

KRISO 대형 캐비테이션터널 시험조건의 함정 모형선 반류에 대한 수치해석적 연구

박일룡^{1,†} · 김제인¹ · 김기섭² · 안종우² · 박영하² · 김명수²
동의대학교 조선해양공학과¹
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소²

Numerical Analysis of the Wake of a Surface Ship Model Mounted in KRISO Large Cavitation Tunnel

Il-Ryong Park^{1,†} · Je-In Kim¹ · Ki-Sup Kim² · Jong-Woo Ahn² · Young-Ha Park² · Myoung-Soo Kim²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea¹
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering/KIOST, Daejeon, Korea²

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.

The accurate assessment of hull-appendage interaction in the early design stage is important to control the inflow to the propeller plane, which can cause undesirable hydrodynamic effects in terms of cavitation phenomenon. This paper describes a numerical analysis for the flow around a fully appended surface ship model for which KRISO has carried out a model test in the Large Cavitation Tunnel(LCT). This numerical study was performed with the LCT model test in a complementary manner for a good reproduction of the wake distribution of surface ships. A second order accurate finite volume method provided by a commercial computational fluid dynamics(CFD) program was used to solve the governing Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) equations, where the SST $k-\omega$ model was used for turbulence closure. The numerical results were compared to available LCT experimental data for validation. The calculations gave good predictions for the boundary layer profiles on the walls of the empty cavitation tunnel and the wake at the propeller plane of the fully appended hull model in the LCT.

Keywords : Surface ship(수상함정), Large Cavitation Tunnel(LCT, 대형 캐비테이션터널), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), RANS Equations(Reynolds Averaged Navier-Stokes방정식), Nominal wake(공칭반류), Appendages(부기물), Shaft Rotation(축 회전)

1. 서론

선박의 반류(wake)는 프로펠러의 추진성과 캐비테이션(cavitation) 특성을 결정하는 중요한 유체역학적 정보가 된다(Lee & Choi, 2009; Choi, et al., 2011). 최근 국제법으로 발효된 EEDI(Energy Efficiency Design Index)를 만족하는 선박을 건조하기 위해 선체에 에너지절감장치(energy saving device)를 부착하면서 선미 반류의 특성은 더 복잡해지고 있다. 일반적으로 이러한 중요성을 가지는 반류의 실선 특성을 분석하기 위해 선형 시험수조(towing tank)와 캐비테이션터널(cavitation tunnel)을 활용한 모형시험이 먼저 수행된다. 현재, 유체역학적 상사법칙

(hydrodynamic similitude)에 기반을 둔 선박의 실선성능 추정법은 실선계측 자료를 바탕으로 계속적으로 개선되고 있지만, 복잡해지는 선미 반류 특성으로 인해 모형시험 해석법에 의한 실선성능 추정의 정확도에 대한 개선의 여지도 여전히 많다고 할 수 있다. 또 한편으로, 모형시험과 병행하여 최근 설계단계에서 성공적으로 적용되고 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 활용한 연구 노력들도 계속적으로 수행되고 있다(Yang, et al., 2010; Lee & Kim, 2011; Ha, et al., 2014).

대부분 단축(single skeg) 형태를 가지는 대형 일반상선(commercial ship)과는 달리 여객선 및 수상함정(surface ship)의 경우 선수 소나(sonar), 빌지킬(bilge keel), 프로펠러의 회전 축(shaft)과 이를 지지하는 스트럿(strut) 및 관련된 주위 지지 구조

물인 브래킷(bracket), 보싱(bossing) 그리고 배럴(barrel) 등이 서로 조합되어 프로펠러의 상류에 위치할 수 있다. 이러한 선미 부가물의 유체역학적 분석에 관련된 기존 주요 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Lee, et al. (2004)은 구조역학적 특성과 캐비테이션 특성을 반영한 V형 스트럿의 최적화에 관한 연구를 소개하였다. 이어서, 동일한 저자들인 Lee, et al. (2012)은 부가물로 인한 저항을 최소화하기 위해 Ro-Pax선에 부착되는 V형 스트럿을 최적화하고 유동제어 장치를 사용하여 반류 분포를 개선한 결과를 소개하였다. 특별히, 선체 부가물이 함정의 조종성능에 미치는 영향을 Kim, et al. (2014)이 민감도 해석법으로 연구한 바 있다.

수상함정의 프로펠러 주위 유동은 선미 부가물로 인해 매우 복잡하며 필요한 유체역학적 성능을 확보하기 위해 반류에 대한 보다 정확한 추정치 요구되고 있다 (Hacket & Jonk, 1999). 이 때, 수상함정의 유체성을 보다 정확하게 추정하여 설계에 활용하기 위한 노력은 모형시험과 함께 상호보완적으로 이용될 수 있는 CFD를 이용한 수치해석 정도의 고도화도 포함한다 (Dinham-Peren, et al., 2008). 본 논문에서는 빌지킬, 경사축, V형 스트럿 및 타(rudder)가 설치된 수상함정 모형선에 관련된 성능시험이 수행되고 있는 KRISO 대형 캐비테이션터널(Large Cavitation Tunnel, LCT)의 시험조건에서 수치해석을 통한 수상함정 반류의 재현 정도와 그 특성을 파악하고 모형시험의 결과와 비교하고 논의한 결과를 소개하고 있다. 캐비테이션터널 시험부(test section)는 제한수로(restricted channel)와 같아서 선형시험수조와 같이 자유수면이 재현되지 않으며 시험부 내부에 경계층(boundary layer) 유동이 존재한다. 따라서 이러한 LCT 내부유동 특성을 먼저 재현하기 위해 모형선이 없는 조건에서 유속의 변화에 따른 터널 시험부에서 발달하는 경계층 유동을 해석하였다. 함정 반류의 경우 경사축의 회전과 빌지킬의 영향을 해석하고, 계획흘수(design draft)를 기준으로 설치되는 모형선의 흘수 변화가 함정의 반류에 미치는 영향을 계산하였다. 수치해석 결과는 모형선이 설치되지 않은 조건에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)로 측정한 시험부 벽면 경계층 유동과 대상 모형선을 설치한 상태에서 프로펠러 면에서 측정한 함정의 반류 결과와 비교하고 검증하였다.

2. 수치해석 방법

모형시험과 함께 수상함정 주위 유동 해석에 상호보완적으로 활용될 수치해석 기법에 대한 설명은 다음과 같다. LCT에 설치된 함정 주위 유동을 캐비테이션이 없는 비압축성 난류유동(turbulent flow)으로 가정하고 유동의 지배방정식으로 연속방정식(continuity equation)과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 사용하였다. 난류모델은 점성저층(viscous sublayer) 영역에서 $k-\omega$ 모델을 적용하고 그 외의 영역에서 $k-\epsilon$ 모델을 결합하여 적용함으로써 역압력 구배가 존재하는 유동 해석에 이점이 높은 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 모델 (Menter, 1994)을 적용하였다. 지배

방정식은 범용프로그램인 STAR-CCM+에서 제공하는 2차 정확도의 이산화기법을 가지는 유한체적법(finite volume method)을 사용하여 풀고 그 해를 구하였다 (CD-adapco, 2015).

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 대상 선형 및 수치해석 조건

먼저, KRISO 대형 캐비테이션터널, LCT의 시험부(test section)와 터널 시험부 전후의 대략적 형상과 이 후, LCT 내부 경계층 유동 측정 위치를 설명하기 위해 LCT 측면도를 Fig. 1에 나타내었다. 시험부의 크기는 12.5 m (길이)× 2.8 m (폭)× 1.8 m (높이)이다. 그림에서 시험부 앞에 위치한 수축부(contraction part)와 시험부 하류에 위치한 확산부(diffusion part) 일부 모습을 볼 수 있다. 시험부에는 7개의 창(window)이 측면에 위치하고 모형선을 설치하였을 때 프로펠러 관측은 7번째 창에서 이루어진다.

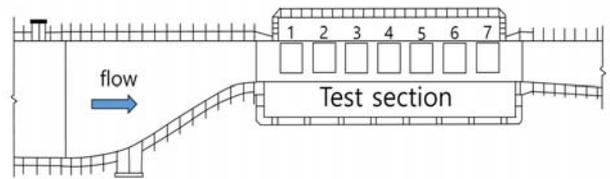


Fig. 1 Side profile of KRISO LCT

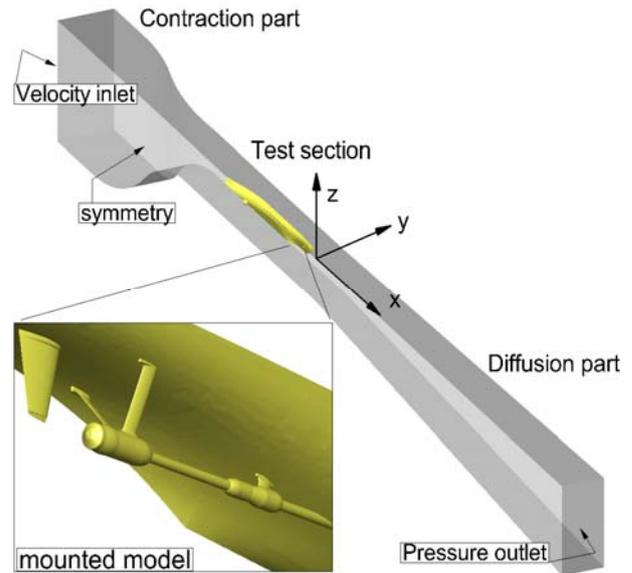
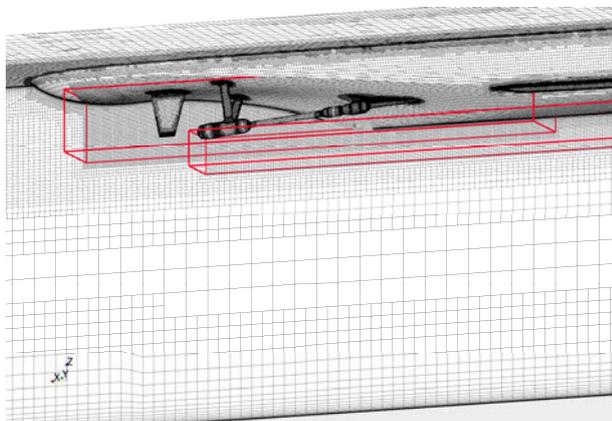


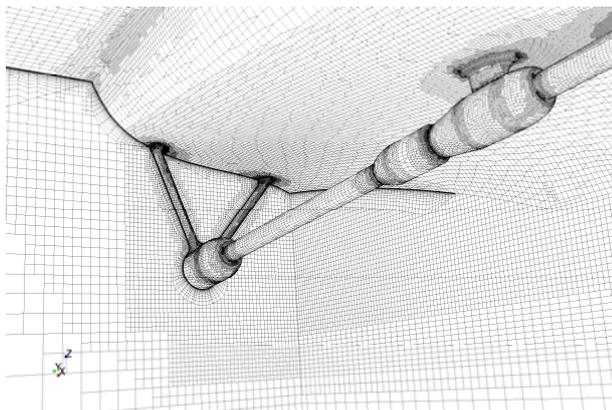
Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

Fig. 2는 시험부가 시작되는 면에서 평균유속, $U_o = 9 \text{ m/s}$ 인 유동조건에서 쌍축(twin skeg)형 수상함정 모형선이 KRISO LCT에 설치된 상태를 보여주고 있다. 그림에서 시험부가 끝나는 지점의 터널 윗면에 위치한 좌표계와 유동장의 경계조건들을 볼 수

있다. 이 때 프로펠러의 경사축은 선체의 바깥쪽(outward) 방향으로 30ps로 회전한다. 그림과 같이 수치해석 계산영역은 LCT의 수축부, 시험부 그리고 확산부까지를 고려하고 있다. 설치된 모형선의 길이는 7.067 m이며 흘수(draft)는 약 0.27 m이다. 여기서, 선미부 자유수면 영향을 고려하여 0.07 m의 추가적인 흘수를 더하여 모형선이 설치된다. 선미의 부가물인 회전축과 선체의 상류에서 하류방향으로 이를 지지하는 한 개의 독립된 I형 스트럿과 V형 스트럿 및 타를 그림에서 볼 수 있다. 수치해석에서 LCT 수축부가 시작되는 면에 유속유입(velocity inlet)조건, 확대부가 끝나는 면에 압력유출(pressure outlet)조건, 유동의 대칭성을 고려해서 선체의 우현만을 계산영역에 고려하기 위해 선체 중앙의 종단면은 대칭면(symmetry plane)으로 두고 모형선과 터널내부의 표면은 고체 경계면(solid wall)으로 처리하였다.



(a) Stern view with grid control blocks



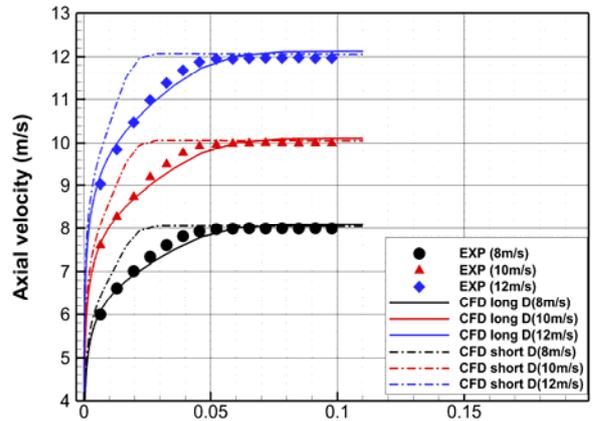
(b) Close up view of shaft and strut

Fig. 3 Grid modeling for the LCT test

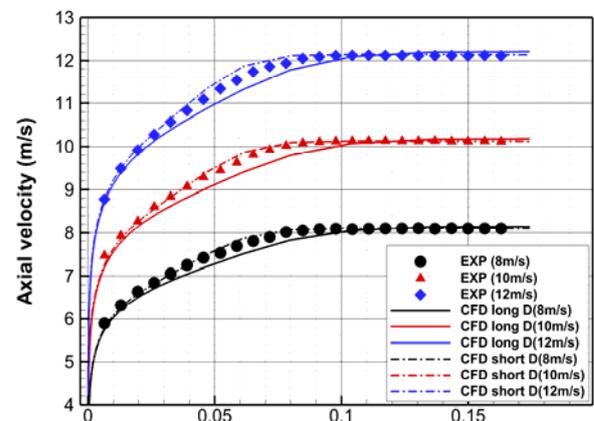
Fig. 3은 모형선 부가물 주위 격자 분포의 밀도를 높이기 위해 선정한 격자 조정 영역과 함께 선체, 빌지킬을 포함한 부가물 및 LCT 벽면에서의 표면격자 분포 그리고 V형 스트럿의 중앙부를 통과하도록 횡방향으로 자른 임의 단면내 공간격자 분포를 보여주고 있다. 격자는 STAR-CCM+에서 제공하는 Trimmer와 Prism layer라는 기법으로 생성하였다. 이 때, Prism layer는 벽면의 경계층 유동을 적절하게 해석하기 위한 조밀한 격자층을 만드는데

이용된다. 유동의 복잡성을 고려해서 선미 부가물 주위에 보다 조밀한 격자분포를 두었으며, 전체적으로 약 천이백만(12M)개의 유한요소를 가지도록 하였다.

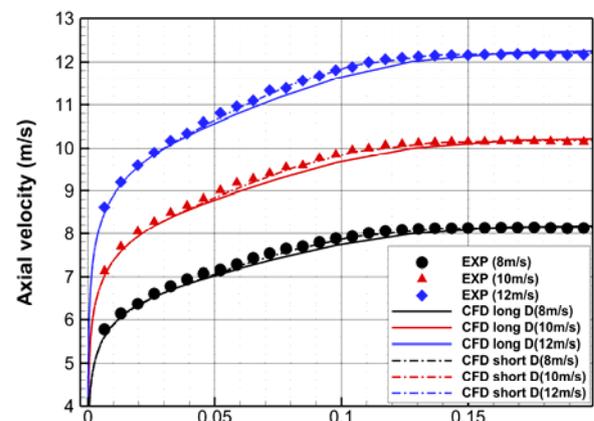
3.2 LCT 경계층 유동 검증



(a) 1st window

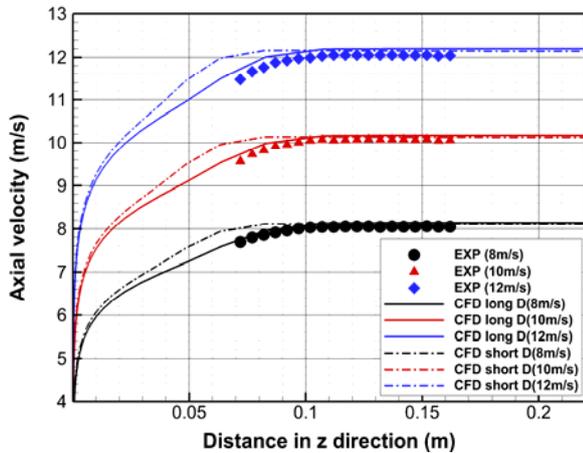


(b) 4th window

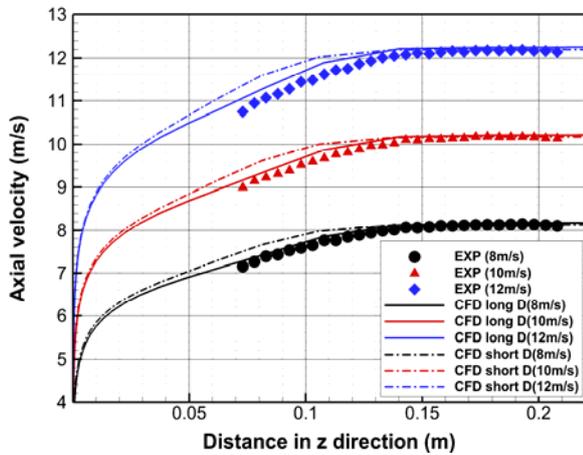


(c) 7th window

Fig. 4 Boundary layer development on the side windows of KRISO LCT



(a) 4th window

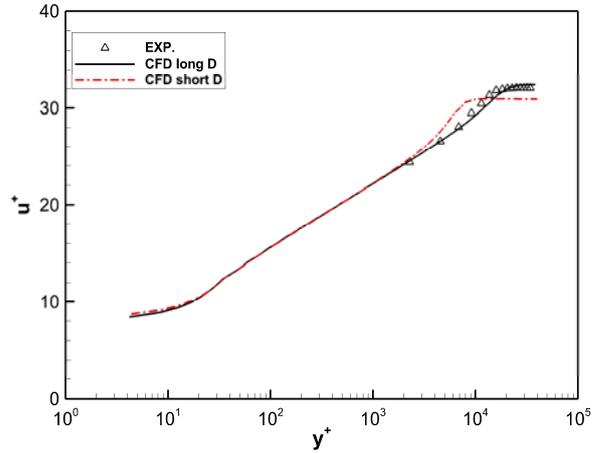


(b) 7th window

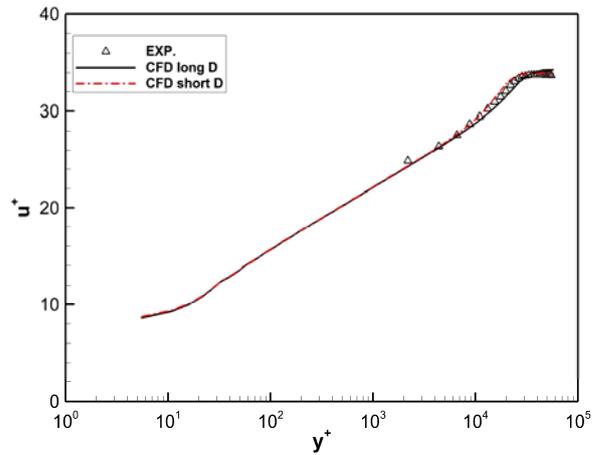
Fig. 5 Boundary layer development on the topside windows of KRISO LCT

LCT와 같은 터널내 유동의 특성상 시험부 내부에서 발달되는 경계층은 시험부 하류 방향으로 갈수록 그 두께가 계속 증가한다. 그 결과로 만들어진 위벽효과(blockage effect)로 선미부의 프로펠러 유동을 관측하는 시험부가 끝나는 영역에서 유속이 계획된 값보다 증가하며, 이 때 증가되는 유속의 크기 및 그 분포를 수치해석에서도 타당하게 재현하는 것이 필요하다. 수상함정에 대한 LCT 모형시험 조건을 계산하기 이전에 모형선이 없는 빈 LCT 시험부의 경계층 유동을 계산하고 모형시험 결과와 비교하여 검증하였다. 계산영역에 따른 수치해의 의존성을 살펴보기 위해 수치해석은 두 가지 영역을 사용하였다. Fig. 10에 보인 LCT 형태를 그대로 모델링한 조건(long D)과 수축부를 제외하고 시험부의 입구가 유속유입 경계면으로 사용되는 짧은 계산영역조건(short D)에 대해 각각 계산하였다.

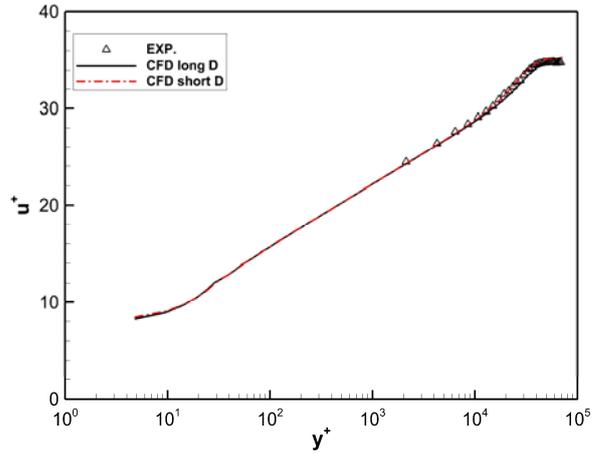
Fig. 4와 5는 시험부 유속이 8 m/s, 10 m/s 그리고 12 m/s일 때 LCT 시험부 측면과 윗면 창을 통하여 LDV로 계측한 유동의 경계층을 수치해석 결과와 각각 비교하고 있다. 모형시험 계측결과를 살펴보면 시험부의 길이 방향으로 발달되는 경계층의 두께는 1번째 창에서 약 0.05 m 이고, 4번째 창에서 약 0.1 m 그리고



(a) 1st window



(b) 4th window



(c) 7th window

Fig. 6 Dimensionless velocity profiles on the side windows of KRISO LCT at $U_o = 10\text{m/s}$

7번째 창에서 약 0.15 m 정도인 것을 볼 수 있다. Fig. 4에서 long D 계산영역에 대한 수치해석 결과는 각각의 유속에 대해 시험부 1번째 관측창에서 7번째 관측창까지 LCT내부에서 발달되는 경계층 유속분포 특성을 잘 재현하고 있는 것을 볼 수 있다. LCT 시험부를 유입유속 경계조건으로 사용하는 짧은 계산영역 short D의 경우 시험부 측면의 1번째 관측을 제외하고 4번째 및

7번째 창의 결과가 모형시험 결과와 비교적 타당한 일치를 보이고 있다. 그러나, Fig. 5에서 보는 바와 같이 시험부 상부 4번째와 7번째 창에서 계측한 경계층 유속분포를 비교한 결과를 살펴볼 때 수축부를 포함한 long D의 결과가 모형시험 결과에 더 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결론으로 인해 수상함정 주위 유동해석은 LCT시험부내 경계층 유동을 잘 재현하고 있는 계산영역 long D를 이용하였다.

Fig. 6은 Fig. 4의 결과에서 시험부 평균유속이 10 m/s 일 때, 마찰속도($u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$)로 무차원화 시킨 속도, $u^+ (= V_x/u_\tau)$ 의 분포를 벽면으로부터의 무차원 거리 $y^+ (= yu_\tau/\nu)$ 로 나타내고 있다. 여기서, V_x 는 x축방향 유속, τ_w 는 전단응력, ρ 는 밀도, 그리고 ν 는 동점도(kinematic viscosity)를 의미한다. LCT 모형시험의 경우 무차원 거리 약 2000에서부터 계측이 시작된 것을 볼 수 있으며 앞서 설명한 바와 같이 본 수치해석 결과가 벽 법칙(law of the wall)을 잘 만족하며 모형시험 결과와 함께 경계층의 기본특성을 잘 만족하는 것을 볼 수 있다.

3.3 수상함정 선미 국부유동 특성

Fig. 7은 선체에 발지길을 부착한 상태에서 프로펠러의 경사축을 고정된 경우와 30 rps로 회전시킨 경우에 대해 해석한 선미 영역에서 와유동(vortical flow)의 특성을 보여주고 있다. 와유동의 거동을 가시적으로 나타내기 위해 그림에서 변형률 텐서(\mathcal{S})과 와도 텐서($\mathcal{\Omega}$)를 통해 표현되는 물리량 $Q = (|\mathcal{\Omega}|^2 - |\mathcal{S}|^2)/2$ 의 값, 150의 등곡면(iso-surface) 분포를 사용하였다. 그림에서 선체 표면과 부가물인 스트럿, 경사축, 프로펠러 허브(hub) 그리고 타에서 발생하는 와유동의 특성을 볼 수 있다. V형 스트럿 지지 구조물과 경사축이 만나는 지점에서 발생하는 와유동이 경사축의 회전과 관계없이 스트럿 사이를 지나 허브에 근접한 프로펠러 면으로 유입되는 것을 볼 수 있다. 특별히 경사축의 회전에 공급되는 회전운동에너지가 축을 지지하는 상류쪽 스트럿과 경사축에서 기인된 말굽 보오텍스(horseshoe vortex) 및 목걸이 보오텍스(necklace vortex)의 강도(strength)를 증가시키고 있다. 그 중 경사축에서 생성된 보오텍스의 경우 프로펠러 면으로 그 영향력이 경사축이 회전하지 않을 때보다 더 확장되어 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 V형 스트럿 앞쪽의 경사축에서 시작하여 부가물 주위에 생성한 선체길이 방향을 따른 횡단면에서 경사축이 고정된 경우와 회전하는 경우에 대한 와도의 세기(vorticity magnitude)를 비교하고 있다. 그림에서 보다 상류쪽 스트럿에서 시작하여 V형 스트럿 위쪽 영역으로 통과하는 와유동과 경사축에서 발생한 와유동이 스트럿의 아래쪽 사이를 통과하는 유동의 흔적을 와도의 세기분포로 확인할 수 있다. Fig. 6에서 언급한 바와 같이 프로펠러 경사축의 회전에 V형 스트럿 상류와 스트럿 사이의 단면에서 와도의 크기가 다소 커진 것을 볼 수 있다. 함께, V형 스트럿을 지난 단면에서 스트럿에서 생성되었을 후연 보오텍스(trailing edge vortex) 및 스트럿의 뿌리 부근에서 발생한 말굽 보오텍스의 영향의 형태를 볼 수 있다.

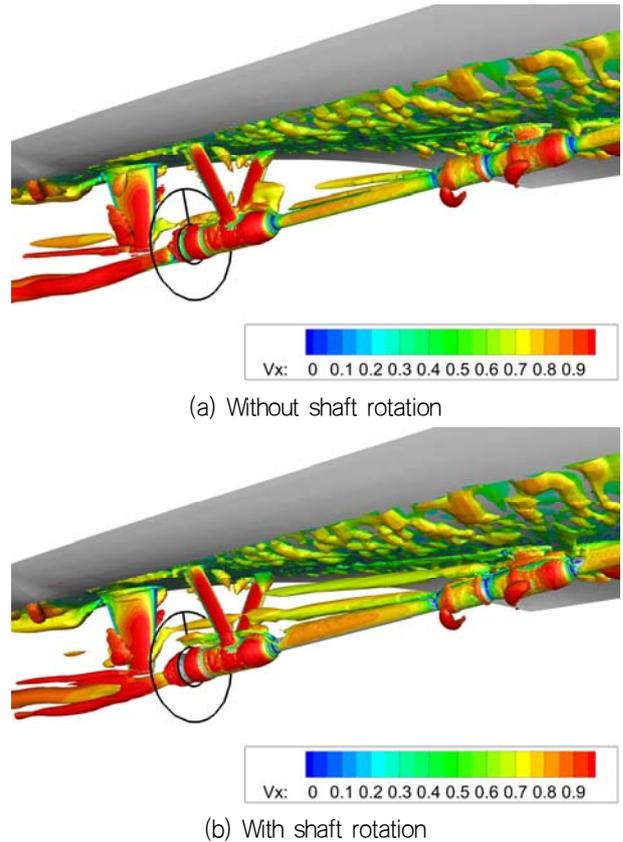


Fig. 7 Vortical flow structures around the stern of the hull

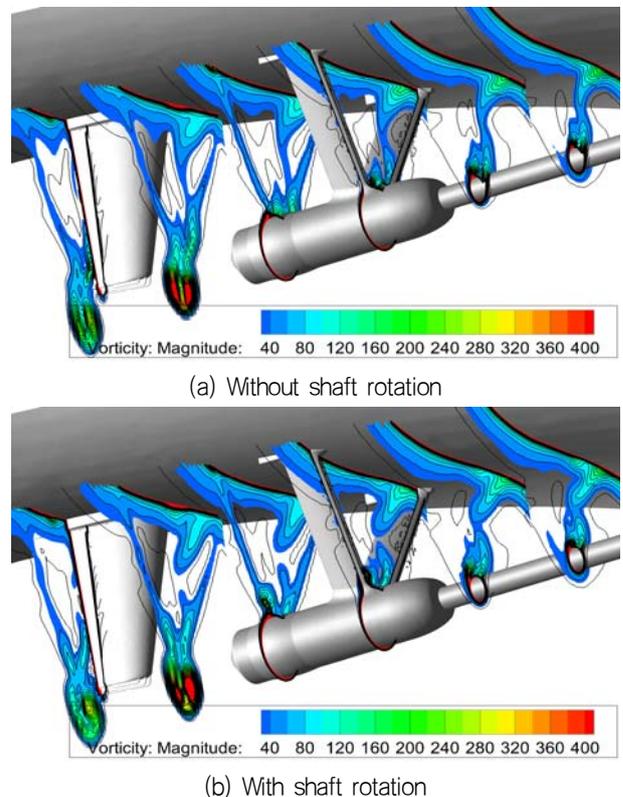


Fig. 8 Vorticity magnitude distribution around the stern of the hull

Fig. 9는 Fig. 8에서 설명한 부가물 주위 단면내에서 축방향 유속(V_x)을 경사축이 고정된 경우와 회전하는 경우에 대해 서로 비교하고 있다. 그림에서 유속은 터널 시험부의 평균유속으로 무차원화되어 나타나고 있으며, 명료한 그림을 얻기 위해 무차원 유속이 0.96 이상인 경우 등고선에 나타내지 않았다. 먼저, 앞서 살펴본 바와 같이 프로펠러 경사축의 회전으로 그 근방의 유속의 분포가 회전방향으로 약간 휘어져 있고, 프로펠러 면을 지난 V형 반류 골(wake peak) 영역에서 유속의 크기 분포가 축이 고정되어 있는 조건의 결과와 다소 다른 것을 볼 수 있다.

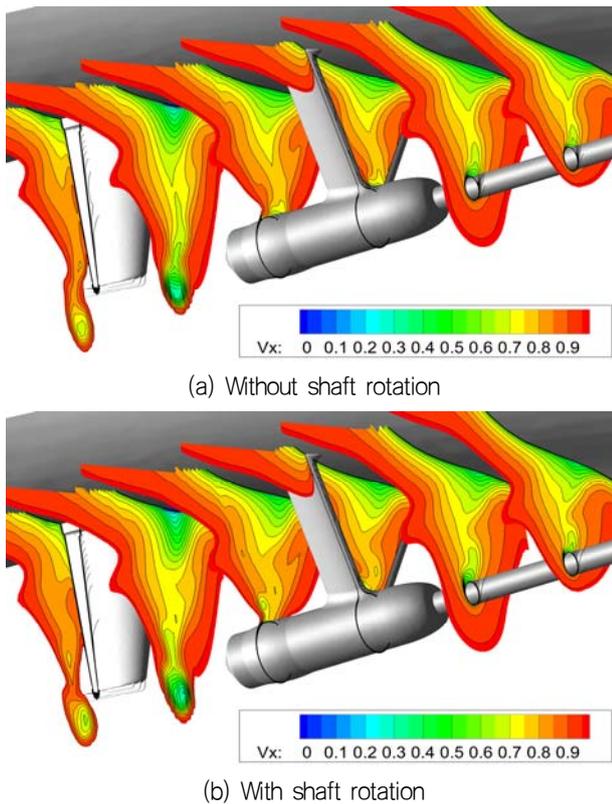


Fig. 9 Axial velocity distribution around the stern of the hull

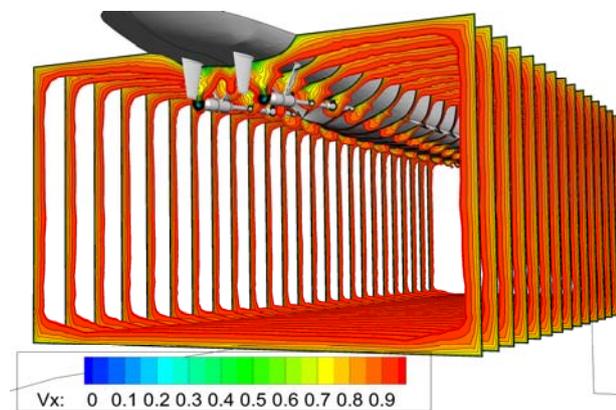


Fig. 10 Perspective view of the axial velocity distribution in the LCT mounting the hull model

Fig. 10은 함정 선체 주위는 물론 LCT 내부에서 축방향 유속의 변화를 함께 보여주고 있다. 여기서, 앞서 설명한 바와 같이 명료한 그림을 얻기 위해 무차원 유속이 0.96 이상인 경우 등고선 표현에서 제외 시켰다. 이전 절에서 설명한 바와 같이 LCT 시험부에서 경계층의 두께의 변화가 모형선의 선미에 유입되는 유속의 크기에 영향을 주기 때문에 수치해석에서는 이러한 경계층 재현에 대한 검토와 검증이 이루어져야 한다.

3.4 수상함정 반류 검증 및 특성

Fig. 11과 12는 선체에 빌지킬을 부착하지 않고 선수와 선미에서 동일한 계회축수에서 추가적으로 0.07m를 증가시킨 흘수 조건(even keel)에서 프로펠러의 경사축의 회전의 유무에 따라 얻어진 축방향 유속의 분포인 반류를 각각 비교하고 있다. 선저 경계층 및 경사축 등의 부가물에 의해 축방향 유속이 느리게 나타나는 영역이 모형시험의 경우 약 $-90^\circ \sim 50^\circ$ 인데 비해 수치해석은 약 $-80^\circ \sim 42^\circ$ 로 약간 좁다. 여기서, 원주방향 각도는 시계의 12시를 0° 로 두고 시계 방향으로 각도가 증가하도록 정의하였다. 이러한 결과는 Fig. 12의 축이 회전하는 조건에서도 같은 경향을 볼 수 있다. V형 반류 골 영역에서 유속의 크기는 수치해석이 모형시험보다 약간 더 낮은 경향을 보여주고 있다. LCT시험과 수치해석 모두 프로펠러 축의 회전으로 인해 프로펠러 허브 위쪽 영역의 유동이 시계방향으로 다소 회전하여 분포하는 특징을 잘 보여주고 있다. 반류분포의 영역과 유속의 차이에 대한 상기 설명을 제외하고 전반적으로 본 수치해석 결과가 축의 회전에 유무에 따라 모형시험 결과와 타당한 일치를 보여주고 있다.

Fig. 13은 축의 회전 유무에 따라 프로펠러 면에서 계산된 횡방향 유속(lateral velocity, V_y), 수직방향 유속(vertical velocity, V_z) 그리고 원주방향 유속(circumferential velocity, V_t)를 각각 비교하고 있다. Fig. 13-(a)와 (b)의 횡방향 유속 비교의 경우 축의 회전으로 달라지는 스트럿 상류 유입 유동의 영향이 V형 반류 골 영역에서 서로 다르게 나타나고 있다. 또한 이 영역에서 작은 반경 및 큰 반경에서 횡방향의 유속의 크기와 그 분포가 현저히 달라지는 것을 볼 수 있다. Fig. 13-(c)와 (d)의 수직방향 유속의 비교의 경우 축의 회전으로 V형 반류 골 영역에서 그 유속의 절대값 크기가 감소하고 270° 부근의 수직 상방향 유속의 크기는 증가한 것을 볼 수 있다. Fig. 13-(e)와 (f)의 원주방향 유속의 경우 경사 축의 회전으로 $40^\circ \sim 100^\circ$ 영역에서 그 크기가 다소 감소한 것을 볼 수 있고, 반대로 $250^\circ \sim 300^\circ$ 의 영역의 작은 반경에서는 유속의 절대값 크기가 다소 증가한 결과를 보여주고 있다. V형 반류 골 영역에서는 축의 회전으로 달라지는 스트럿 상류 유입 유동의 영향으로 유속의 분포는 다소 다르나 원주방향 유속의 절대적인 값의 크기는 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 Fig. 12에 대한 모형시험 조건에서 선체에 빌지킬을 부착한 상태와 그렇지 않은 조건에서 수치해석으로 얻은 반류 분포의 특성을 비교하고 있다. 빌지킬에 의해서 교란된 유동이

직접적으로 프로펠러 면으로 유입되지는 않지만, 그 영향으로 스트럿 사이 영역의 저속의 반류 골 영역이 더 커진 것을 볼 수 있다. 또한 스트럿의 비갈 우현 60° 안쪽 영역의 무차원 유속이 약 0.025정도 느려졌으며 저속 영역도 넓어진 것을 확인할 수 있다. 이로서 설계시 프로펠러 면 반류에 대한 빌지킬의 형상 및 위치의 영향을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

Fig. 15는 선수와 선미에서 동일한 계획흡수에서 추가적으로 0.07 m를 증가시킨 흡수 조건에서 선형시험수조에서 계측한 선수트림(bow trim) 0.065°를 고려한 조건 그리고 추가 흡수를 0.12 m로 고려한 각각의 수치해석 결과를 비교하고 있다. 여기서, 경사축의 회전은 고려하지 않았다. 선수트림을 준 0.07 m 흡수 증가 조건의 결과는 even keel조건인 반류와 비교해서 스트럿 사이 위쪽 영역의 유속이 약간 낮아지고 허브 아래쪽 영역의 유속이 약간 증가하였다. 120 mm흡수 증가 조건에서는 반류의 저속영역의 유속이 약간 증가하고 동일하게 허브 아래쪽 영역의 유속이 약간 증가한 것을 볼 수 있다.

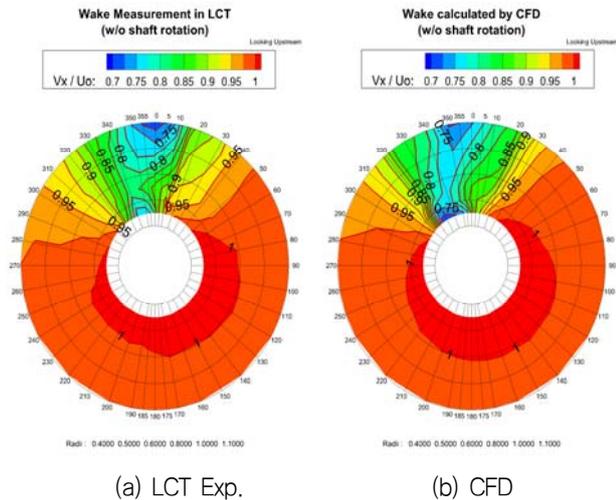


Fig. 11 Nominal wake without the shaft rotation

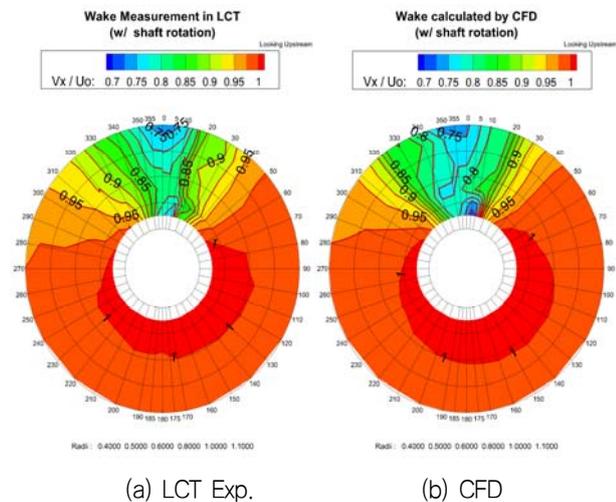
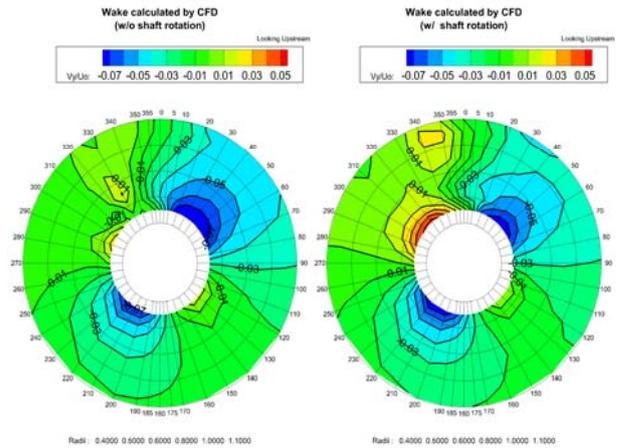
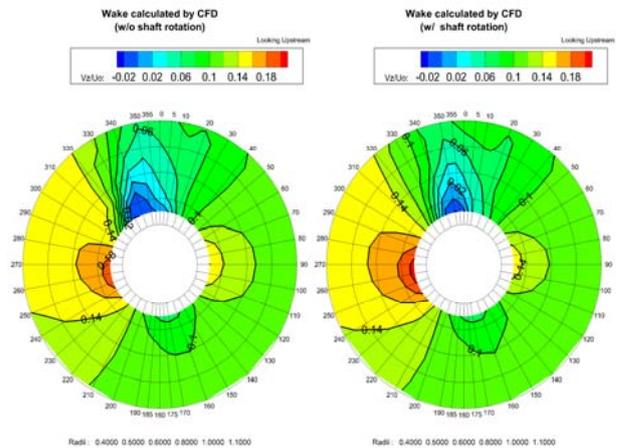


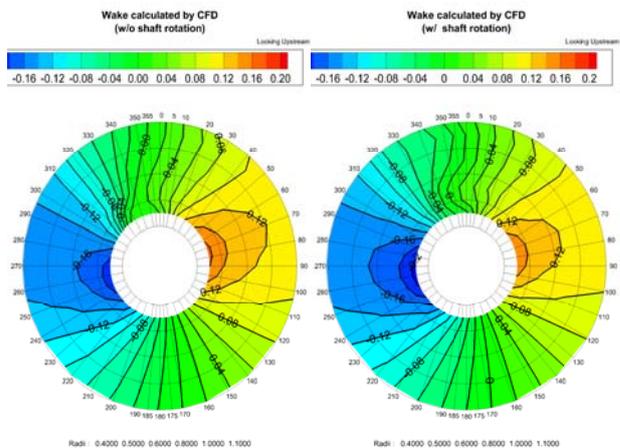
Fig. 12 Nominal wake with the shaft rotation



(a) Vy without shaft rotation (b) Vy with shaft rotation



(c) Vz without shaft rotation (d) Vz with shaft rotation



(e) Vt without shaft rotation (f) Vt with shaft rotation

Fig. 13 Lateral velocity(a & b), vertical velocity(c & d) and circumferential velocity(e & f) distribution on the propeller plane without and with the shaft rotation

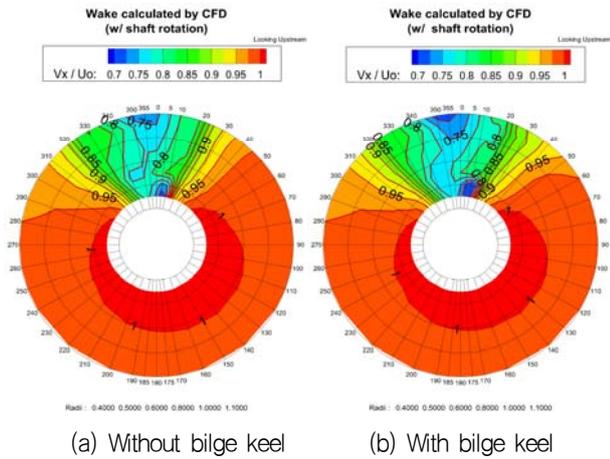
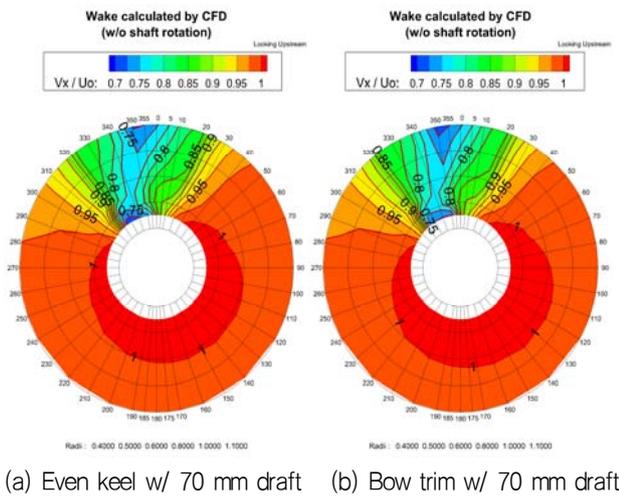


Fig. 14 Nominal wakes without and with the bilge keel



(a) Even keel w/ 70 mm draft (b) Bow trim w/ 70 mm draft
(c) Even keel w/ 120 mm draft
Fig. 15 Nominal wakes at different hull attitudes

4. 결론

본 논문에서는 KRISO 대형 캐비테이션터널인 LCT의 시험조건을 따라 빌지킬, 경사축, V형 스트럿 및 타가 설치된 수상함정

모형선의 재현 정도와 그 특성을 파악하고 논의한 결과를 소개하였다.

LCT가 가지는 유동의 특성을 반영한 정확한 해석을 위해 모형선이 없는 조건에서 LCT 시험부에서 발달하는 경계층 유동을 재현하여 LDV 계측결과와 좋은 일치를 보이는 해석결과를 얻었다.

함정 반류의 경우 프로펠러 경사축의 회전과 빌지킬의 영향을 해석하고, 계획출수를 기준으로 설치되는 모형선의 출수 변화 및 자세변화가 반류 변화에 미치는 영향을 계산하였다. 경사축의 회전 유무는 선미 유동장 변화에 다소 영향을 주는 것으로 확인하였다. 이 때 수치해석에서 얻은 반류의 변화는 모형시험 결과와 타당한 일치를 보여주었다. 선축에 부착되는 빌지킬은 프로펠러 반류면내 유속을 약간 감소시키는 영향을 가지는 것을 볼 수 있었다. 출수 증가의 영향은 V형 스트럿 사이를 통과한 유속 및 프로펠러 허브 아래쪽 영역의 유속이 다소 증가하는 것을 확인하였다. 현재, KRISO LCT 모형시험에서 시험부 상부면 경계층 유동의 영향을 최소화하기 위하여 모형선 설치시 추가출수를 적용하는 것을 검토해 오고 있었다. 본 논문의 대상 수상함정의 경우 선형시험수조에서 계측된 선미 자유수면의 높이를 고려하여 0.07 m 정도의 추가출수를 적용하는 것이 타당한 것으로 판정하고, 본 수치해석을 통해 추가적인 다른 출수 조건들에 대한 유동의 변화도 비교하고 검토하였다.

수상함정의 LCT 모형시험 조건에 대한 수치해석 결과와 모형시험 결과가 비교적 좋은 일치를 보여주고 있어 선미 부가물의 부분적 형상 변화에 따른 국부유동 특성 파악에 유용하게 활용될 것으로 판단한다. 향후, 현재 연구 중인 KRISO의 정교한 3차원 LDV 계측결과를 활용하여 프로펠러 면내 반경방향 및 접선방향 유속을 보다 면밀히 검증하고 프로펠러를 고려한 유체성능 해석에 대한 연구를 더 수행할 예정이다.

후기

본 논문은 산업원천기술사업(NS2010)과 민간기술협력사업(NS2780)으로 수행되었음을 밝히며 지원해주신 산업통상자원부, 방위사업청 및 유관기관에 감사를 드립니다.

References

CD-adapco., 2015. *STAR-CCM+ v.10.04 user's manual*. [Online] Available at: <http://www.cd-adapco.com>.
Choi, G.H. Chng, B.J. Hur, J.W. & Cho, D.S., 2011. Comparison of Cavitation Patterns between Model Scale Observations Using Model and Full-Scale Wakes and Full Scale Observations for a Propeller of Crude Oil Carrier. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.15-22.
Dinham-Peren, T.A. Craddock, C. Lebas, A. & Ganguly, A., 2008. Use of CFD for hull form and

appendage design assessment on an offshore patrol vessel and the identification of a wake focussing effect. *Proceedings of the RINA Marine CFD 2008*, Southampton, UK, March 2008.

Ha, Y.J. Lee, Y.G. & Kang, B.H., 2014. Numerical Simulation of Turbulent Flow around KLNG Hull Form with Different Scale Ratio. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.8-15.

Hackett, J.P. & Jonk, A., 1999. Propeller Shaft Strut Design. *SNAME Transactions*, 107, pp.101-126.

Kim, D.H. Lee, K.P. & Kim, N.W., 2014. The Effect of Hull Appendages on Maneuverability of Naval Ship by Sensitivity Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(2), pp.154-161.

Lee, H.J. Jang, H.S. & Chun, H.H., 2004. Study on the Shaft-Strut Design in the Initial Design Stage. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(6), pp.114-119.

Lee, H.J. Jang, H.S. Hong, C.B. Ahn, S.M. & Chun, H.H., 2012. Hull-Form Development of a Twin-Skeg Large Ro-Pax Ferry. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.491-497.

Lee, H.S. & Kim, D.J., 2011. Design Optimization of Wake Equalizing Duct Using CFD. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(4), pp.42-47.

Lee, Y.S. & Choi, Y.B., 2009. Study on the Effect of Wake Control Devices on Ship Performance Components. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.453-459.

Menter, F.R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8), pp.1598-1605.

Yang, H.U. Kim, B.N. Yoo, J.H. & 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.

