다  $y_1^+=240$ 일 때는 실험과 상당히 다른 결과를 보여주고 있으며,  $y_1^+=60$ 일 때 스케그 밑 부분의 축 방향 속도분포 및 횡 방향 속도벡터에서 확인 할 수 있는 빌지 보오텍스 코어 위치가 실험과 다소 차이가 있으나  $y_1^+=120, 240$  보다 유사함을 확인 할 수 있다. WAVIS는  $y_1^+=60, 120$ 일 때, 실험과 유사한 hook shape의 축방향 속도 분포를 확인 할 수 있으나 Fluent에서는 확인 할 수 없다. 이는 Fluent가 구조 격자계를 입력하더라도 운동량 이송방정식의 이산화 방식이 비 구조격자계를 채택하고 있어 구조 격자계를 기본으로 이산화하는 WAVIS에 비해 대류항 이산화에서의 수치확산이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

위의  $y_1^+$ 에 대한 계산결과를 종합해 볼 때, 두 프로그램 모두  $y_1^+=60$ 일 때가 실험과 가장 유사하였다. 선박의 저항 성능을 평가하기 위한 격자 생성에 대해서는 WAVIS의 경우  $y_1^+$ 의 영향을 많이 받기 때문에  $y_1^+$ 의 값이 100 이하로 유지될 수 있도록 선체표면 방향의 격자 분포에 보다 신경을 써야 하며, 이로 인하여 발생하는 전체 파형, 특히 발산파 추정에서의 약점은 감수해야 할 것으로 보인다. 한편, Fluent는  $y_1^+$ 의 영향을 적게 받기 때문에 상대적으로 전체 파형추정에 유리한 격자계를 수용하지만, 속도장 추정에서 수치확산이 비교적 크게 나타나서 WAVIS에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 평가된다.

**5.2 격자수 변화에 의한 수치해 비교**

위의 수치해석 결과를 바탕으로  $y_1^+=60$ 으로 고정하고 격자수를 반으로 줄여서 Grid D를, 2배와 2.5배로 증가하여 Grid E와 F를 각각 생성하여 수치계산을 수행하였다. 각 격자계에 대한 정보는 Table 4에 주어져 있다.

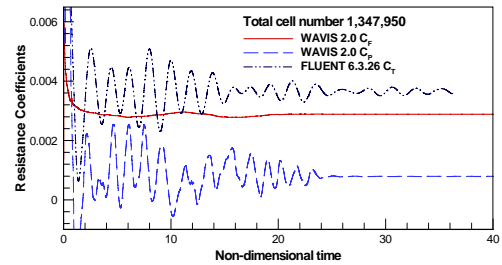


Fig. 6 Convergence history of drag coefficients

Fig. 6은 135만개의 격자수(Grid D)에 대한 정상 상태까지의 반복계산 과정에서 저항계수 수렴도를 보여주고 있다. WAVIS는 무차원화 된 시간 28 이후 마찰저항과 압력저항이 수렴된 것을 확인 할 수 있으나, Fluent의 저항계수는 무차원화 된 시간 36 까지 진동하고 있다. 그 이유는 우선 Fluent의 solver가 비 구조격자계를 기본으로 하고 있기 때문에 선형대수 방정식의 수렴성이 떨어질 수 있다는 점이 지적된다. 그리고 앞서 전체 파형추정에서 Fluent가 WAVIS에 비해 뚜렷한 발산파를 보여주었는데, 이러한 파도의 생성은 필연적으로 경계면에서의 반사현상을 초래하여 전체 유동장의 수렴성을 저해하는 것과 관련지어 생각해 볼 수 있다. 전체 계산시간을 비교해보면, LINUX PC 클러스터에서 24개의 CPU를 사용한 계산시간이 WAVIS의 경우 6시간 30분정도, Fluent는 WAVIS의 4배인 33시간 정도가 소요 되었다. 이는 역시 Fluent가 병렬계산을 위해 채택한 MPI방법이 많은 CPU에서 빨리 포화(saturation) 현상이 발생하는 것으로 24개의 CPU를 사용한 경우에 한해서 내려진 결론임을 밝혀둔다.

Table 6는  $y_1^+$ 을 60으로 고정하고, 전체 격자수를 변화하면서 수행한 수치계산 결과로 얻어진 저항계수 값을 비교하고 있다. WAVIS의 경우에는 가장 적은 격자수를 가진 Grid D의 경우를 제외하면 격자수가 증가할수록 마찰저항, 압력저항, 전체 저항이 모두 조금씩 일관되게 줄어드는 것을 볼 수 있으나, Fluent의 경우에는 격자수가 증가하면서 저항 값이 진동하는 현상을 보이고 있다.

**Table 6** Comparison of the resistance coefficients with total grid number variation

$y_1^+ = 60$ (total grid number)	Solver	$C_F$ ( $\times 10^3$ )	$C_P$ ( $\times 10^3$ )	$C_T$ ( $\times 10^3$ )
	Exp. (MOERI)		3.053*	0.863**
Grid D (1,347,950)	WAVIS	2.887	0.791	3.678
	Fluent	2.797	0.854	3.651
Grid A (2,666,388)	WAVIS	2.933	0.918	3.851
	Fluent	2.790	0.956	3.746
Grid E (5,122,419)	WAVIS	2.927	0.850	3.777
	Fluent	2.812	1.042	3.854
Grid F (6,811,912)	WAVIS	2.897	0.845	3.742
	Fluent	2.815	1.004	3.819

\* ITTC 1957 friction line으로부터 얻어진 마찰저항계수

\*\* 모형시험 결과의 잉여저항계수 ( $C_R$ )

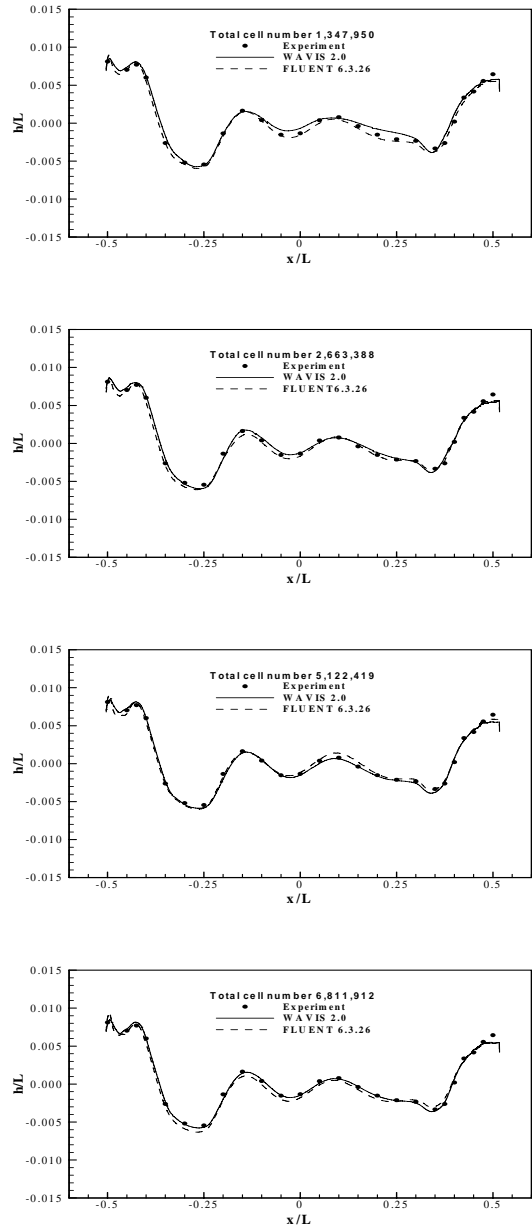
Fig. 7은 선측파형을 보여주고 있다. WAVIS는 격자수가 증가 할수록 실험과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 한편 Fluent는 격자수를 증가하더라도 정확도가 계속 좋아진다고 볼 수 없다. 이는 수치계산의 수렴도와 관계가 있는 것으로 추정된다.

Fig. 8은 전체파형을 나타낸 그림이다. WAVIS와 Fluent 둘 다 격자수가 증가 할수록 실험과 일치하고 있다. 그러나 Fluent는 폭/흘수 비가 상대적으로 크고, 비교적 Froude 수가 큰 LNG운반선의 선형 특성상 발생하는 강한 발산파계를 WAVIS보다 훨씬 잘 재현하고 있다. 이는 WAVIS가 채택하고 있는 level-set 방법이 Fluent의 VOF법에 비해 수치적 소산이 많이 발생하기 때문으로 생각되며, 이러한 자유수면 계산방정식의 소산이 전체적인 유동장의 수렴성에는 유리하게 작용할 수 있기 때문에 수치계산의 수렴도와 파형 재현의 정확성을 동시에 고려해야 한다는 점을 상기할 필요가 있다.

**5.3 선미 주위의 유동장**

$y_1^+ = 60$ 으로 고정하고 격자수가 680만개 일 때, 선미의 St. 1, 추진기 면인 St. 0.421, 타의 앞날 끝 위치에 해당하는 St. 0.21 그리고 트랜섬 끝단의 위치인 St. -0.3383의 축방향 속도분포 및 횡

방향 속도벡터에 대하여 WAVIS와 Fluent의 계산결과를 모형시험 결과와 비교하였다. Fig. 9는 4개의 속도장을 예측한 위치를 나타내고 있다.



**Fig. 7** Comparison of wave profile along the hull surface with different grid numbers



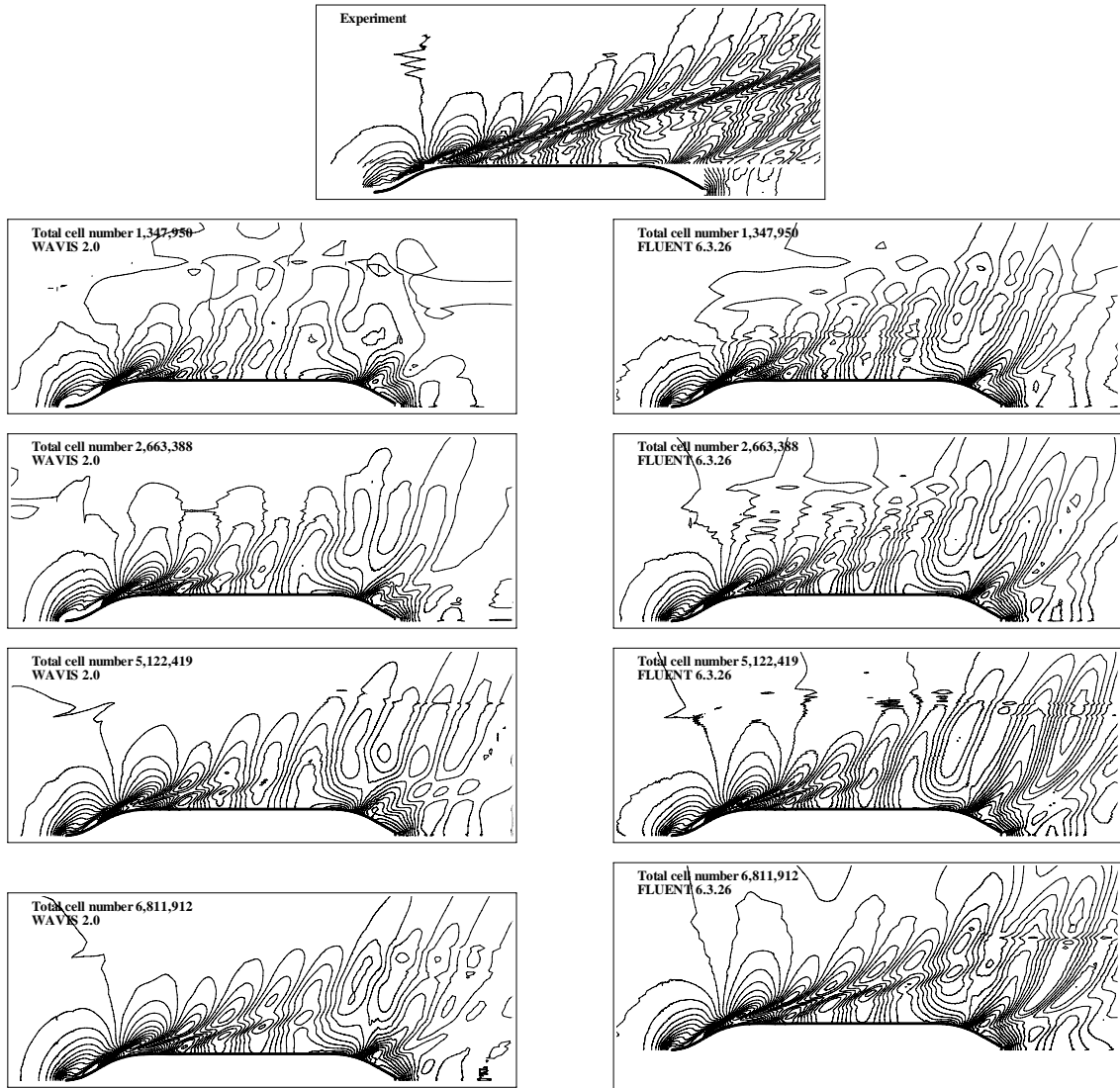


Fig. 8 Comparison of wave patterns with different grid numbers

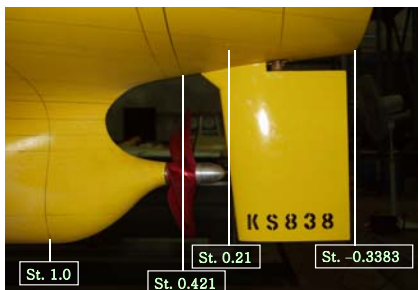


Fig. 9 Stations of KLNG ship

Fig. 10은 각 스테이션에서의 축방향 속도분포와 횡방향 속도벡터를 나타내었다. WAVIS가 Fluent에 비해 확연히 빌지 보오텍스의 존재를 보여주고 있다. 특히 St. 1과 St. 0.421에서 나타나는 hook shape를 WAVIS는 잘 표현하고 있으나, Fluent는 잘 잡아내지 못하고 있다. 이는 동일한 난류모형과 격자계를 사용했다는 점과 격자계의 수가 충분했다는 점을 근거로 이산화 과정에서 발생한 차이라고 해야할 것이다.

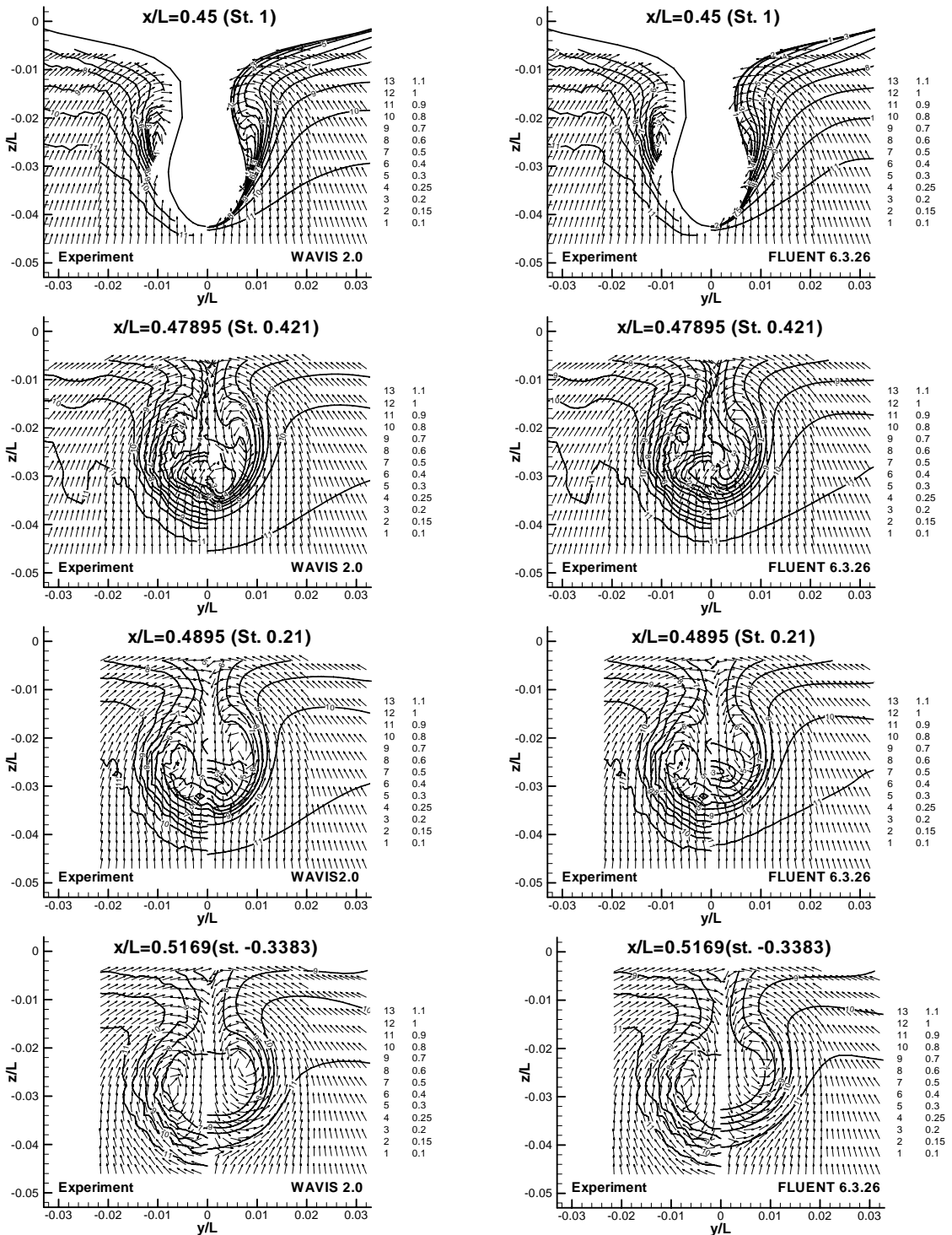


Fig. 10 Comparison of velocity field w/ Grid F(Total cell number 6,811,912)

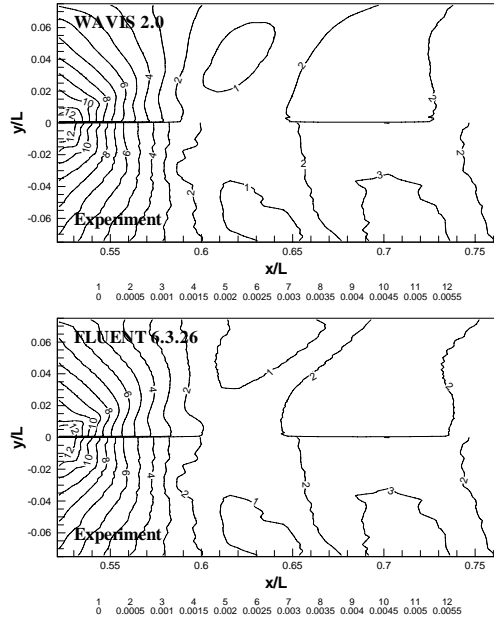


Fig. 11 Comparison of the stern wave patterns

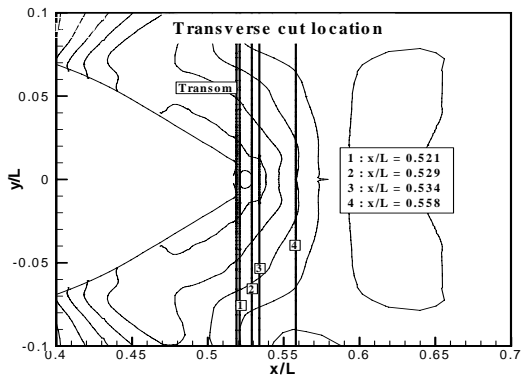


Fig. 12 Measurement locations for transverse stern wave cuts

Fluent의 경우 대류항의 이산화 과정에서 비구조 격자계를 기본으로 하고 있기 때문에 구조 격자계를 기본으로 하는 WAVIS와는 달리 상류방향과 하류방향의 값을 결정하기 위해 여러 값의 평균을 구하는 과정을 포함할 수밖에 없고, 이러한 평균과정에서 필연적으로 수치확산이 나타나게 된다. 즉 WAVIS가 Fluent에 비해 고차의 대류항 이산화에 해당한다고 할 수 있고, 이로 인하여 빌지 보텍스 재현결과가 우수하게 나타난 것이라고 하겠다.

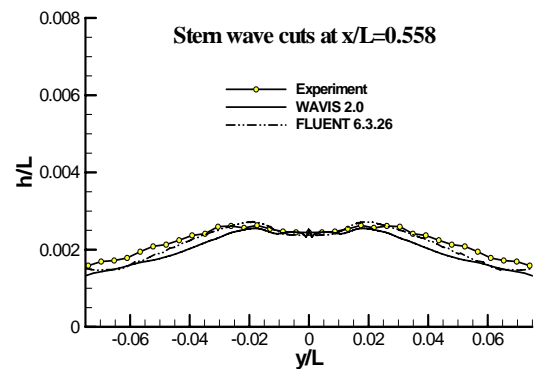
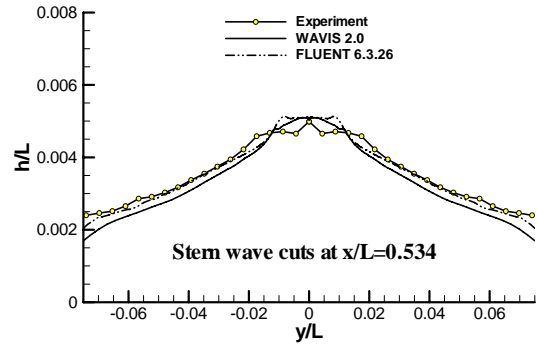
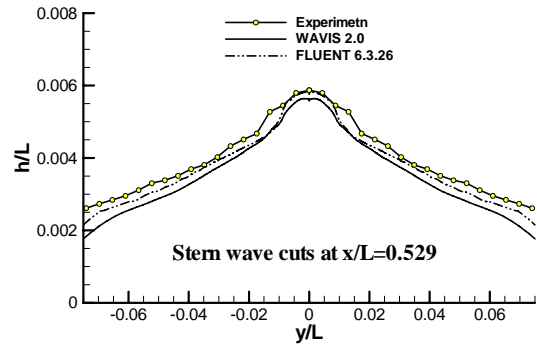
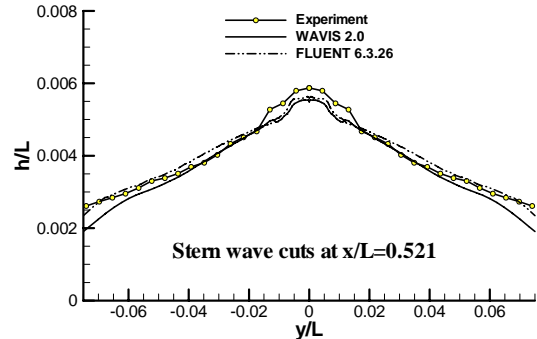


Fig. 13 Comparison of stern waves along various transverse cuts (Grid F)

추진기 면인 St. 0.421에 대하여 Fig. 5의 260만개의 격자수를 가지는 Grid A의 경우와 비교했을 때 동일한  $y_1^+ = 60$  조건에서 격자 해상도가 2.5배 증가하였으나 WAVIS, Fluent 둘 다 선미 스케그 밑 부분의 축방향 속도 분포와 횡방향 속도벡터에서 추정 할 수 있는 빌지 보오텍스의 위치가 실험과 차이를 보이고 있다. St. 0.21, St.-0.3383에서도 스케그 밑 부분, 빌지 보오텍스 코어의 위치가 실험과 다소 차이가 있음을 확인 할 수 있다. 위의 계산 결과로 보아 WAVIS, Fluent 둘 다 경계 층의 두께가 얇게 계산된 것으로 보인다.

또한 선미 트랜섬 후방으로 4개( $x/L = 0.521, 0.529, 0.534, 0.558$ )의 횡단면을 설정하고 각 단면에서의 파고를 실험 자료와 비교하였다. Fig. 11은 트랜섬 뒤의 파형을 보여주고 있다. WAVIS와 Fluent 모두 트랜섬 뒤의 파형을 잘 재현하고 있는 것으로 평가할 수 있으며, 특히 Fluent의 경우에는 매우 작은 파고까지 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 트랜섬 선미 후방의 파고를 실험과 비교한 4개 횡단면의 위치를 나타내고 있다. Fig. 13은 4개의 서로 다른 횡단면에서의 파고에 대하여 수치해석결과와 실험을 비교한 그림이다. WAVIS와 Fluent 둘 다 실험과 유사한 파고의 형태를 보여주고 있으나, Fluent가 WAVIS보다 정확한 결과를 보여주고 있는 것으로 평가된다.

## 6. 결론

선박의 저항성능 추정에 활용되는 CFD 프로그램의 성능과 적용방법 상의 특징을 알아보기 위해 WAVIS 2.0과 Fluent 6.3.26를 사용하여 기존의 모형시험 결과가 공개된 138K LNG선 모형(KLNG) 주위의 난류유동 계산을 자유수면의 파계생성을 포함하여 수행하였다.

우선 격자계의 분포에 따른 차이를 알아보기 위해 전체 격자수를 260만개로 고정하고 첫 번째 셀 중심의  $y^+$ 에 대한 변화를 검토하였다. WAVIS의 경우에는 Fluent보다 수치계산 결과가  $y_1^+$  값에 훨씬 민감하였으며, 특히  $y_1^+$ 가 200을 넘는 경우에는 값의 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 사용

된 벽함수의 차이에서 기인한다고 생각된다. 선측 파형의 경우  $y_1^+$ 가 60인 경우에는 WAVIS가 Fluent에 비해 보다 나은 결과를 주는 것으로 평가되었다. 또한 두 프로그램 모두  $y_1^+$ 가 240인 경우에는 선미 속도장 예측이 부정확한 것으로 나타났다.

다음으로  $y_1^+ = 60$ 으로 고정하고 격자수가 증가할 경우 WAVIS는 선측파형과 속도장 예측에서 Fluent보다 우위를 보였다. 이는 WAVIS가 이산화 과정에서 구조 격자계를 기본으로 하고 있어 비구조 격자계를 기본으로 하는 Fluent에 비해 운동량 이송방정식의 대류항에서의 수치확산이 상대적으로 작게 나타나기 때문으로 생각된다. 하지만 발산파계나 선미파계의 예측에서는 Fluent가 우수한 것으로 평가되었다. 이는 자유수면 파계 추정을 위해 WAVIS가 채택한 level-set 방법의 수치확산이 Fluent의 VOF법에 비하여 큰 것에 기인한다고 할 수 있다.

수치계산의 수렴성은 24개 CPU를 사용하는 병렬계산의 경우 WAVIS가 Fluent에 비해 훨씬 우수한 것으로 나타났다. 또한 저항계수의 수렴도 역시 WAVIS가 우수한데, 이는 발산파계 등 자유수면의 형상을 결정하는 기법의 민감도와 반비례하는 것으로 보여져 각 프로그램의 특성적인 차이라고 하겠다.

이상과 같이 기존의 모형시험 결과가 공개되어 있고, 선미부에 빌지 보오텍스가 충분히 강하게 형성되며 자유수면 파계가 복잡한 KLNG 모형선 주위의 유동을 WAVIS 2.0과 Fluent 6.3.26를 사용하여 직접 비교함으로써 각 프로그램의 특성을 비교하였다. 어느 프로그램이 압도적으로 우위에 있다고 보기는 어려우나, 격자계의 분포가 적절하다고 가정하였을 때, WAVIS가 수렴성, 선측파형, 속도장에서 보다 좋은 결과를 주었으며, Fluent가 발산파계나 선미파계 추정에 보다 유리한 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업과 한국해양연구원 기본과제(PES128A)의 지원을 받아 수행된 연구결과임을

밝힙니다.

참 고 문 헌

- Kim, B.J., Choi, S.H., Kim, H.T. and Van, S.H., 2005a, "Measurement of Velocity Field Change around Stern of LNG Carrier Double Body Model by Propeller," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 5, pp. 448-457.
- Kim, J., Park, I.R, Kim, K.S. and Van, S.H., 2005b, "RANS Computation of Turbulent Free Surface Flow around a Self Propelled KLNG Carrier," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 583-590.
- 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.
- Rhee, S.H. and Skinner, C., 2005, "Unstructured Grid Based Navier-Stokes Solver for Free-Surface Flow around Surface Ships," Proc. of CFD Workshop Tokyo 2005, pp. 474-479.

- Van, S.H., Yoon, H.S., Lee, Y.Y., Park, I.R., Lee, C.J. and Kim, J.W., 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.
- Van, S.H., Kim, W.J., Yoon, H.S. and Lee, Y.Y., 2006, "Flow measurement around a model ship with propeller and rudder," Experiments in Fluids, Vo. 40, pp. 533-545.



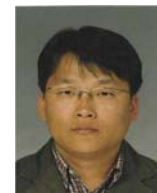
< 김 병 남 >



< 김 우 전 >



< 김 광 수 >



< 박 일 룡 >