

## CFD를 이용한 KVLCC1의 Circular Motion Test 시뮬레이션

신현경<sup>†\*</sup>, 정재환<sup>\*</sup>

울산대학교 조선해양공학부<sup>\*</sup>

Circular Motion Test Simulation of KVLCC1 Using CFD

Hyunyoung Shin<sup>†\*</sup> and Jae-Hwan Jung<sup>\*</sup>

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>\*</sup>

### Abstract

In this study, the turbulent free surface around KVLCC1 employed in the circular motion test simulation is numerically calculated using a commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) code, FLUENT. Also, hydrodynamic forces and yaw moments around a ship model are calculated during the steady turning. Numerical simulations of the turbulent flows with free surface around KVLCC1 have been carried out by use of RANS equation based on calculation of hydrodynamic forces and yaw moments exerted upon the ship hull. Wave elevation is simulated by using the VOF method. VOF method is known as one of the most effective numerical techniques handling two-fluid domains of different density simultaneously. Boundary layer thickness and wake field are changed various yaw velocities of ship model during the steady turning. The calculated hydrodynamic forces are compared with those obtained by model tests.

※Key words: CFD(전산유체역학), Hydrodynamic force(유체력), FLUENT, VOF method(VOF법), Circular Motion Test(선회운동시험), Free surface Flow(자유수면 유동)

## 1. 서 론

선박의 설계 단계에서 조종성능을 추정하기 위한 가장 보편적인 방법은 모형시험을 통해 얻어진 조종성 미계수를 이용한 조종 시뮬레이션으로 선박의 조종성능을 추정하는 것이다. 조종성 미계수를 구하기 위해 모형시험을 통해 유체력 미계수를 추정하거나 경험식을 사용한다. 최근에는 컴퓨터 계산 능력의 비약적인 발달과 더불어 점성 유동의 계산방법(Navier-Stokes Solver) 발달로 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 조종성능 추정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그리고 좀 더 정확한 모형시험의 모사를 위해 자유수면 영향을 고려한 VOF(Volume of Fluid)법과 Level-set 법 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 조종성능 추정을 위하여 실시되는 Circular Motion Test(이하, CMT)를 상용 CFD 프로그램을 이용하여 점성 유동해석을 실시하였다. CMT는 모형선이 정상 선회할 때 선체에 작용하는 유체력을 계측하는 모형시험이다. CMT에 관한 자세한 모형시험 내용은 신현경 등(2009)에 나타나 있다.

모형선이 선회 운동 시 발생하는 자유수면의 영향을 고려하기 위해 VOF법을 적용하였다. VOF법은 수치격자(numerical grid) 내 물과 공기가 차지하는 유체 체적(Volume of fluid) 비율을 통해 두 유체의 경계면인 자유수면의 위치와 움직임을 추적하는 기법이다(Park et al. 2005). 선체가 받는 저항을 점성저항과 잉여저항으로 분리하여 별도로 고려할 필요 없이 한번에 계산할 수 있다는 장점 때문에 최근 많이 사용되는 수치기법이다(Kim and Hyun, 2008).

CMT에 대한 수치 계산에 앞서 자유수면의 영향이 포함된 VOF법을 이용한 KVLCC1의 저항 계산과 선미 유동장 해석을 통해 격자계와 CFD를 이용한 점성유동 계산 기법의 정도를 확인하였다. 점성유동 계산 결과는 한국해양연구원의 모형시험 결과와 비교하였다(Kim et al. 2001).

CFD를 이용한 CMT의 점성 유동해석을 통하여, CMT와 같이 선박이 선회 운동 시 선체에 작용하는 유체력을 계산하였고, 선체 주위 자유수면 유동과 선미 유동장을 계산하였다. 선회 반경에 따

른 선수동요 각속도의 변화에 의한 선체 주위 유동장의 변화를 확인하였고 계산된 유체력은 모형 시험 결과와 비교하였다.

## 2. 수치해석 방법

선박의 선회 운동 구현 시 난류 유동해석을 위한 지배 방정식은 비압축성 연속 방정식과 Reynolds Averaged Navier-Stokes equation(RANS eq.)이다.

RANS 방정식의 해를 구하기 위해 유한 체적법(Finite Volume Method) 기반 상용 프로그램인 FLUENT를 이용하였고, 난류 모형은 Realizable k- $\epsilon$  model을 사용하였다. 운동방정식의 대류항에 대해서는 2차 풍상차분법(upwind differencing scheme), 확산항에 대해서는 중심차분법(central differencing scheme)을 사용하였다. 압력 구배항은 Body force Weighted scheme을, Volume Fraction은 HRIC scheme을 사용하였다. 속도-압력 연성은 SIMPLEC 방법을 선택하였다.

### 2.1 모형선 제원

본 논문에서 계산을 위한 모형선은 KVLCC1으로 선체 저항 성능 계산에서는 한국해양연구원의 모형시험에 사용된 1/58 축척비의 모형선을 사용하였고, CMT의 점성 유동 계산에는 울산대학교 해양공학수조에서 모형시험에 사용된 1/160의 축척비의 모형선을 사용하였다(SIMMAN 2008).

모형선의 제원은 Table 1과 같고, 선박의 중심은 모형시험 시와 동일하게 모형선의 무게중심 위치와 일치하는 것으로 하였다.

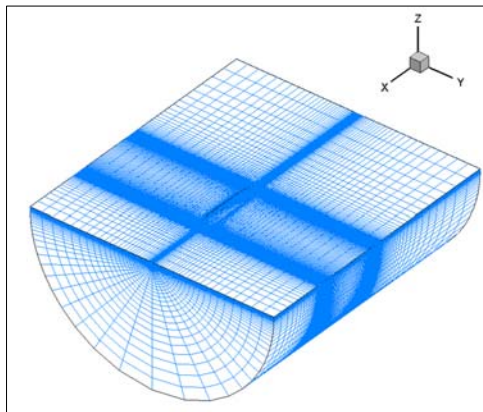
### 2.2 격자 생성

선체의 형상 모델링과 격자 생성은 선박의 Offset Data를 이용하여 타와 프로펠러를 제외한 선체만을 대상으로 상용 격자 생성 프로그램인 Gambit 2.4를 이용하여 수행되었다. 선수 선미 형상을 고려하기 위해 몇 개의 블록으로 유체 영역을 나누는 다중블록 격자계(multi-block structured grid system)로 구성되었다. 계산에 사용된 선체

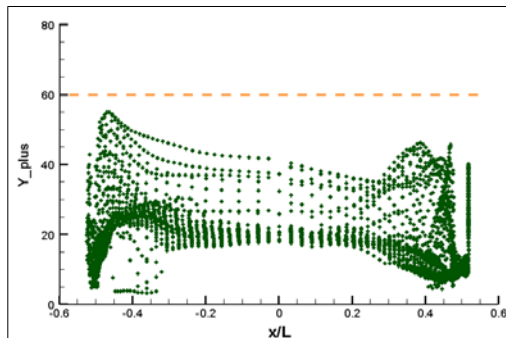
주위 격자계는 Fig. 1과 같이 선수, 선미 모두 O-H typology를 갖도록 하였다.

**Table 1** Principal particulars of KVLCC1

	Prototype	Model (MOERI)	Model (UOU)
scale ratio	1/1	1/58	1/160
speed (m/s)	7.9732 (15.5kts)	1.047	0.63
Lpp(m)	320	5.5172	2
B(m)	58	1	0.3625
T(m)	20.8	0.3586	0.13
Cb	0.8101		



**Fig. 1** Configuration of typical grid system



**Fig. 2** Distribution of  $y^+$  on the hull surface

선회 운동 중에는 비대칭 유동장이 형성되므로 저항 문제를 계산할 때와 달리 선박의 좌우 양쪽을 모두 격자 생성하여야 한다. 따라서 격자 수 역시 보통 저항 문제를 다룰 때의 2배에 달하게 된다. 본 계산에서는 약 88만개의 육면체 격자를 생성하였고, 선체 주위에 작은 블록을 생성하여 격자를 더욱 조밀하게 분포시켰다.

선체 표면에서는 Non-equilibrium wall function의 사용으로 표면에서 첫 노드까지의 거리인  $y^+$ 를 Fig. 2와 같이 60 이하가 되도록 하였다. 그리고 자유수면을 고려한 계산에서는 파가 발생하는 영역의 해의 안정성을 위해 자유 수면을 기준으로 좀 더 조밀한 격자를 생성하였다. 그러나 자유 수면을 포함한 비정상 유동해석에서는 최근 하드웨어의 급속한 발전에도 불구하고 계산시간이 상당히 소요된다는 것이 아쉬운 점이다.

**2.3** 경계조건

외부 경계는 선박에 의해 교란되지 않는 위치에 두었으며, 그 위치는 다음과 같다.

$$-2.5L \leq x \leq 1.5L \quad -1.875L \leq y \leq 1.875L \quad 0 \leq z \leq -1.875L$$

CMT와 같이 선박이 정상 선회하는 모형시험의 모사를 위해 FLUENT의 Moving reference frame을 사용하였다. 이때 회전 축 중심의 위치는 선체로부터 선회 반경만큼 떨어진 거리로 정해지고, 선회 반경이 결정되면 회전 각속도(Rotational Velocity)는 식(1)에 의해 결정된다. 즉, 전 유체 영역과 유체 영역을 감싸는 경계가 선회 반경만큼 떨어진 지점을 중심으로 주어진 각속도로 좌표계와 같이 정상 선회하게 된다(SNAME 1989).

유체영역이 회전하는 CMT 계산의 경계조건은 계산영역의 선체 위부분의 대칭 경계조건(symmetry)을 제외하곤 모두 유출 압력조건(pressure-outlet)으로 설정하였다(Cho. et al 2007). 선체 표면에서는 non-equilibrium wall function을 사용하였다.

$$r = \frac{U}{R} \tag{1}$$

### 3. VOF법을 이용한 저항 및 선체주위 유동장 해석

VOF법은 유체 체적 비율을 통해 밀도가 다른 두 유체의 체적 비율을 임의 변수로 표현하고, 자유수면의 위치로 표현되는 변수 값을 추적하면서 자유수면의 움직임을 해석하는 기법이다. 계산에 사용되는 격자계와 VOF법을 이용한 점성 유동 계산의 정도를 확인하기 위해 저항 추정 및 선체 주위 유동장 해석을 실시하였다. VOF법을 이용한 저항 계산은 한국해양연구원의 선체 주위 유동 계측을 위한 모형시험 결과와 비교를 위해 한국해양연구원의 모형시험에 사용된 1/58 축척비의 모형선을 이용하여  $Re=4.6 \times 10^6$ 에서 계산하였다. 모형선의 제원은 Table 1에 제시되었다(Kim et al. 2001).

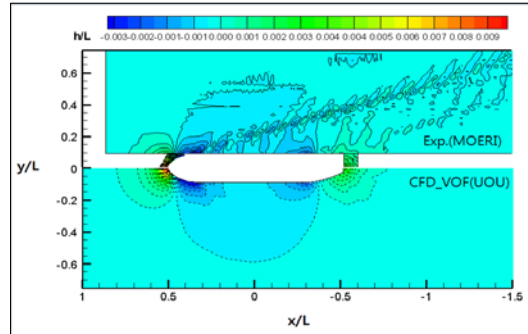
#### 3.1 저항계수, 선체주위와 선측 파형 비교

VOF법을 이용한 저항 계산과 한국 해양 연구원의 모형시험을 통해 얻어진 마찰저항계수( $C_f$ ), 압력저항계수( $C_p$ ) 그리고 전체 저항계수( $C_t$ )를 Table 2에서 비교하였다(Kim. et al 2000).

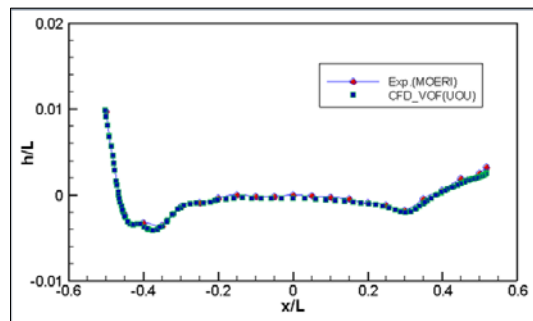
모형시험의 마찰저항은 ITTC-1957의 공식으로부터 계산된 결과이며 압력저항은 잉여저항을 나타낸다. 본 수치해석에서 얻어진 전체 저항계수는 모형시험과 비교하여 약 3%의 오차를 보여주고 있다. Figs. 3~4는 VOF법을 이용하여 계산된 선체 주위의 파형 분포와 선체 표면을 따른 선측 파형을 모형시험에서 계측된 결과와 비교하였다.

**Table 2** Comparison of the resistance coefficients

	$C_F \times 10^3$	$C_P \times 10^3$	$C_T \times 10^3$
CFD_VOF (오차)	3.055	0.905	3.960 (3.22%)
Exp. (MOERI)	3.450 (ITTC)	0.638	4.088



**Fig. 3** Comparison of wave patterns



**Fig. 4** Comparison of hull surface wave profiles

Figs. 3~4의 Exp.(MOERI)는 한국해양연구원의 모형 시험 결과이며, CFD\_VOF(UOU)는 본 논문에서 사용한 VOF를 이용한 계산 결과를 나타낸다. 자유수면의 파형 계산 결과에서 파형의 전파가 완벽히 모사되진 않았지만, CFD 프로그램의 VOF법을 이용한 점성 유동 해석 결과와 실험 결과는 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 선미 유동장 비교

Figs. 5~6 는 CFD 프로그램을 이용하여 계산된 각 스테이션에서의 축 방향 속도분포와 실험을 통해 계측된 결과와의 비교를 나타낸다. St. 2에서 선체 중앙 평행부에서 발달된 점성 경계층이 선미로 진행하면서 좁아지는 선미 형상을 따라 두껍게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 propeller plane인 St. 0.35의 계산 결과에서는 실험 결과와 같이 갈고리 모양(hook-like shape)의 발지 보텍스의 확인이 가능하다. 이것은 다른 난류 모델인 Standard k-ε 모델과 RNG k-ε 모델에서는 확인

이 어려운 것으로 알려져 있다(Kim et al. 2001(1)).

본 논문의 점성유동 계산에 사용된 난류 모델은 Realizable  $k-\epsilon$  모델로서 축 방향 속도 분포에서 확인 가능한 갈고리 모양(hook-like shape)의 발지 보텍스의 확인이 가능한 것으로 판단된다. 전반적으로 점성 유동 계산 결과로 얻어진 각 스테이션의 축 방향 속도 분포가 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

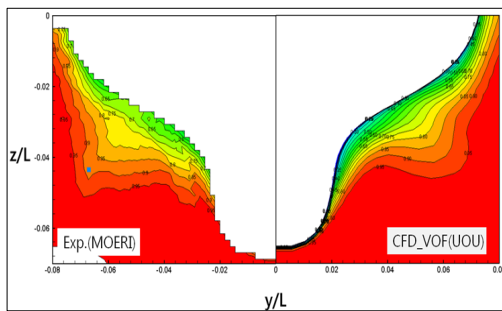


Fig. 5 Comparison of axial velocity contours at station 2

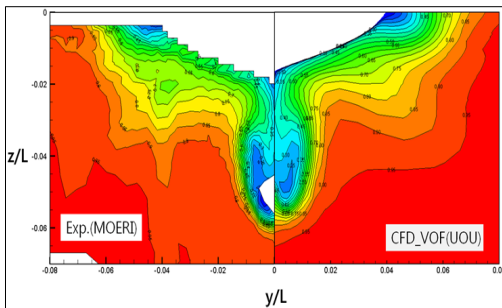


Fig. 6 Comparison of axial velocity contours at station 0.35 (propeller plane)

#### 4. 자유수면을 포함한 Circular Motion Test Simulation

CMT(Circular Motion Test)는 모형선을 예인하는 동시에 선수각을 변화시켜 모형선의 정상 선회 운동을 구현하는 시험 방법이다. 모형선이 선회할 때 선체에 작용하는 유체력을 계속하게 된다. 선박이 선회할 때 발생하는 조파현상은 저항 시험의 경우보다 더 크게 발생한다는 점을 고려하여 저항

계산과 동일하게 VOF법을 이용하여 자유수면을 포함한 점성유동 해석을 실시하였다.

CFD를 이용한 CMT의 점성유동 계산에서는 FLUENT의 Moving reference frame 방법을 이용하여 유체영역을 회전 축 중심으로 일정한 각속도로 회전시켜서 구현하였다. 즉, 선체는 고정되어 있고 선체 주위의 유체가 정상 선회함으로써 선박의 선회 운동과 동일한 효과를 기대할 수 있다.

Fig. 7은 선수동요 각속도( $r'$ )가  $0.1575\text{rad/s}$  ( $r' = 0.5$ ) 인 CMT를 구현한 자유 수면상의 상대 유동장을 나타낸 결과이다. 무차원화 된 선수 동요 각속도가 0.5일 때 선체 주위의 유체는 선체로부터 선회 반경인 4m 떨어진 지점을 중심으로 회전하게 된다. 상대 유동장이라 함은 회전하고 있는 좌표계(선박 위)에서 본 주위의 유동장을 의미한다.

선박이 놓여 있는 부분의 유동 속도가 모형선의 설계속도인  $0.63\text{m/s}$ 인 것을 확인할 수 있으므로 선박이 설계 속도로 선회하는 것이 바르게 구현된 것으로 판단된다. Fig. 7에서는 선회 운동 시 유동의 비대칭성 뿐 아니라 선미부분에서의 후류 유속 분포도 확인할 수 있다.

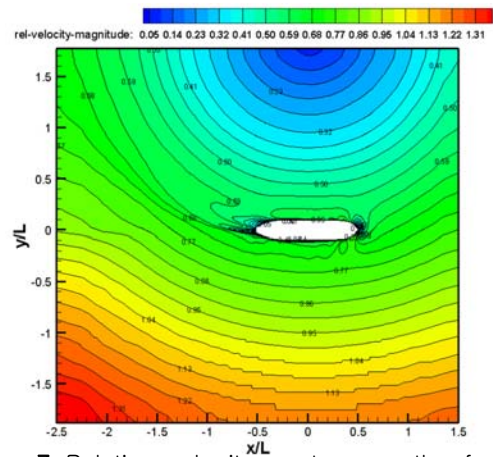


Fig. 7 Relative velocity contour on the free surface during steady turning

#### 4.1 선체주위와 선속 파형 비교

일반적으로 KVLC1과 같은 유조선의 경우에는 설계속도에서의  $F_n$ 가 0.142로 작기 때문에 자유

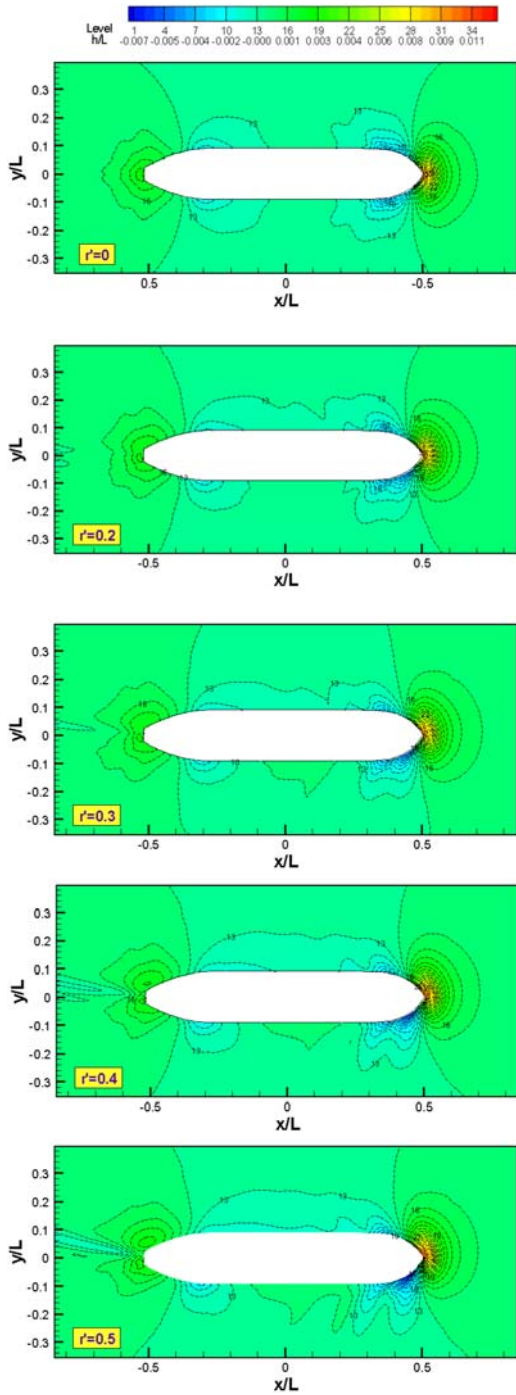


Fig. 8 Comparison of wave patterns with yaw rate

수면의 영향은 크지 않다고 알려져 있다. 그러나, 선박이 선회 운동 시에는 파형의 변화가 상대적으로 크게 발생할 것으로 예상되어 선체 주위와 선측의 파형을 계산하여 비교하였다.

Figs. 8~9는 CMT의 계산 결과 무차원화 된 선수동요가 0.2~0.5로 변할 때 선체 주변에 발생된 파형분포와 선체 길이 방향과 좌우 방향의 선측 파형 결과를 직진 상태의 계산 결과와 비교하였다.

이때 선체가 좌현 방향으로 회전을 하는 경우를 계산한 것으로, 유체가 좌현 쪽으로 유입되는 것을 확인할 수 있다.

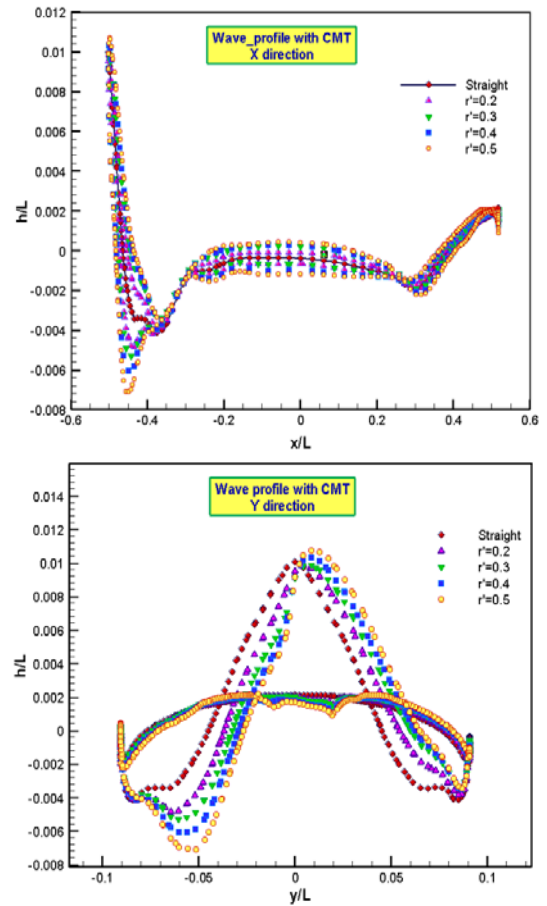


Fig. 9 Comparison of wave profiles with yaw rate



여기서 유체가 유입되는 면을 압력면(Pressure side)라 하고 그 반대 방향을 흡입면(Suction side)이라 하기로 한다. 무차원화 된 선속동요 각속도가 증가함에 따라 흡입면(suction side)으로 큰 파형이 생성되는 것을 확인할 수 있다.

선체 길이 방향과 폭 방향에 따른 선속 파형 결과를 살펴보면 Fig. 9 에서와 같이 선회 운동 시 선속 파형의 변화가 매우 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 선회 운동 시 선속부에서 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 파형이 큰 차이를 보이고 있을 뿐만 아니라, 중앙부에서도 좌현과 우현의 파형의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 직진 상태에 비하여 압력면(pressure side)에서는 수면 상승이, 흡입면(suction side)에서는 수면의 하강 현상이 확연하게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 무차원화 된 선속동요 각속도가 증가함에 따라 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side)의 파형의 차이가 더욱 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 선미 유동장 비교

Figs. 10~12는 KVLCC1의 무차원화 된 선속동요 각속도 0.2~0.5에서 유동 계산 결과인 각 스테이션에서의 축방향 속도분포와 횡방향 속도벡터로 보여주고 있다. 직진 상태가 아닌 선회 운동 시의 유동 현상은 비대칭으로 나타나므로 좌현과 우현 모두 나타내었다.

본 계산에서는 선체가 좌현방향(+y)으로 선회하는, 즉 선체 좌측에 회전 중심축이 위치하고 유체가 좌현(+y)으로 부터 유입 되는 경우로 표시되었다. 먼저 전체적인 계산 결과에서 선속동요 각속도로 선회 운동 시 흡입면인 우현에서 압력면인 좌현 쪽으로 선저를 가로 지르는 큰 형태의 회전 속도 성분이 생기고 있음을 확인할 수 있다. 이는 선미부로 가면서 발지 보텍스 형성 과정에 더해져 St. 0.35(pripeller plane)와 AP에서 확인할 수 있는 선체 중앙 면 근처의 크고 강한 보텍스를 형성 시키는 원인이 된다.

그리고 St. 2의 무차원화 된 선속 동요 각속도가 0.3일 경우에 우현(suction side)에 축방향 속도분포가 바깥쪽으로 흘러가듯이 나타나고 있는데,

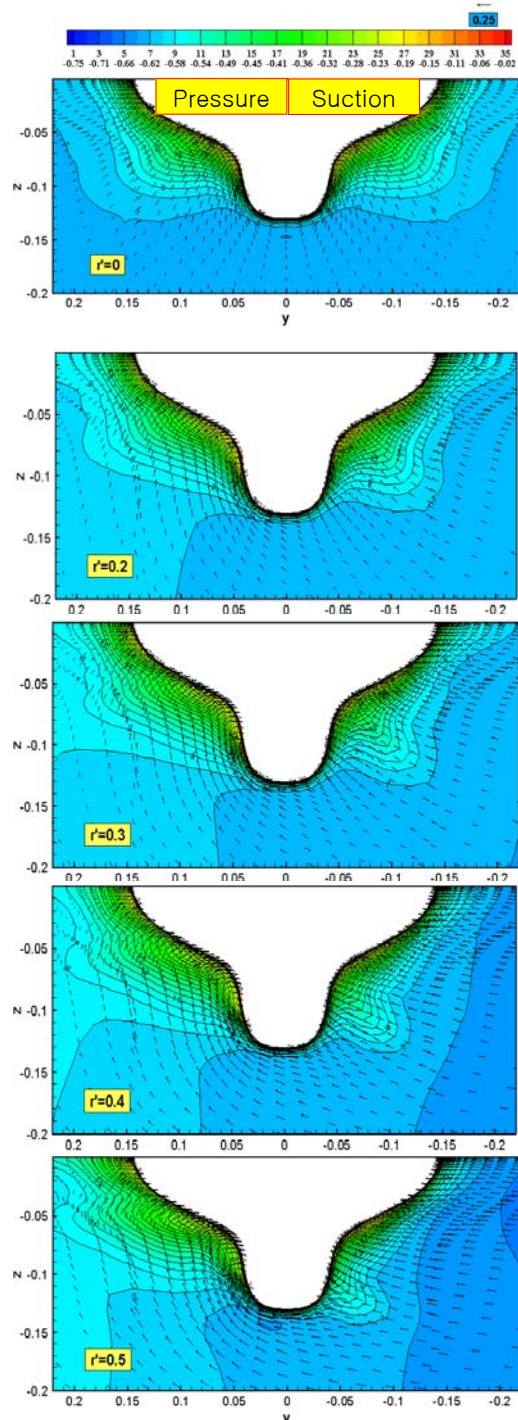


Fig. 10 Comparison of axial velocity contours and transverse velocity vectors at st. 2

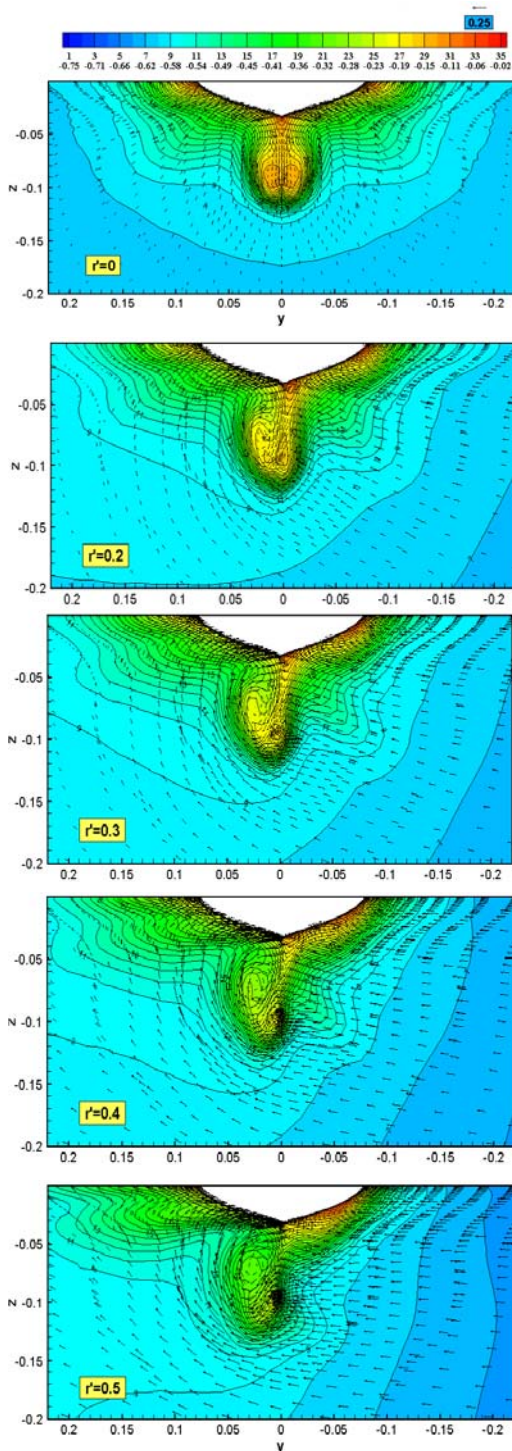


Fig. 11 Comparison of axial velocity contours and Transverse velocity vectors at st. 0.35

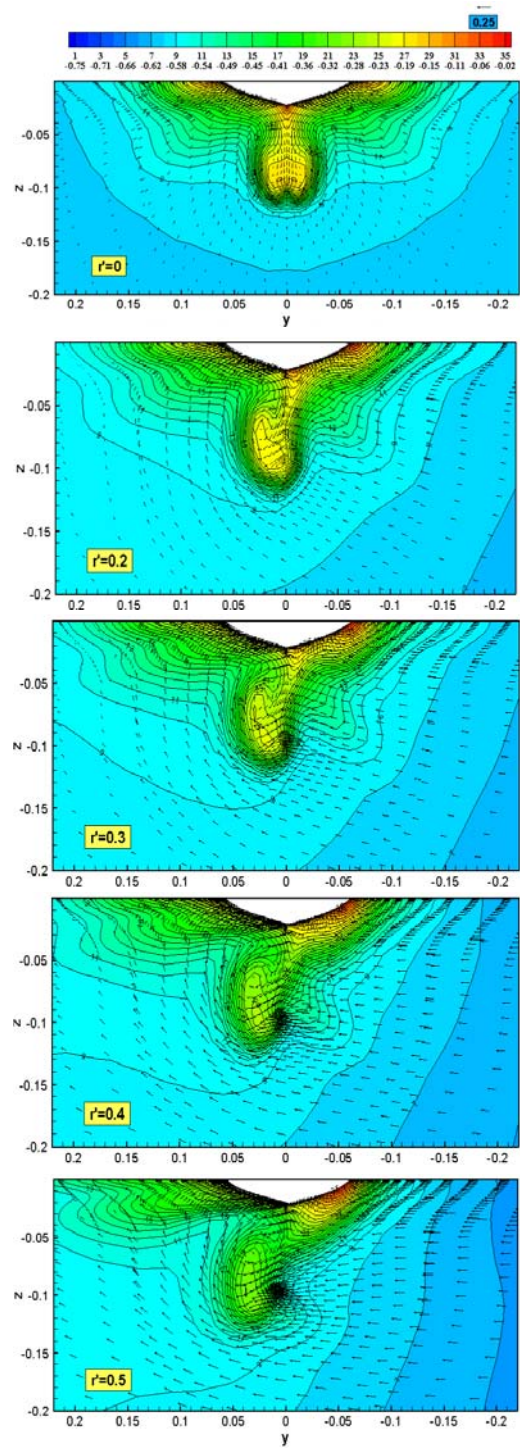


Fig. 12 Comparison of axial velocity contours and transverse velocity vectors at AP



이것은 선수 동요 각속도가 증가함에 따라 그 크기가 작아지고 선저 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 수선면 근처 선체 주위의 경계층 두께도 감소하는 것으로 보인다. 유체가 유입되는 좌현도 선미 부근으로 오면서 선체 주위의 경계층이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 St. 0.35(Propeller Plane)와 AP에서도 확인할 수 있다. 그리고 St. 0.35(Propeller Plane)와 AP에서는 선체 중앙면 근처에 강한 보텍스가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 유체가 유입되는 방향, 즉 선회하는 방향과 같은 방향 위치에 생성되는데, 이는 직진 상태에서 생긴 빌지 보텍스보다 훨씬 강한 형태로, 선미부로 갈수록 선체 중앙부로부터 멀어지는 것을 확인할 수 있다.

또한 선수 동요 각속도가 증가함에 따라 보텍스의 세기는 증가하고 그 중심이 선체 중앙부로부터 점점 멀어지는 것을 확인할 수 있다.

김우전 등(2001(2))에서는 사항 중인 모형선 주위의 선미 유동장 분포를 실험을 통해 계측한 바가 있는데 모형선이 일정한 편류각을 가지고 사항 중에는 위에서 언급한 선체 중앙부의 생성되는 보텍스가 압력면(Pressure side)이 아닌 흡입면(suction side)에 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 압력면(Pressure side)이라고는 할 수 있지만 모형선이 선회 시에는 압력면(Pressure side)을 따라 이동하는 유체의 속도가 흡입면(suction side)의 속도보다 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 7의 선회 운동 시 선체 주위의 자유수면의 속도 분포에서도 확인할 수 있다.

### 4.3 선체 유체력

선회 시험(CMT) 중 CFD 프로그램을 이용한 점성유동 계산 결과 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (2)와 같이 무차원화 되었다. 여기서  $X'$ ,  $Y'$ ,  $N'$ ,  $r'$  은 각각 종·횡방향 힘, 선수동요 방향 모멘트 및 각속도의 무차원 값이다. CFD 프로그램을 이용한 계산결과와 모형시험을 통해 표현되는 횡방향 힘과 모멘트는 각각 식(3)과 같이 표현된다. CFD 프로그램으로 계산된 유체력과 모형시험의 결과를 비교할 때 모형시험의 결과에서  $m' \cdot r'$

와  $m'x_G' \cdot r'$ 의 값을 더해 주어야 한다.

$$\begin{aligned} X', Y' &= X, Y / \left( \frac{1}{2} \rho L^2 U^2 \right) \\ N' &= N / \left( \frac{1}{2} \rho L^3 U^2 \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u', v' &= u, v / (U) \quad r' = r / \left( \frac{U}{L} \right) \\ Y_{CFD}' &= Y_r' \cdot r' + Y_{rrr}' \cdot r'^3 \end{aligned} \quad (3)$$

$$N_{CFD}' = N_r' \cdot r' + N_{rrr}' \cdot r'^3$$

$$Y_{Exp}' = (Y_r' - m') \cdot r' + Y_{rrr}' \cdot r'^3$$

$$N_{Exp}' = (N_r' - m'x_G') \cdot r' + N_{rrr}' \cdot r'^3$$

Figs. 13~14 에서는 CFD 프로그램을 이용하여 계산된 무차원화 된 선수동요 각속도에 따른 선체에 작용하는 유체력과 모형시험의 결과를 비교하였다(Shin et al 2008, SIMMAN 2008). 그리고 VOF 법을 이용하여 자유수면을 고려한 계산결과와 자유수면의 효과를 고려하지 않은 이중모형(double body) 계산 결과와의 비교를 나타낸다.

CFD 프로그램을 이용한 점성 유동 계산에는 Bare Hull이 사용되었고, 모형시험에서는 프로펠러와 타가 모두 부착된 상태로 모형시험을 진행하여 직접적인 비교는 어려울 것으로 보인다. 모형 시험 결과와 비교해 보았을 때 CFD의 결과와 프로펠러와 타를 포함한 모형시험의 결과에서 정량적인 차이는 있으나, Bare Hull로 CMT를 실시한 일본의 NMRI(National Maritime Research Institute)의 모형 시험 결과와 비교하였을 때 횡방향 힘은 유사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 선수동요 방향 모멘트는 약간의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. CMT와 같은 모형 시험에서는 선수동요 각속도가 커질수록 선체주위 유동의 비정상 특성이 많이 나타나지만, CFD 프로그램을 이용한 점성유동 계산은 정상상태로 가정하여 수행되었기 때문에 CFD 계산 결과와 모형 시험의 유체력의 차이가 발생된 것으로 판단된다. 그리고 선체에 부착되는 모형 프로펠러

와 타의 유무도 계산결과에 큰 차이를 발생시키는 원인이 된다. 그러나 선수동요 각속도가 증가함에 따라 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 정성적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 자유수면을 고려한 계산과 고려하지 않은 계산 결과에서 큰 차이를 보이지 않지만, 선수동요 각속도가 증가함에 따라 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

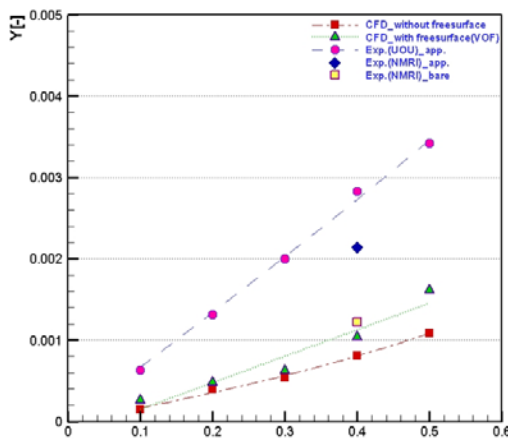


Fig. 13 Comparison of lateral force( $Y'$ ) of Exp. and CFD

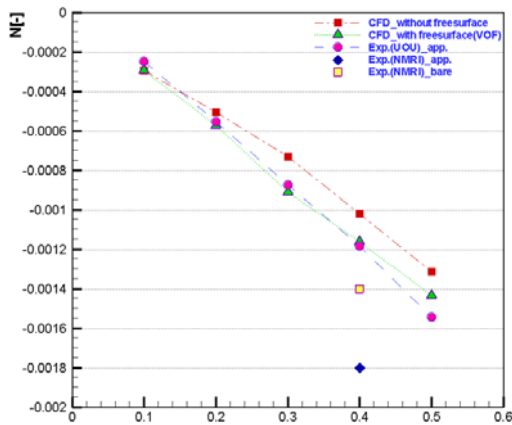


Fig. 14 Comparison of yaw moment ( $N'$ ) of Exp. and CFD

5. 결론

본 논문에서는 조종성능 추정을 위하여 실시되는 Circular Motion Test를 상용 CFD 프로그램

을 이용하여 점성 유동해석을 실시하였다. 선회 운동 시 발생하는 자유수면 효과를 고려하기 위해 VOF법을 이용하여 선박이 선회운동 시 발생하는 파형을 확인하였다.CMT의 점성 유동 계산에 앞서 VOF법을 이용한 저항 및 선체 주위의 유동장 계산을 통해 저항값과 선측파형을 모형시험 결과와 비교하였고, 선미 유동장을 비교하여 계산에 사용된 격자계와 VOF법을 이용한 점성 유동 계산 방법의 정도를 확인하였다.

CMT와 같이 선박의 선회 운동에 대한 VOF법을 이용한 점성유동 해석을 실시하여 선수동요 각속도에 따른 선체 주위 자유수면 상의 파형변화를 확인할 수 있었다. 그리고 직진 상태와는 달리 선수 동요 각속도가 존재하는 선회 운동 시에는 좌현과 우현 사이에 상당한 파형의 차이의 발생을 확인하였다. 선수동요 각속도의 증가에 따라 좌현과 우현의 차이가 더욱 크게 발생하였고, 선수에서 뿐만 아니라 선체의 중앙부에서도 파형의 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

선미부의 유동장 계산에서는 선회 운동 시 선미부에 생성되는 보텍스의 형성 과정을 확인하였다. 직진상태에서는 같은 크기를 가지며 반대 방향으로 회전하는 두 개의 발지 보텍스가 관찰되지만, 선박이 선회 운동 시에는 유체가 유입되는 압력면(Pressure side)에서의 유동 속도가 감소함에 따라 선회 방향의 선미 보텍스는 크게 강화되고, 반대 방향의 선미 보텍스는 거의 소멸되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 선수동요 각속도가 증가함에 따라 선미에 생성된 보텍스의 중심이 선체 중앙부로부터 조금씩 멀어 지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 추후 선미 유동장 계속 실험을 통해 확인이 필요한 부분이다.

점성 유동 계산을 통해 얻어진 선체 유체력을 모형시험 결과와 비교하였다. 선수동요 각속도가 증가함에 따라 선체에 작용하는 힘과 모멘트는 정성적으로 증가하는 것을 확인하였다. 모형시험 시에는 타와 프로펠러가 모두 부착된 상태의 결과이기 때문에 직접적인 비교는 어렵지만, CFD의 계산 결과가 나선으로 모형시험을 실시한 결과와 횡방향 힘에서 유사한 결과를 보이거나 선수동요 방향 모멘트에서는 약간의 차이를 보이는 것을 확인하

였다. 향후 나선에 대한 추가적인 모형시험을 통해 계산결과와의 비교가 필요할 것으로 판단되며, 선체에 타와 프로펠러를 모두 포함한 격자 생성과 이를 이용한 점성 유동 계산이 필요할 것이다. 그리고 KVLCC1과 같은 저속 비대선의 좀 더 정확한 점성 유동 해석을 위해 벽면 근방 난류 경계층을 보다 정확히 모사할 수 있는 Reynold stress model 과 같은 고차의 난류 모델 도입의 필요성을 확인하였다.

**참 고 문 헌**

- Kim,T.Y. and Hyun, B.S. 2008 "Analysis of Flow Field Including Bodies Steadily Moving Around the Free-surface by FLUENT-VOF Method" Journal of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 1 pp.9-14.
- Kim, W.J., Van,S.H., Kim, D.H., and Lee, C.J. 2000 "Experimantal 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.
- Kim, W.J., Kim, D.H. and Van,S.H. 2001(1) "Comparison of Turbulence Models for the Prediction of wake around VLCC Hull Forms" Journal of Ship & Ocean Technology v.5, no.2 pp.27-49.
- Kim, W.J., Kim, D.H., Kim, Y.G., Kim, S.Y. and Van,S.H. 2001(2) "An Experimantal Study on Stern Flow around a VLCC model with Drift Angle" Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 38, No. 1, pp. 52-61.
- Cho, Y.R., Yoon, B.S., Yum, D.J. and Lee, M.S. 2007 "Prediction of Ship Manoeuvrability in Initial Design Stage Using CFD Based Calculation" Journal of Ship & Ocean Technology v.11, no.1 pp.11-24.
- Park, I.R., Kim, W.J., Kim, J. and Van,S.H. 2005, "A Study on a VOF Method for the Improvement of Free Surface Capturing" Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 42, No. 2, pp. 88-97.
- Shin, H.K., Jung, J.H., and Lee, H.Y. 2009 "Prediction of Maneuverability by Circular Motion Test" Journal of the Society of Naval Architects of Korea Vol. 46, No. 3, pp. 259-267.
- International Towing Tank Conference2008 "Final Report and Recommendation to the 25th ITTC" Proceedings of 25rd ITTC, Vol. 1, pp. 161-167.
- International Towing Tank Conference 2008 "Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods SIMMAN 2008".
- SNAME,1989, Principle of Naval Architecture, Vol. III, pp. 222-224.



<신 현 경>

<정 재 환>