

## U-튜브형 횡동요 감쇄 탱크의 자유수면 해석기법 개발에 관한 연구

이상의\*\*

\* 창원대학교 메카융합공학과 조교수

Development of Numerical Computation Techniques  
for the Free-Surface of U-Tube Type Anti-roll Tank

Sang-Eui Lee\*\*

\* Assistant Professor, Department of Mechatronics Convergence Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea,

**요 약 :** 지난 10년간 선박의 횡동요 복원력 상실에 의한 해양사고가 지속해서 증가하고 있어, 횡동요 운동을 효과적으로 줄일 수 있는 장치가 필요한 실정이다. 횡동요 감쇄 탱크는 단순한 설치만으로 횡동요 저감을 가져오는 대표적인 수동형 제어장치로 그 장점이 널리 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 U-튜브형 횡동요 감쇄 탱크의 수치해석 기법을 개발하고자 한다. 특히, 해석기법의 검증에 위해 자유수면 높이를 실험을 통해 예측하였다. 수치해석기법은 메쉬 의존성, 난류모델 ( $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , Reynolds Stress Model), 시간 간격 크기 및 반복횟수 등의 영향을 비교하여 개발하였다. 최종적으로 개발된 해석기법은 Realizable  $k-\epsilon$ 이 난류 모델에 10-2s 수준의 시간 간격 크기와 15회의 반복횟수를 적용하였다. 2가지의 U-튜브형 감쇄 탱크의 조건에서 예측된 자유수면 높이를 이용하여 개발된 해석기법을 검증하였다. 본 연구의 수치해석은 RANS 기반 상용 해석 Solver인 STAR-CCM+ (ver. 17.02)을 이용하였다.

**핵심어 :** U-튜브형 횡동요 감쇄 탱크, 자유수면 효과, VOF법, 전산유체역학, 유한체적법

**Abstract :** Marine accidents due to a loss of stability, have been gradually increasing over the last decade. Measures must be taken on the roll reduction of a ship. Amongst the measures, building an anti-roll tank in a ship is recognized as the most simple and effective way to reduce the roll motion. Therefore, this study aims to develop a computational model for a U-tube type anti-roll tank and to validate it by experiment. In particular, to validate the developed computational model, the height of the free surface in the tank was measured in the experiment. To develop a computational model, the mesh dependency test was carried out. Further, the effects of a turbulence model, time step size, and the number of iterations on the numerical solution were analyzed. In summary, a U-tube type anti-roll tank simulation had to be performed accurately with conditions of a realizable  $k-\epsilon$  turbulence model, 10<sup>-2</sup>s time step size, and 15 iterations. In validation, the two cases of measured data from the experiment were compared with the numerical results. In the present study, STAR-CCM+ (ver. 17.02), a RANS-based commercial solver was used.

**Key Words :** U-tube Type Anti-roll Tank, Free Surface Effect, Volume of Fluid Method, Computational Fluid Dynamics, Finite Volume Method

## 1. 서론

선박의 횡동요 복원력 상실에 의한 해양사고가 증가 (KMST, 2019)하고 있어 사고 저감을 위한 효과적인 방안이 필요하다. 널리 알려진 횡동요 저감 장치는 빌지 킬(Bilge Keel), 자이로스코프 (Gyroscope Stabilizer), 타(Rudder Action), 제트 플랩(Jet Flap), 횡동요 탱크(Roll Tanks), 핀(Fin) 등이 있으나 단순 설치만으로 저항 증가 없이 횡동요 저감이 가능한

장치는 ART(Anti-roll Tank: 횡동요 감쇄 탱크)가 대표적이다 (Bhattacharyya, 1978).

ART는 자유수면형과 U-튜브형으로 분류할 수 있고, 작동 방식에 따라 수동형과 능동형으로 분류할 수 있다. ART는 단순 설치만으로 운항 상태와 무관하게 작동하며, 수동형의 경우, 운용에 있어 추가 비용이 발생하지 않는 것이 장점이다. 그러나 선체 내부 공간을 차지하고 과도 운동 시 자유수면 효과로 충격력이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 특히, ART의 양쪽 탱크 천정에 슬래밍(Slamming)이 발생하는 경우, ART의 횡동요 저감 효과가 급격히 감소하는 현상이 발

† euui2000@changwon.ac.kr, 055-213-3844

생하기 때문에, 탱크의 높이 설계가 아주 중요한 것으로 알려져 있다.

ART 관련 연구는 크게 모션 벤치(Motion Bench) 또는 모션 플랫폼(Motion Platform)을 이용한 실험과 전산역학을 이용한 수치해석 연구로 나눌 수 있다.

초기의 ART 연구는 실험(Frahm, 1911; Vasta et al., 1961; Bosch and Vugts, 1966; Stiger, 1966; Field and Martin, 1976; Webster et al., 1988; Ikeda and Yosiyama, 1991; Bass, 1998; Lew et al., 2003)이 주류를 이루었고, 전산역학의 발전과 계산기 성능의 급격한 개선으로 수치해석 기법을 적용한 연구가 활발히 진행되었다.

Yamaguchi and Shinkai(1995)는 유한차분법(Finite Difference Method)을 이용하여 규칙과 중 U-튜브형 ART 연구를 수행하였으나, 실험과의 비교 검증에는 실패하였고, Zong et al.(1998)은 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하여 2차원 U-튜브형 ART 연구를 수행하였으며, 높은 정도의 전산해석에는 난류 모델이 필요함을 밝혔다. Kleefsman(2000)은 ComFlo를 이용하여 U-튜브형 ART 해석에 VOF(Volume of Fluid) 기법을 적용하여 MARIN 실험 결과(Field and Martin, 1976)와 비교 검증하였다.

Hashimoto(2010) U-튜브형 ART에 MPS(Moving Particle Semi-implicit) 기법을 적용하여 횡동요에 미치는 효과를 연구하였고, Kim and Lee(2018)는 MPS를 이용하여 자유수면형 ART가 횡동요에 미치는 영향을 연구하였다. Souto-Iglesias et al.(2004)은 자유수면형과 U-튜브형이 동시에 적용된 C형 ART에 SPH(Smooth Particle Hydrodynamics)법을 적용하여 실험 결과와 비교 검증하였다.

Kerkvliet et al.(2014) RePRESCO를 이용하여 2차원 및 3차원 U-튜브형 ART 시뮬레이션을 수행하여 MARIN 실험 결과(Field and Martin, 1976)와 비교 검증을 수행하였으며, Bernal-Colio et al.(2021)은 OpenFoam을 이용하여 Souto-Iglesias et al.(2004) 연구에 적용한 C형 ART를 이용하여 해석기법을 개발하고 실험 결과와 비교하였다.

초기의 ART 연구는 실험을 수행하여 강제 횡동요 시 ART가 발생시키는 모멘트 및 모멘트 곡선을 계측한 후, 이를 이용하여 개발된 수치해석기법을 검증하는 수준이었다. 그러나 최근의 연구는 자유수면에 의한 횡동요 감쇄 저감 효과를 분석하기 위해 자유수면 추적기법을 이용하여 자유수면의 형상변화까지 관찰하는 연구가 이어지고 있다. 따라서 본 연구에서는 ART의 자유수면 형상을 구현하기 위해 실험과 수치해석을 동시에 수행하여 계측된 자유수면이 구현되는 해석조건을 찾자 한다.

본 연구에서는 U-튜브형 ART 해석기법 개발을 위해 모션 벤치를 이용해 ART 실험을 수행하고 ART의 탱크 내부에 파

고계를 설치하여 자유수면의 높이를 계측하였다. 계측된 자유수면의 높이는 수치해석 기법개발을 위한 검증에 사용하였다. 본 연구는 해석기법 개발을 위해 매쉬 의존성 시험, 난류 모델 변경, 시간 간격 크기 및 반복횟수 조절 등을 수행하였다. 상세한 내용은 2-3장에서 논의하도록 하겠다.

## 2. 수치해석모델

### 2.1 대상구조물

본 연구에서는 U-튜브형 ART를 사용하였으며, 형상은 Fig. 1에 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 ART는 축척 모델이며, 적용된 축척률( $\lambda = 13500/806$ )은 16.75이다. 적용된 좌표계시스템은 Fig. 2와 같다.

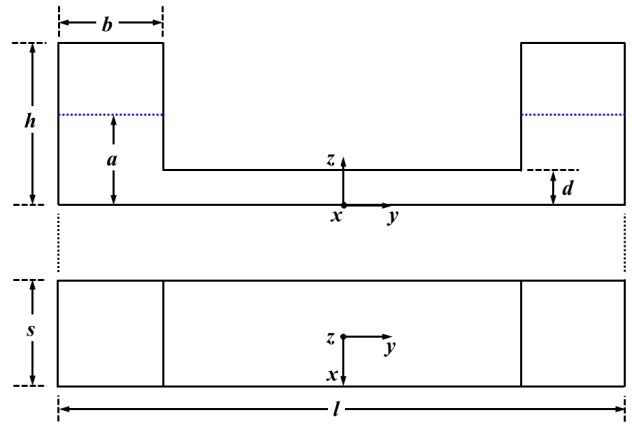


Fig. 1. Target structure, U-type ART.

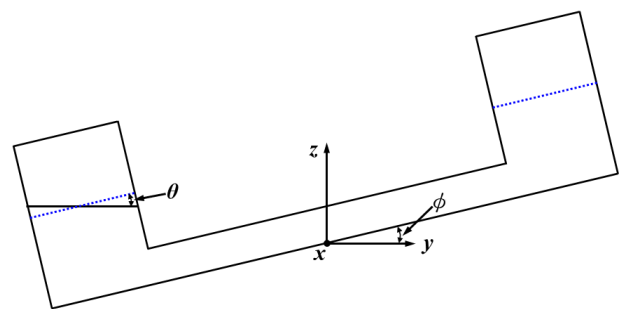


Fig. 2. Coordinate system.

Table 1. Principal dimensions of ART model

$l$ (mm)	$h$ (mm)	$b$ (mm)	$s$ (mm)	$d$ (mm)	$a$ (mm)
806	230	149	179	51	98, 130

이상의

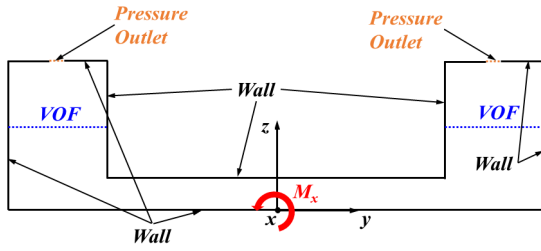


Fig. 3. Boundary conditions for the open case.

## 2.2 경계조건

본 연구에서는 ART 외부에 점착(No-slip) 경계조건을 적용한다. 하지만 실험 결과와의 비교를 위해 ART 탱크가 완전히 밀폐된 조건(Closed Case)과 일부가 열린 조건(Open Case) 2가지로 구분하여 경계조건을 설정한다.

ART의 횡동요 운동은 아래와 같이  $x$ 축을 기준으로 강제 정현 운동을 설정하였다.

$$M_x = \phi \sin(\omega t) \quad (1)$$

여기서  $\phi$ 는 횡동요 각도,  $\omega$ 는 각속도,  $t$ 는 시간이다.

ART의 거동에 따른 좌우 탱크에서의 수위 변화를 추적하기 위해 Volume of Fluid(VOF) 기법을 적용하였다.

본 연구에서 적용한 경계조건을 정리하면 다음과 같고, Fig. 3에 열린 조건의 ART 경계조건을 예로 나타내었다.

- 밀폐 조건: 전체 ART 외부 점착조건 적용
- 열린 조건: 날개 상부 Pressure Out ( $20 \times 20 \text{ mm}$ ) 적용  
나머지 ART 외부 점착조건 적용

## 2.3 유동해석

본 연구에서는 U-튜브형 ART의 수치해석에 3차원 정상상태 비압축성 점성유동 조건을 적용하였다. 지배방정식은 질량과 모멘텀 보존방정식으로 아래와 같다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{Du_j}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_i} + f_j \quad (3)$$

여기서  $u_j = (u, v, w)$ ,  $x_j = (x, y, z)$ ,  $f_j$ 는 체적력,  $\rho$ 는 밀도,  $\nu$ 는 동점성계수를 나타낸다.

ART 탱크 내부의 자유 수면을 효과적으로 추적하기 위하여 유체 경계면의 위치와 상(Phase)간의 분포를 용적분율(Volume Fraction)로 구분하는 VOF 기법(Hirt and Nichols, 1981; van Daalen et al., 2000)을 적용하였다. 각 상의 용적분율,  $\alpha_i$ 는 다음과 같이 정의하고, 메쉬 내의 전체 용적분율의 합은 1로 정의한다(STAR-CCM+, 2022).

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (5)$$

여기서,  $V_i$ 는 메쉬의  $i$ 번째 상의 체적, 메쉬의 전체 체적,  $N$ 은 상의 수이다.

## 3. 수치해석기법 개발

U-튜브형 ART 내부 유동은 선박의 횡동요에 의해 양쪽 탱크로 왕복 운동한다. 일반적으로 아주 작은 횡동요가 긴 주기 동안 발생하는 경우, 관성에 의해 내부 유동이 발생하고 이에 따라 수위가 변화한다. 이러한 조건에서는 점성의 영향을 고려하지 않은 유동으로 가정할 수 있다. 그러나 본 연구의 해석기법개발에 사용된 실험 조건에서는 ART 양쪽 탱크의 외벽과 천정에 슬로싱과 슬래밍이 발생하지 않으면서도 ART 내부의 엘보우(Elbow)에서 유동이 섞이는 현상이 관찰되었다. 따라서 본 연구에서는 비점성 유동이 아닌 난류모형을 적용한 해석기법을 개발하고자 한다.

### 3.1 메쉬 의존성 시험

본 연구에 적용된 메쉬 모델의 체적 구획은 Fig. 4와 같다. 메쉬 생성은 크게 3가지 구획으로 나누었으며, 생성방법은 메쉬 크기에 비례하도록 설정하였다. 상세 정보는 Table 2와 같으며, 설정에 따라 생성된 5가지 메쉬 모델은 Table 2의 그림과 같다. 생성된 메쉬 수는 37~260만개 수준이다.

메쉬 의존성 시험에 적용한 수치해석의 경계조건은 ART 날개가 밀폐된 상태에서, 횡요 각,  $\phi = 5^\circ$ , 횡요 주기,  $T = 11.707s$ , ART의 수위,  $a = 130mm$ 이다. 수치해석은  $k-\epsilon$  난류 모델에 시간 간격 크기 0.001s와 반복횟수 10을 적용하였으며, 전체 계산은 10주기(120sec) 동안 수행하였다.

Fig. 5는 메쉬 모델에 따른 자유 수면 시계열 위치 변화를 비교하여 나타내었다. 100만 이하의 메쉬 모델에서는 상대적으로 큰 수준의 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

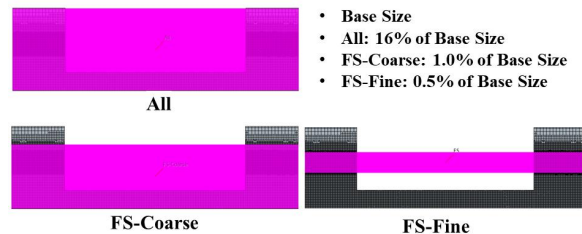


Fig. 4. Example of a generated mesh model.

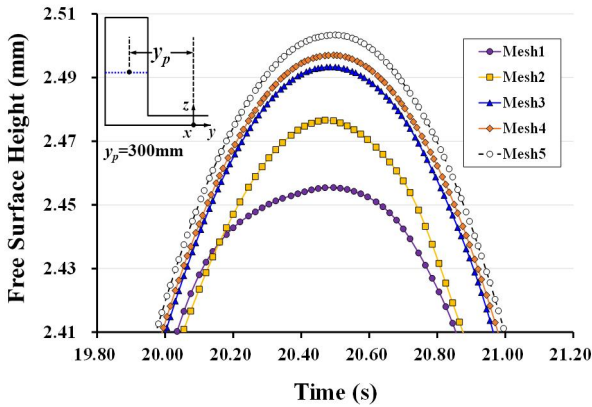


Fig. 5. Free surface profile for the mesh model.

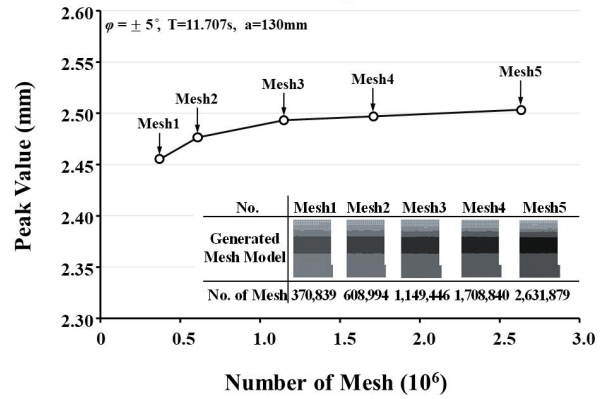


Fig. 6. Effect of the mesh model on the peak value.

Fig. 6은 Fig. 5의 시계열에서 최고값 (Peak Value)을 추출하여 비교하였다. Mesh3의 조건이 계산 정도를 확보하는 동시에 빠른 계산이 가능할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 최적의 메쉬 생성 조건은 Mesh3으로 선정한다.

Table 2와 Fig. 6의 결과를 살펴보면 FS-Fine 영역의 최소 격자 크기와 메쉬 모델에 따른 결과값의 차이(0.05mm)를 단순 비교하면 격자 크기의 3.3-6.7% 수준에 해당하는 것으로 분석된다. 이는 ART가 발생시키는 모멘트 크기를 계산함에 있어 거의 영향이 없을 것으로 판단되나, 자유수면의 형상을 모사하기 위한 메쉬 모델 간의 차이에서는 의미가 있다고 할 수 있다.

### 3.2 난류 모델

본 연구에서는 U-튜브 형 ART 내부 유동을 모사하기 위해 RANs (Reynolds-averaged Navier-Stokes Equations)을 이용한 난류 모델을 적용한다.

Table 2. Conditions of mesh convergence

Mesh Size	Mesh1	Mesh2	Mesh3	Mesh4	Mesh5
Base Size, B (mm)	300	250	200	175	150
All (% of B)	$x, y, z$ -axis = 16.0				
FS-Coarse (% of B)	$x, y, z$ -axis = 1.0				
FS-Fine (% of B)	$x, y, z$ -axis = 0.5				
No. of Mesh (Million)	0.37	0.61	1.15	1.71	2.63
Generated Mesh Model					

본 절의 수치해석 경계조건은 3.1절과 같고, 난류 모델만 변경하였다. 검토한 난류 모델은 총 3가지로, 선형 Eddy Viscosity 접근법에 기초한 Two Equation 모델인  $k-\epsilon$  및  $k-\omega$  모델과 개별 Reynolds Stress Tensor를 직접 계산하는 RSM(Reynolds Stress Transport Model)이다. 각 모델에 적용한 설정은 Table 3과 같고 언급되지 않은 설정은 모두 같다.

Fig. 7은 3가지 난류 모델에 대한 자유 수면의 시계열 위치 변화를 비교하였다. 난류 모델 변경에 따른 결과 차이는 크지 않은 것으로 확인되어 이후 해석에서는 상대적으로 빠른 계산 수행이 가능한  $k-\epsilon$  난류 모델을 적용한다.

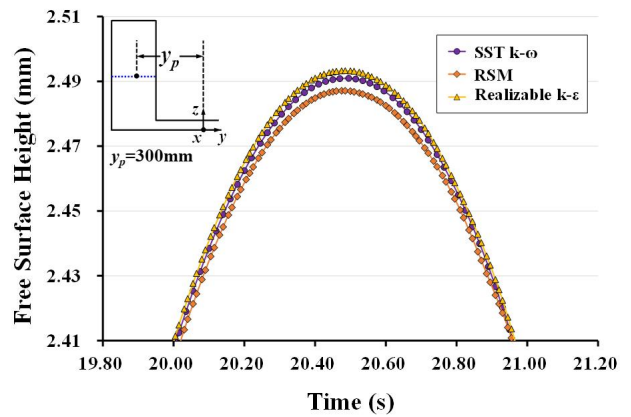


Fig. 7. Free surface profile for turbulence models.

Table 3. Conditions of turbulence model

	TM1	TM2	TM3
Turbulence Model	Realizable $k-\epsilon$	SST $k-\omega$	RSM
Wall Treatment	Two-layer	Blended	Two-layer

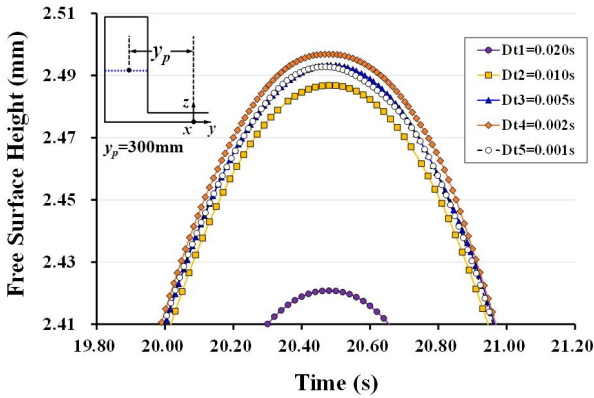


Fig. 8. Free surface profile for the time step size.

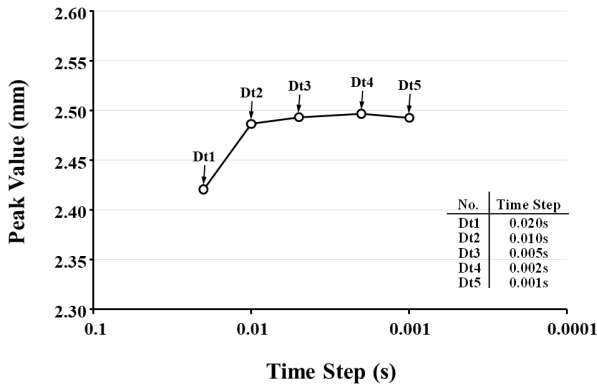


Fig. 9. Effect of a time step size on the peak value.

Table 4. Conditions of time step size

	dt1	dt2	dt3	dt4	dt5
Time Step Size (s)	0.020	0.010	0.005	0.002	0.001

### 3.3 시간 간격 크기

일반적으로 쇄파(Wave Breaking), 슬로싱(Sloshing) 등과 같은 과도 운동 수치해석에서는 정확한 수치 해를 구하기 위하여 CFL(Courant Friedrichs Lewy) 수에 따른 시간 간격 크기를 적용하는 것이 필요하다(de Moura and Kubrusly, 2013). 하지만 본 연구의 대상 구조물인 U-튜브형 ART는 상대적으로 긴 주기로 운동하고 있어, 과도 운동이 일어나지 않아 CFL 수에 따른 시간 간격 크기 조정이 필요하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서 본 절에서는 고정된 시간 간격 크기를 적용한다.

앞서 선정된 메쉬 모델을 기반으로 시간 간격 크기에 따른 해석을 수행하였다. 수치해석의 경계조건은 3.1절의 조건과 같고, 3.2절에서 선정한  $k-\epsilon$  모델에 시간 간격 크기만 변경하였다. 상세한 내용은 Table 4에 나타내었다.

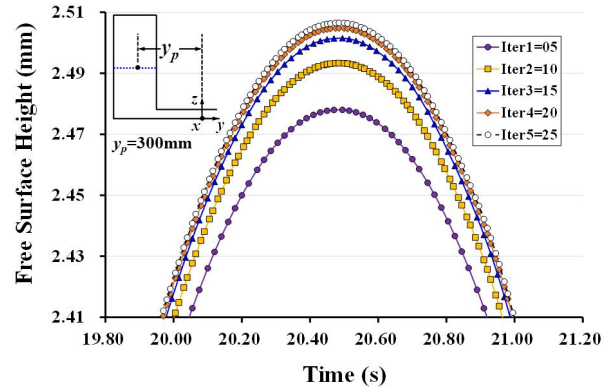


Fig. 10. Free surface profile for the number of iterations.

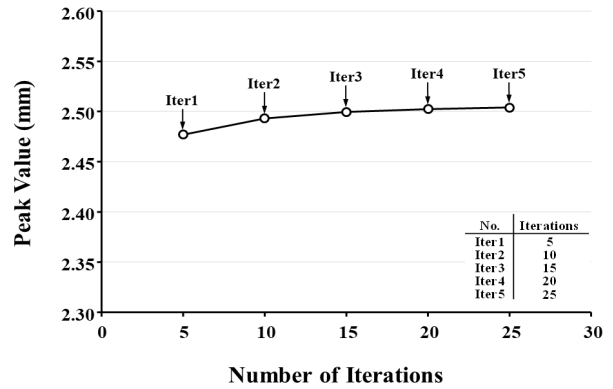


Fig. 11. Effect of the number of iterations on the peak value.

Table 5. Conditions of the number of iterations

	Iter1	Iter2	Iter3	Iter4	Iter5
No. Iterations	5	10	15	20	25

Fig. 8은 5가지 시간 간격 크기에 대한 자유 수면의 시계열 위치 변화를 비교하였다. Dt1(0.02s)에서는 상대적으로 큰 오차가 발생하는 것을 확인하였으며, 이외에서는 큰 변화가 없이 유사한 수준의 결과를 보였다.

Fig. 9은 Fig. 8의 시계열에서 최고값을 추출하여 비교하였다. Dt1(0.02s)을 제외하면 본 ART 해석에서는 0.01s 이상에서는 일정 수준 이상의 정확도가 확보되는 것을 확인하였다. 따라서, 최적의 시간 간격 크기는 Dt2(0.01s)로 선정한다.

### 3.4 반복횟수

비정상상태 유동의 수치해석에서는 반복횟수가 계산의 정확도에 미치는 영향이 크기 때문에 설정된 잔차(Residual)를 만족하면 다음 시간 스텝으로 진행하는 해석을 수행한다. 특히, 이러한 해석에서는 CFL 수에 따른 시간 간격 크기



조정(Adaptive Time Stepping) 기법을 적용하는 것이 필수적이다. 그러나 본 연구의 대상 구조물인 U-튜브 형 ART는 쇠파 및 슬로싱 같은 과도 운동이 일어나지 않아 고정된 반복횟수를 적용한다.

앞서 선정된 메쉬모델, 난류모델, 시간 간격 크기를 바탕으로 반복횟수를 조정하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 경계조건은 3.1절과 같으며, 상세한 조건은 Table 5에 나타내었다.

Fig. 10은 5가지 반복횟수에 대한 자유 수면의 시계열 위치 변화를 비교하였다. Iter1과 Iter2는 상대적으로 큰 오차를 보이며, Iter3, Iter4, Iter5 사이에는 결과가 유사하다. 따라서 15회 이상의 반복횟수가 주어지면 잔차가 일정 수준 이상으로 수렴하여 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 10의 시계열에서 최고값을 추출하여 비교하였다. 본 ART 해석에서는 반복횟수가 15회 이상일 때 일정 수준 이상의 정확도를 준다. 따라서 최적의 반복횟수를 Iter3(15)로 선정한다.

#### 4. 기법의 검증

본 장에서는 개발된 해석모델 (Table 6)을 이용하여 실험 결과와 비교 검증한다. 검증에 사용된 U-튜브 형 ART 실험은 모션 벤치(Fig. 12)를 이용하여 수행하였다. 실험은 밀폐 및 열린 상태에서 수행하였으며, 실험 및 수치해석에 적용된 조건은 Table 7과 같다. 자유수면의 변화를 추적하기 위하여 ART의 오른쪽 탱크 내부에 파고계를 고정하였다. ART가 모션 벤치 위에서 강제동요하는 동안 파고계를 통해 자유 수면의 높이를 측정하였다. Table 7에 제시된 횡동요 각

과 주기는 측정된 값 중, 초기 상태를 제외한 값의 최대, 최소값을 추출하여 평균하였다. 횡요각은  $-5.029^\circ$ 에서  $+5.034^\circ$ 로 나타났으나, 본 연구에서는  $\pm 5^\circ$ 로 가정하였다. 주기의 경우, 측정된 평균값을 그대로 사용하였다.

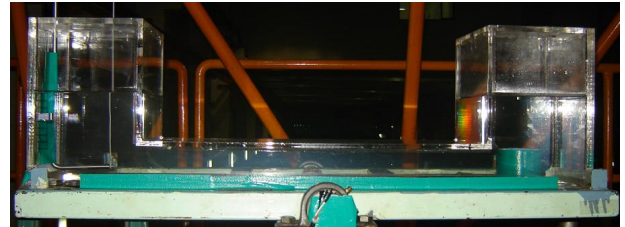


Fig. 12. Motion bench experiment with U-type ART model.

Table 6. Conditions of the U-tube Type ART simulation

TM1	
Mesh Model	Mesh3 (B=200mm)
Turbulence Model	Realizable $k-\epsilon$
Wall Treatment	Two-layer
Time Step Size (s)	$10^{-2}(0.01)$
Number of Iteration	15.

Table 7. Conditions of U-tube type ART experiment

Condition	$\phi$ (°)	T (s)	a (mm)
Open	+5.0	11.360	98.0
Closed	$\pm 5.0$	11.707	130.0

#### Validation of CFD Model

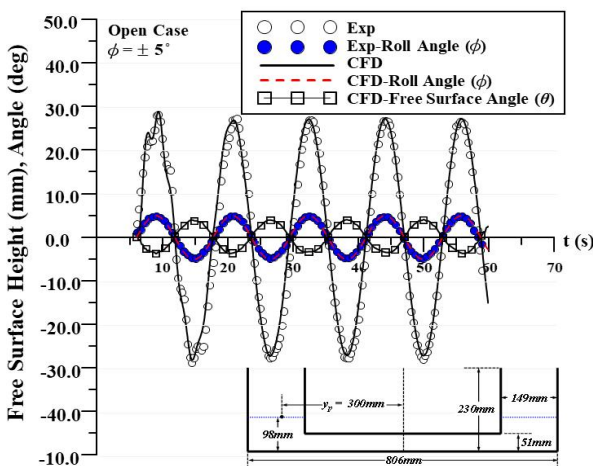


Fig. 13. CFD and experiment comparison in open case.

#### Validation of CFD Model

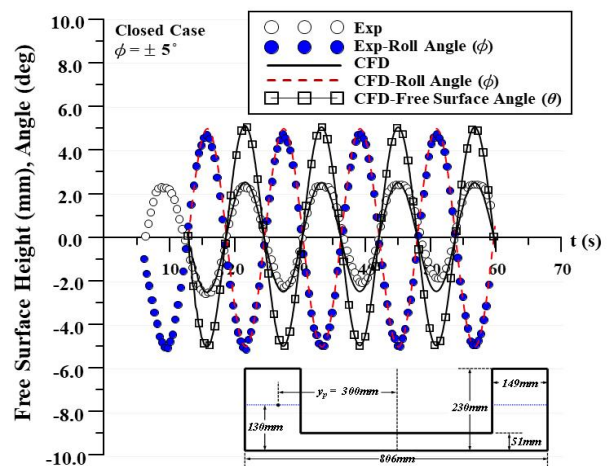


Fig. 14. CFD and experiment comparison in closed case.

Fig. 13은 열린 상태의 실험과 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 실험에서는 첫 주기에 자유 수면이 출렁이는 현상이 발생한 후, 2주기 이후부터 유동이 안정화되었으며, 수치해석에서도 자유수면 출렁임이 모사 되었고, 이후 결과 도 실험과 높은 정도로 일치하고 있다.

Fig. 14는 밀폐 상태의 실험과 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 수치 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 비교적 일치하는 것을 확인하였다. 그러나 40초부터 CFD와 실험 결과의 오차가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 ART의 탱크가 충분한 밀폐가 되지 않아 발생하는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구는 U-튜브 형 ART를 수치 해석적으로 정밀히 모사할 수 있는 기법개발을 목적으로 수행되었다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 CFD 이용하여 U-튜브 형 ART의 수치 해석 기법을 개발하였다.
- (2) 수치해석기법 개발을 위해 메쉬 의존성 시험을 수행하였으며, 난류 모델, Time Step 크기 및 Iteration 수 등의 영향을 비교 분석하였다. 결과를 요약하면 메쉬 모델은 Mesh3 조건인 B=200mm가, 난류 모델은 Realizable  $k-\epsilon$ 이, 시간 간격 크기는  $10^{-2}$ s (0.01s)로, 반복횟수는 15로 선정되었다.
- (3) 2가지 (열린, 밀폐) 상태에서 개발된 수치해석기법을 수행하고 실험 결과와 비교하였다.

본 연구에서 U-튜브형 ART의 자유수면 해석기법을 개발하기 위해 횡동요만을 고려하고 있으나, 실제 선박이 6자유도로 운동하는 것을 고려하면 타 자유도와와의 연성을 고려해야 한다. 따라서, 정확한 해석기법 개발을 위해서는 다양한 운동 시나리오를 반영이 필수적이다.

본 연구를 통해 개발한 수치해석 기법과 그 결과는 선박의 Roll 저감 장치 설계 및 성능해석에 적용 가능할 것으로 기대한다.

## 사 사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1G1A1010991).

## References

- [1] Bass, D. W.(1998), Roll Stabilization for Small Fishing Vessels using Paravanes and Anti-roll tanks. *Marine Technology*, Vol. 35(2), pp. 74-84.
- [2] Bernal-Colio, V. R., J. Gómez-Goñi, and J. L. Cercos-Pita (2021), CFD Computation of the Hydrodynamic Torque due to Free-surface Antiroll Tanks with 3D Dynamics, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 16(8).
- [3] Bhattacharyya, R.(1978), *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Bosch, J. J. V. D. and J. H. Vughts(1966), On Roll Damping by Free Surface Tanks, *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 108, 345.
- [5] de Moura, C. A. and C. S. Kubrusly(2013), *The Courant-Friedrichs-Lewy Condition*, Birkhauser.
- [6] Field, S. B. and J. P. Martin(1976), Comparative Effects of Utube and Free Surface Type Passive Roll Stabilization Systems, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 118, pp. 73-92.
- [7] Frahm, H.(1911), Results of Trials of the Anti-rolling Tanks at Aea, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol. 53, pp. 183-201.
- [8] Hashimoto, H.(2010), Numerical Simulation Method for a Coupling Motion of Ship and Tank Fluid, *Proceedings of the 15th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Harbin, China.
- [9] Hirt, C. W. and B. D. Nichols(1981), Volume of Fluid Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, pp. 201-225.
- [10] Ikeda, Y. and T. Yoshiyama(1991), A Study on Flume-type Anti-rolling Tank, *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, Vol. 216, 111.
- [11] Kerkvliet, M., G. Vaz, N. Carette, and M. Günsing(2014), Analysis of U-type Anti-roll Tank using URANs. Sensitivity and Validation, *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, June 8-13, San Francisco, California, USA.
- [12] Kim, K. S. and B. H. Lee(2018), Simulation of Vessel Motion Control by Anti-Rolling Tank, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32(6), pp. 440-446.
- [13] KMST(2019), *Korean Maritime Safety Tribunal, Statistics: Marine Accidents according to Vessel Type*.

- [14] Kleefsman, K. M. T.(2000), Numerical Simulation of Ship Motion Stabilization by an Activated U-tube Anti-roll Tank, Master's Thesis, University of Groningen, Department of Mathematics.
- [15] Lew, J. M., B. J. Choi, and H. C. Kim(2003), On the Passive Type Anti-rolling Tank and its Activations by Air Blower, Ship & Ocean Technology, Vol. 7(1), pp. 19-23.
- [16] Souto-Iglesias, A., L. Pérez-Rojas, and R. Zamora-Rodríguez (2004) Simulation of Anti-roll Tanks and Sloshing Type Problems with Smoothed Particle Hydrodynamics. Ocean Eng. 31(8-9), pp. 1169-1192.
- [17] STAR-CCM+(2022), User's Guide (Ver. 17.02), SIEMENS, Munich.
- [18] Stigter, C.(1966), The Performance of U-tanks as a Passive Anti-rolling Device, TNO Report No. 81S.
- [19] van Daalen, E. F. G., J. Gerrits, G. E. Loots, and A. E. P. Veldman(2000), Free Surface Anti-roll Tank Simulations with a Volume Of Fluid based Navier-Stokes Solver, Proceedings of the 15th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Caesarea, Israel.
- [20] Vasta, J., A. J. Giddings, A. Taplinand and J. J. Stilwell (1961), Roll Stabilization by means of Passive Tanks, Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 69, pp. 411-460.
- [21] Webster, W. C., J. F. Dalzell, and R. A. Barr(1988), Prediction and Measurement of the Performance of Free-flooding Ship Anti-rolling Tanks, Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 96.
- [22] Yamaguchi, S. and A. Shinkai(1995), An Advanced Adaptive Control System for Activated Anti-roll Tank, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 5(1), pp. 17-22.
- [23] Zhong, Z., J. M. Falzarano, and R. M. Fithen(1998), A Numerical Study of U-tube Passive Anti-roll Tanks, Proceedings of the International Symposium of Offshore and Polar Engineering (ISOPE), Vol. 3, pp. 504-512.

---

Received : 2022. 11. 01.

Revised : 2022. 12. 06.

Accepted : 2022. 12. 28.