

# 프로펠러와 허브 보오텍스 조절장치 상호작용 CFD 해석

박현정<sup>1</sup>·김기섭<sup>1,†</sup>·서성부<sup>2</sup>·박일룡<sup>2</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>1</sup>  
동일대학교 조선해양공학과<sup>2</sup>

## CFD Analysis of Marine Propeller-Hub Vortex Control Device Interaction

Hyun-Jung Park<sup>1</sup>·Ki-Sup Kim<sup>1,†</sup>·Sung-Bu Suh<sup>2</sup>·Ill-Ryong Park<sup>2</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering/KIOST, Daejeon, Korea<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea<sup>2</sup>

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.

Many researchers have been trying to improve the propulsion efficiency of a propeller. In this study, the numerical analysis is carried out for the POW(Propeller Open Water test) performance of a propeller equipped with an energy saving device called PHVC(Propeller Hub Vortex Control). PHVC is aimed to control the propeller hub vortex behind the propeller so that the rotational kinetic energy loss can be reduced. The unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes(URANS) equations are assumed as the governing flow equations and are solved by using a commercial CFD(Computational Fluid Dynamics) software, where SST k- $\omega$  model is selected for turbulence closure. The computed characteristic values, thrust, torque and propulsion efficiency coefficients for the target propeller with and without PHVC and the local flows in the propeller wake region are validated by the model test results of KRISO LCT(Large Cavitation Tunnel). It is concluded from the present numerical results that CFD can be a good promising method in the assessment of the hydrodynamic performance of PHVC in the design stage.

**Keywords** : Hub vortex(허브 보오텍스), PHVC(프로펠러 허브 보오텍스 조절장치), Energy saving device(ESD, 에너지절감장치), CFD(전산유체역학)

## 1. 서론

전 세계적인 온실가스 저감 노력에 따라 선박에 대한 온실가스 배출 감축 규제가 강화됨에 따라 국제법에 의해 에너지 효율 설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)가 2013년부터 건조되는 신조선선에 적용되고 있다. 저속운항(slow-steaming)을 통한 연비 향상의 노력과 함께 국제해사기구(IMO)에서 발표한 EEDI는 선박의 설계단계부터 기술적으로 고려해야 하는 중요한 지표로 자리 잡으면서 다양한 형태의 친환경 선박이 개발되고 있다. 이에 대응하기 위해 많은 연구자들은 선박의 저항 및 추진 효율 향상을 목표로 하는 다양한 연구를 수행하고 있으며, 특히, 장치의 설치가 용이하고 기존선박에도 비교적 쉽게 적용할 수 있는 에너지절감장치(Energy Saving Device, ESD)에 대한 연구가 증가하고 있는 추세이다 (Kang, et al., 2004; Park, et al., 2011; Lim, et al., 2013; Shin, et al., 2013). 가변피치 프로펠

러(Controllable Pitch Propeller, CPP)를 포함하여 추진효율을 향상시킬 수 있는 에너지절감장치에는 덕트(duct), 스테이터(stator), 프로펠러 허브 보오텍스 조절장치(Propeller Hub Vortex Control, PHVC) 등을 예로 들 수 있다. 그 중에서도 프로펠러 캡(cap)에 위치하는 PHVC는 허브 보오텍스 유동을 제어하여 회전 운동에너지(rotational kinetic energy) 손실을 줄이는 효과를 발생시켜 프로펠러의 추력 증가와 함께 토크 감소를 얻을 수 있는 장치이다 (Hansen, et al., 2011). Kim, et al.(2015)은 균일류 유동 및 모형선 반류 중에서 각각 PHVC 피치각 변화 및 프로펠러와 PHVC 상대 설치각도 변화에 따른 프로펠러와 PHVC의 상호작용 특성 파악을 위하여 대형 캐비테이션널(LCT)에서 체계적인 시험적 연구를 수행하였으며 추력, 토크, 효율 및 PHVC 하류에서 유속분포 특성변화를 보여주었다.

한편, 일반적으로 알려진 바와 같이 설계 단계에서 개발된 장치들의 유체역학적 성능을 검증하는 것은 쉽지는 않다. 따라서

실해역 시운전 이전에 모형시험을 통하여 성능을 검증한다. 최근에는 설계단계에서 설계변수 변화에 따른 성능 확인을 위하여 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석기법이 많이 활용되고 있다 (Kawamura, et al., 2012; Xiong, et al., 2013).

본 논문은 Kim, et al. (2015)에서 보여주는 모형시험 결과 일부를 활용하여 PHVC가 부착된 프로펠러에 대한 CFD 해석을 수행하고 수치해석 기법의 타당성을 검증한 내용을 소개하고 있다. 먼저, PHVC 유무에 따른 POW(Propeller Open Water)시험에 대한 해석을 수행하여 추진효율 향상 정도를 검토하였으며, PHVC와 프로펠러와의 상호작용에 의한 프로펠러 하류의 국부유동 해석 결과를 LCT 모형시험에서 측정한 결과와 비교 검증하였다. 결론적으로, PHVC와 같은 에너지 절감장치의 유체성능 검증에 있어 설계단계에서의 CFD의 유용성을 살펴보고자 한다.

## 2. 대상 프로펠러 및 PHVC

추진효율 향상장치로서 프로펠러의 후류에 위치한 PHVC의 기본원리는 Fig. 1의 그림에서 설명하는 바와 같이 회전 시 날개에 작용하는 유체력의 개념적으로 간단히 설명할 수 있다. 적절한 설계가 이루어진 경우 PHVC는 프로펠러와 상호작용으로 추력과 토크는 각각 프로펠러에 작용하는 방향과 반대방향으로 작용하며, 이 때 프로펠러 압력면(pressure side)의 유동변화를 통해 추력을 증가를 꾀할 수 있다.

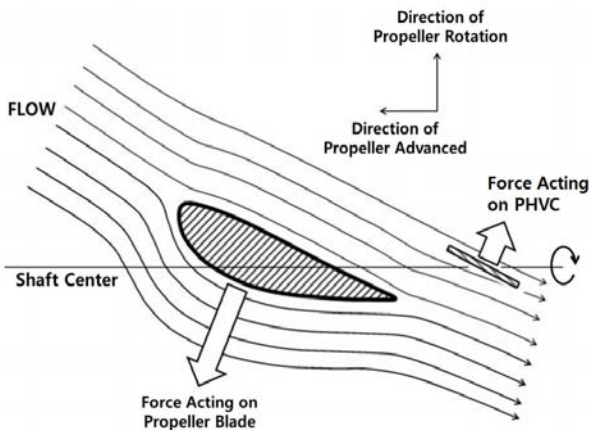


Fig. 1 Schematic diagram for the principle of PHVC (Ouchi, et al., 1989)

본 수치해석에 사용된 대상 KP839 프로펠러와 PHVC의 유체 성능은 KRISO LCT 모형시험을 통해 먼저 분석된 바 있으며 프로펠러의 캡에 PHVC 부착 유무에 따른 각 형상들을 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 모형시험에서 사용된 모델들의 주요 제원은 Table 1과 2와 같다. 여기서, 사용된 PHVC의 날개의 최적 부착 각도는 이전에 수행된 관련 연구 (Kim, et al., 2015)의 LCT 모형시험 결과로부터 선정되었다.

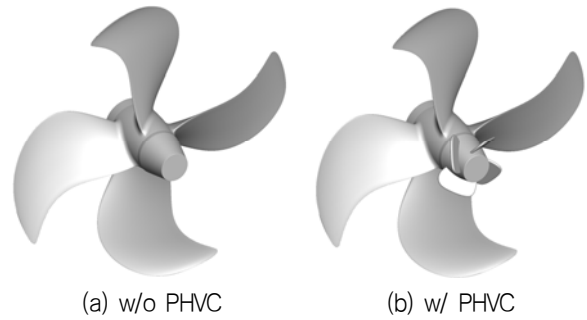


Fig. 2 KP839 propeller model without and with PHVC

Table 1 Principal dimensions of KP839 propeller

Item	dimension
No. of Blade	4
Model Dia.	250mm
Pitch Ratio	0.6899
Ae/Ao	0.5062
Rotation	Right Handed
Hub Ratio	0.160
Section	NACA66

Table 2 Principal dimensions of PHVC

Item	dimension
No. of Fin	4
Model Dia.(max).	58.7mm
Hub Dia.(Upstream)	36.6mm
Hub Dia.(Downstream)	23.7mm
Length	25.92mm

## 3. 수치해석 방법

본 논문에서는 프로펠러 주위 유동을 캐비테이션 현상(cavitation)이 없는 완전히 발달된 비압축성 난류유동(turbulent flow)으로 가정하고 연속방정식(continity equation)과 URANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes)을 지배방정식으로 사용하였다. 난류모델은 역압력 구배가 존재하는 경우 유동해석에 이점이 높은 점성저층(viscous sub-layer) 영역에서의  $k-\omega$  모형을 적용하고 그 외 영역에서  $k-\epsilon$ 모형을 결합하는 SST(Shear Stress Transport)  $k-\omega$  모델 (Menter, 1994)을 적용하였다. 지배방정식의 해법으로 2차 정확도의 이산화기법을 가지는 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용하였으며, 이를 기반으로 하는 범용 프로그램인 STAR-CCM+를 이용하여 본 연구의 수치

해석을 수행하였다 (CD-adapco, 2015). 프로펠러의 회전운동은 비정상(unsteady) 상태에서 격자계의 회전을 통해 직접적으로 구하는 방법을 사용하였으며 STAR-CCM+에서는 RBM(Rigid Body Motion)법으로 불리는 방법으로 구현하였다.

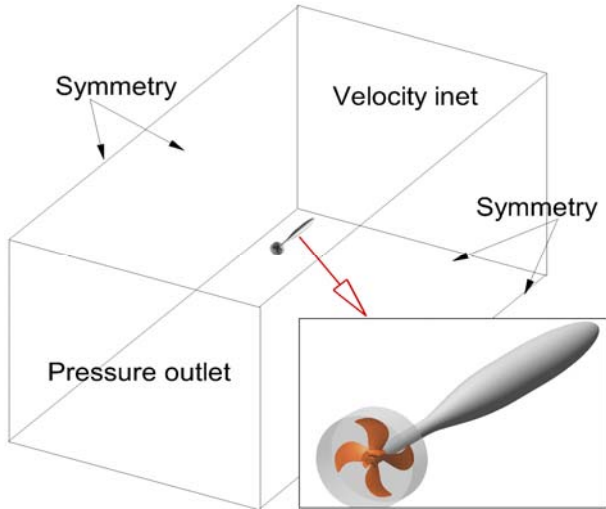
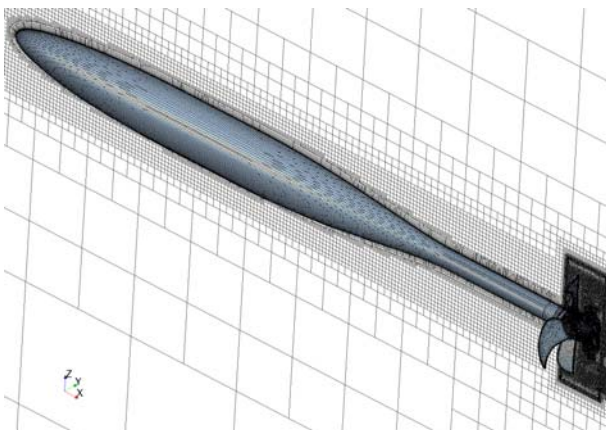
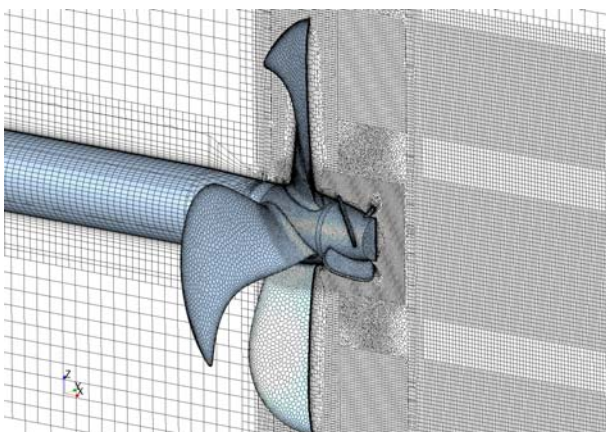


Fig. 3 Computational domain and boundary conditions



(a) Trimmer mesh for the non-rotational region



(b) Polyhedral mesh for the rotational region

Fig. 4 Grid system for the propeller and PHVC

수치해석에서 좌표계는 균일유동의 진행방향을 양의 x축으로 두고 y축과 z축은 프로펠러 상류를 바라보았을 때 각각 3시 및 12시 방향을 향한다. Fig. 3은 본 연구에서 설정한 프로펠러 주위 유동장의 크기와 경계조건을 보여주고 있다. 프로펠러 반경 ( $D$ )을 기준으로 상류와 하류방향은  $24D$  그리고 측면방향은  $9.6D$ 의 유동장의 크기를 가진다.

수치해석을 위해 작성된 격자계는 벽면에서의 경계층(boundary layer) 해석을 위해 조밀한 격자분포의 Prism layer를 두고 있다. 복잡한 형상과 수치계산의 정확도를 고려하여 회전하는 프로펠러와 PHVC 주위는 비정렬격자계중 Polyhedral mesh를 사용하였으며, 그 외 고정된 유동장은 Trimmer mesh를 사용하는 hybrid 격자법으로 전체 유동장 영역에 대한 격자계를 생성하였다.

Fig. 4는 프로펠러와 후류영역에서 격자분포 모습을 보여주고 있다. 프로펠러 후류에서의 국부유동을 LCT모형시험과 비교하기 위해 다소 많은 격자를 두었다. 최종 회전하는 프로펠러 영역에서는 약 5.0M 그리고 그 외 유동장은 5.5M으로 총 10.0M의 격자수를 사용하였다.

## 4. 수치해석 결과 및 고찰

### 4.1 POW 성능

POW시험은 프로펠러 회전수( $n$ )  $32.2rps$ 에서 수행되었다. 유입유속에 대한 프로펠러의 전진비(advance ratio)  $J$ 와 계산된 힘들에 대한 추력 계수  $K_T$ , 토크 계수  $K_Q$  및 단독효율 계수  $\eta_o$ 에 대한 정의는 다음과 같다.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (3)$$

$$\eta_o = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (4)$$

여기서,  $V$ 는 프로펠러로 유입되는 균일유동의 속도이며,  $\rho$ 는 물의 밀도를 나타낸다.

Figs. 5, 6 그리고 7은 PHVC 부착 유무에 따른 POW시험 해석 결과인 추력, 토크 그리고 효율계수를 LCT의 모형시험 결과와 각각 비교하고 있다. PHVC의 부착여부에 관계없이 전체적으로

모형시험과 수치해석은 좋은 일치를 보여주고 있다. 설계점인  $J = 0.434$  부근  $0.3 \leq J \leq 0.5$ 에서 추력 계수, 토크 계수 그리고 단독효율 계수는 PHVC가 부착되지 않은 경우 약 1% 이내, PHVC를 부착한 경우 약 2% 이내의 작은 오차를 보이고 있다. PHVC 유무에 따라,  $J \geq 0.6$ 의 높은 전진비에서는 추력의 경우 각각 약 3% 그리고 5%, 단독효율의 경우 각각 약 1% 그리고 4%의 모형시험과의 오차들을 나타내었다. 모든 조건의 계산에서 토크 계수는 모형시험과 1% 미만의 좋은 일치를 보여주고 있다. 다만, PHVC를 부착한 경우 단독효율 계수가 모형시험과 다소 차이를 보이는데, 이는 수치해석에서 PHVC로 인한 추력의 작은 증가량을 모형시험과 같이 추정하지 못한데서 기인된 결과로 사료된다.

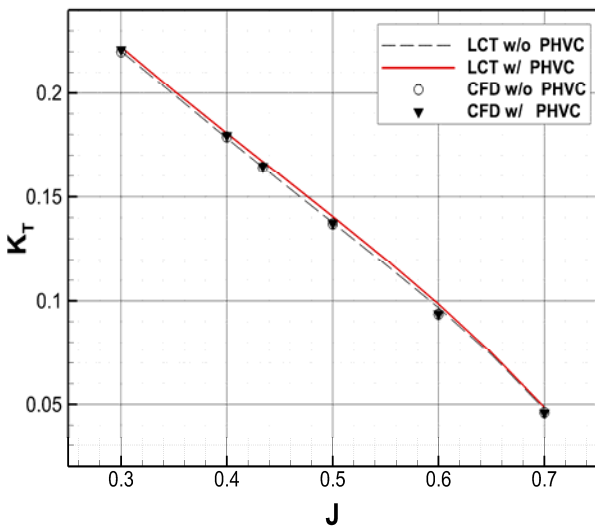


Fig. 5 Comparison of  $K_T$  curve of the propeller without and with PHVC

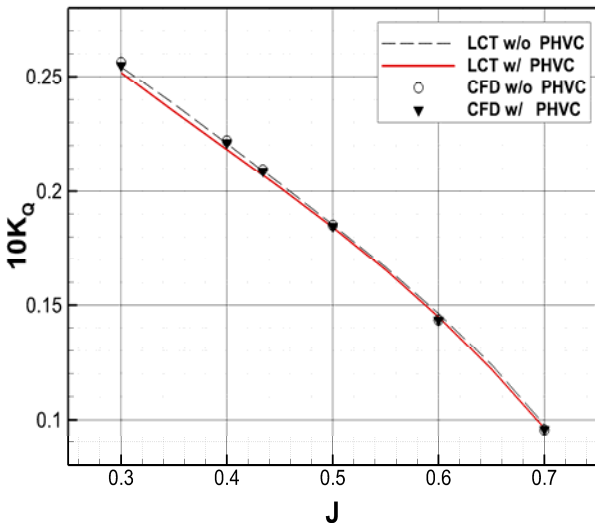


Fig. 6 Comparison of  $K_Q$  curve of the propeller without and with PHVC

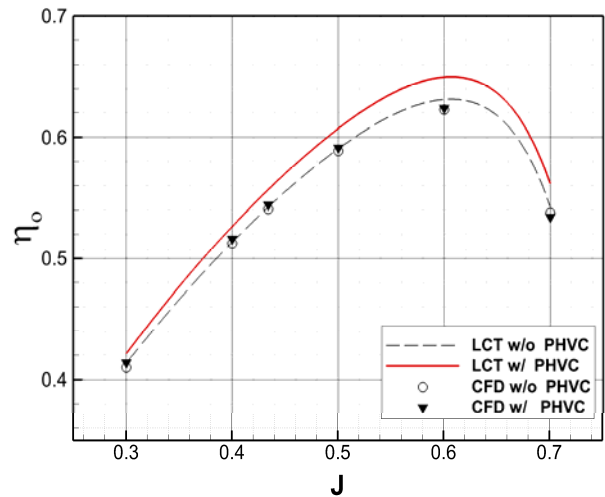


Fig. 7 Comparison of  $\eta_o$  curve of the propeller without and with PHVC

Table 3, 4 그리고 5는 PHVC를 부착하지 않은 조건 대비해서 추력 계수, 토크 계수 그리고 단독효율 계수들의 차이를 LCT 모형시험과 수치해석 결과를 각각 별도로 비교하고 있다. 높은 전진비를 제외하고, 앞서 설명한 바와 같이 모형시험과 수치해석에서 PHVC 유무에 따른 개별적인 조건에 대한 각 계수들 간의 차이는 크지 않은 것을 볼 수 있다. 다만, 수치해석의 경우 PHVC 효과로 인한 작은 추력의 증가량을 잘 예측하지 못한데서 기인하여 PHVC를 부착하지 않은 조건 대비해서 모형시험보다 추진효율 증가 폭이 다소 과소하게 평가하고 있다. 여기에 더하여, 전진비가 커질 경우 모형시험 결과에서 추진효율이 더 증가하는 경향과는 다른 경향을 보여주고 있다. 향후, 높은 전진비 영역과 함께 이러한 수치해석의 경향은 정밀한 수치 시뮬레이션 관점에서 조금 더 검토할 필요가 있는 것으로 판단된다. 그러나 설계영역에서 수치해석 결과는 충분히 PHVC로 인한 추진효율의 증가를 정성적으로 잘 예측하는 것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of  $K_T$  of the propeller without and with PHVC

J	LCT			CFD		
	w/o PHVC	w/ PHVC	%d	w/o PHVC	w/ PHVC	%d
0.3	0.2202	0.2222	0.90	0.2200	0.2210	0.45
0.4	0.1783	0.1806	1.31	0.1788	0.1794	0.31
0.434	0.1642	0.1669	1.64	0.1641	0.1646	0.32
0.5	0.1376	0.1406	2.18	0.1370	0.1373	0.21
0.6	0.0967	0.0985	1.85	0.0936	0.0938	0.22
0.7	0.0477	0.0486	1.91	0.0462	0.0460	-0.43

Table 4 Comparison of  $10K_Q$  of the propeller without and with PHVC

J	LCT			CFD		
	w/o PHVC	w/ PHVC	%d	w/o PHVC	w/ PHVC	%d
0.3	0.2542	0.2518	-0.97	0.2563	0.2550	-0.52
0.4	0.2210	0.2183	-1.21	0.2221	0.2213	-0.38
0.434	0.2091	0.2071	-0.96	0.2095	0.2089	-0.31
0.5	0.1854	0.1842	-0.61	0.1851	0.1847	-0.22
0.6	0.1464	0.1448	-1.07	0.1435	0.1436	0.06
0.7	0.0979	0.0964	-1.57	0.0957	0.0959	0.18

Table 5 Comparison of  $\eta_o$  of the propeller without and with PHVC

J	LCT			CFD		
	w/o PHVC	w/ PHVC	%d	w/o PHVC	w/ PHVC	%d
0.3	0.4136	0.4214	1.89	0.4098	0.4138	0.98
0.4	0.5135	0.5266	2.55	0.5126	0.5161	0.69
0.434	0.5425	0.5569	2.65	0.5409	0.5443	0.63
0.5	0.5907	0.6073	2.82	0.5890	0.5915	0.44
0.6	0.6312	0.6498	2.95	0.6228	0.6238	0.16
0.7	0.5424	0.5616	3.54	0.5376	0.5343	-0.61

Table 6  $K_T$  and  $K_Q$  acting on the each component of propulsion device( $J=0.434$ ) without and with PHVC

Forces	Propeller w/o cap (w/o PHVC)	Prop. cap (w/o PHVC)	Propeller (w/ PHVC)	PHVC (w/ PHVC)
$K_T$	0.16574	-0.00168	0.16617	-0.00159
$10K_Q$	0.20950	0.000032	0.20978	-0.000903

Table 6은 설계 전진비( $J=0.434$ )에서 수치해석 결과에서 프로펠러와 PHVC의 상호작용을 살펴보기 위해 장치별(프로펠러, 허브, PHVC 등) 추력과 토크 계수의 변화를 나타내고 있다. 추력의 경우 PHVC 자체는 음의 추력을 발생하는 반면에 PHVC로 인해 프로펠러 날개의 추력이 증가한 것을 볼 수 있다. 토크의 경우 PHVC가 저항체로 작용하여 프로펠러 날개의 토크를 증가시켰으나 PHVC 자체의 음의 토크가 상대적으로 커서 전체

토크가 감소하였다. 즉, PHVC가 프로펠러 날개의 추력은 증가시키고 토크는 감소시키는 효과를 통해 전체 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, PHVC는 cap의 영향을 포함하고 있다.

### 4.2 압력분포 및 후류

Figs. 8, 9는 설계 전진비에서 프로펠러 압력면, 흡입면(suction side)의 압력분포를 보여주고 있다. 압력면에서 PHVC로 인해 프로펠러 날개 뿌리 근처의 앞날(leading edge)부근과 허브캡 하류면에서 압력이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 PHVC 장착 후 프로펠러의 추력이 증가한 원인으로 판단된다. 흡입면의 경우에는 PHVC로 인한 압력분포의 변화를 잘 확인하기는 어려운 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 PHVC의 압력면과 흡입면의 압력분포를 나타내고 있고, 상류의 흡입면의 압력이 하류의 압력면의 압력보다 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 PHVC 자체는 음의 추력을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

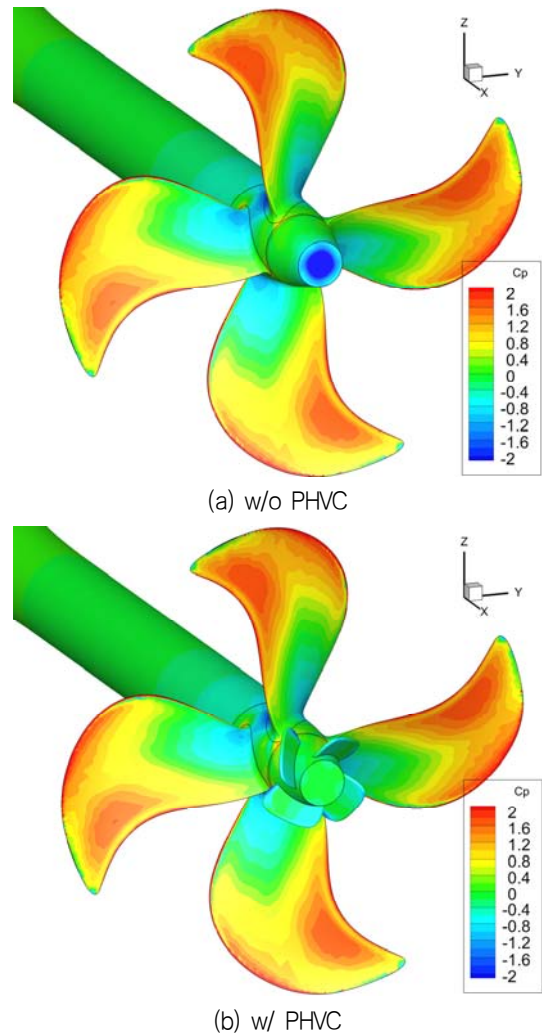


Fig. 8 Pressure distribution on the pressure side of the propeller with & without PHVC



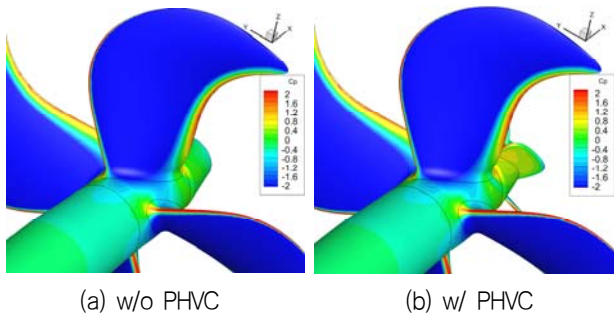


Fig. 9 Pressure distribution on the suction side of the propeller with/without PHVC

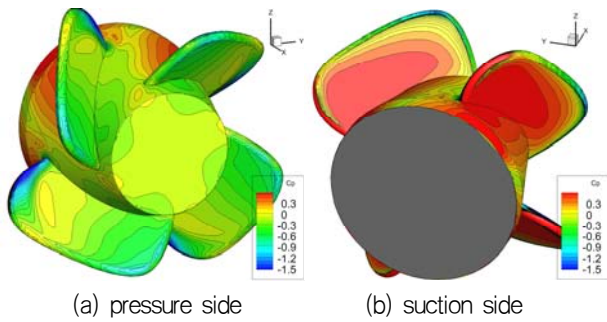


Fig. 10 Pressure iso-contour on the pressure and suction side of the PHVC

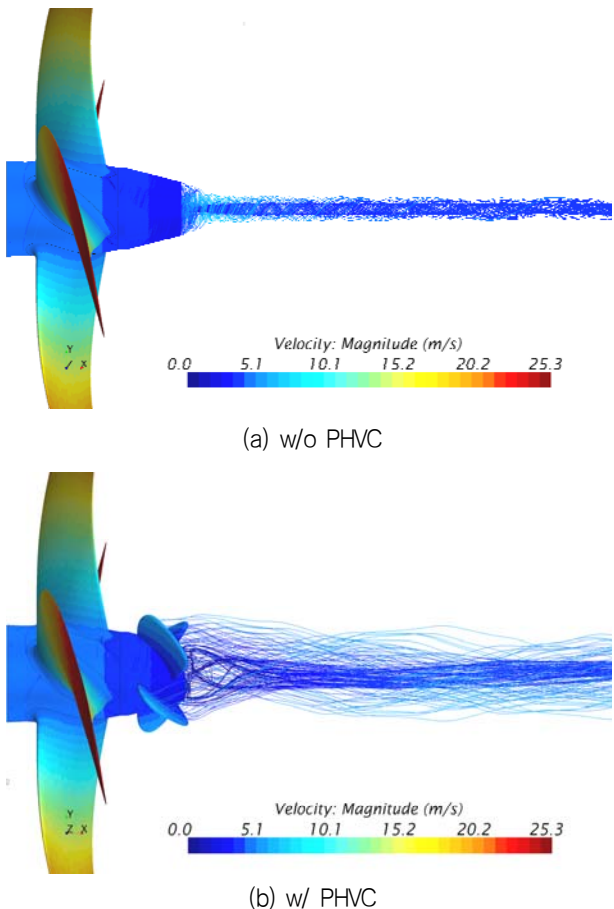


Fig. 11 Volume streamlines of hub vortex flow

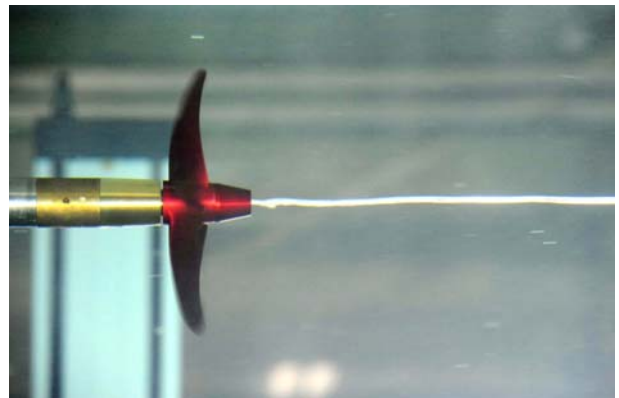


Fig. 12 Hub vortex cavitation observed in LCT POW test

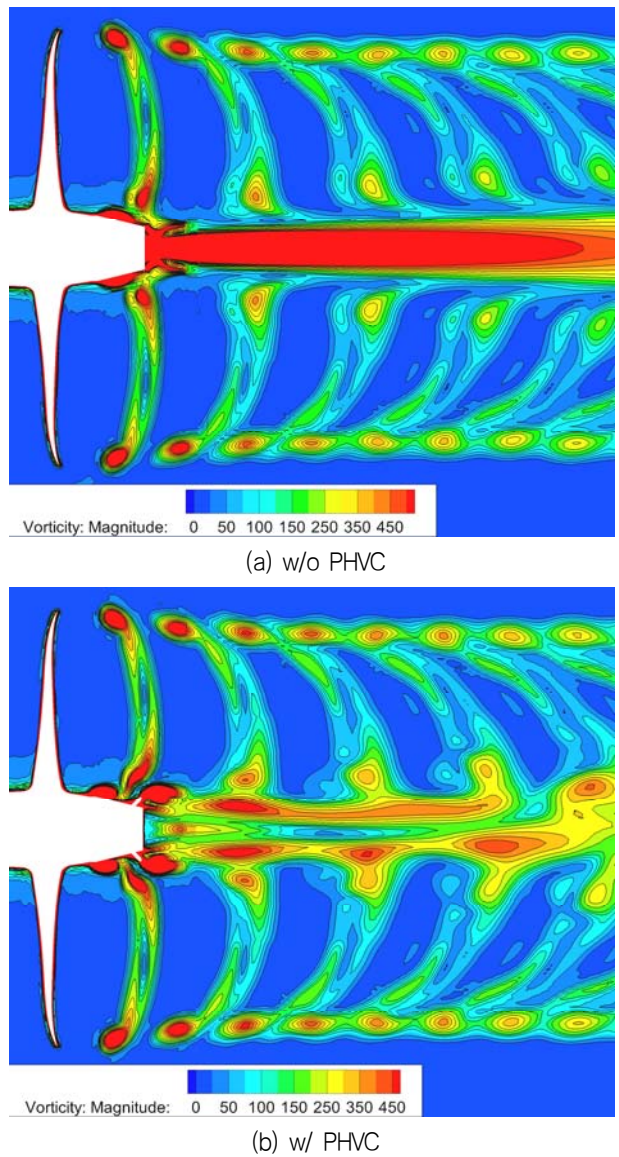
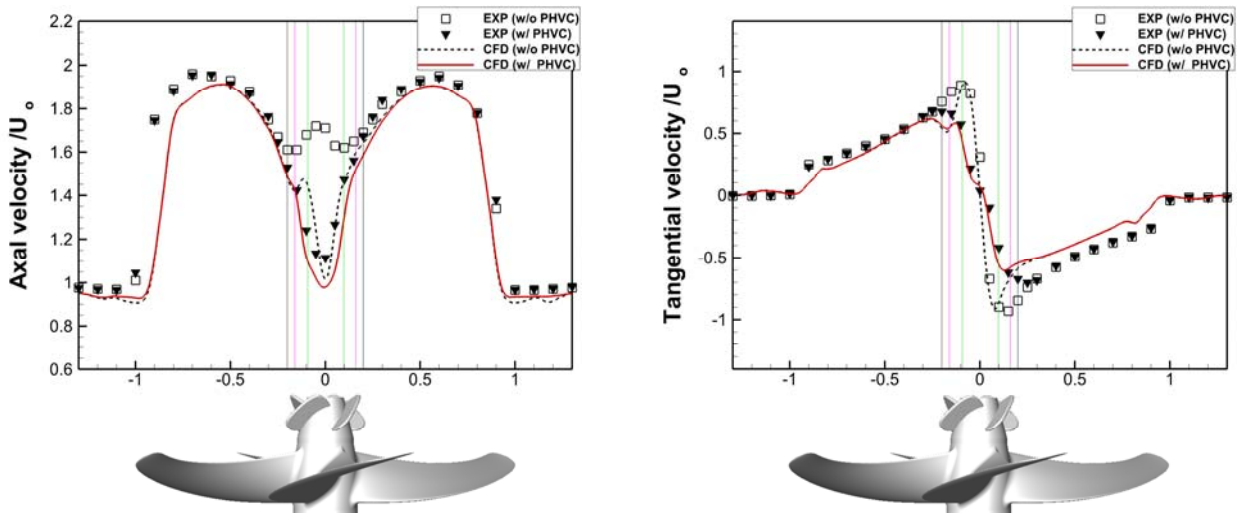
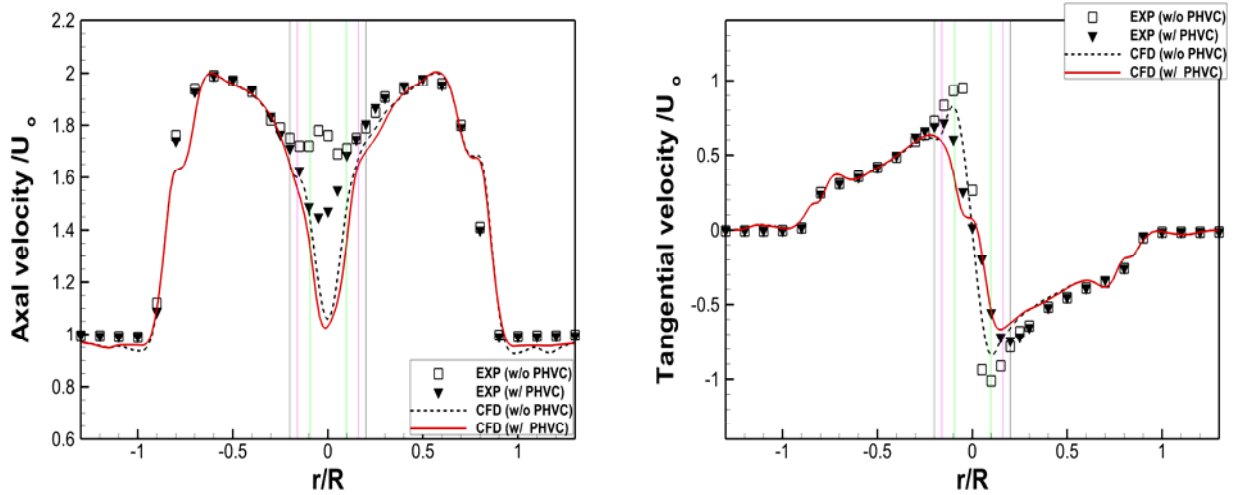


Fig. 13 Vorticity magnitude distribution at  $y=0$  plane

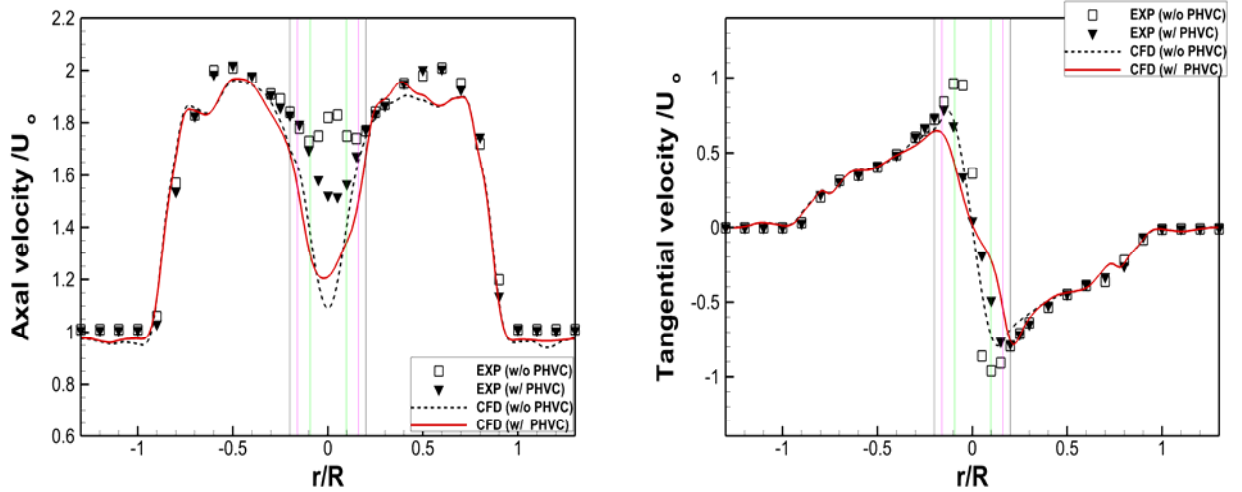
프로펠러 캡과 PHVC 하류에서 유동 특성은 Fig. 11에서 나타 난바와 같이 PHVC가 없는 경우 허브 보텍스가 강하게 나타나



(a)  $x/D = 0.5$



(b)  $x/D = 0.8$



(c)  $x/D = 1.1$

Fig. 14 Axial and Tangential velocity profiles at  $x/D = 0.5, 0.8, 1.1$

지만, PHVC를 부착한 경우 허브캡 하류면 근처에서 불규칙한 흐름 형태가 관찰되는 것 이외에는 프로펠러를 지난 유동의 흐름이

PHVC의 날개에 의해 산란되어 허브 보텍스가 약화된 것을 확인할 수 있다.

참고로, Fig. 12는 LCT에서 캐비테이션 조건에서 실험 PHVC가 없는 프로펠러에서 발생하는 허브 보오텍스 캐비테이션의 형상을 보여주고 있다.

이러한 현상은 Fig. 13에 나타낸 와도(vorticity)의 분포 비교에서도 확인할 수 있다. PHVC가 없는 후류에서 프로펠러 날개 끝 보오텍스(tip vortex)와 함께 뚜렷한 프로펠러허브 보오텍스를 관찰할 수 있다. 그에 반해, PHVC를 부착한 경우에 날개 끝 보오텍스가 잔존하지만 허브 보오텍스 강도가 많이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 프로펠러 하류면 유속분포 비교

본 절에서는 프로펠러 후류에서 국부유동의 변화를 조사하여 프로펠러와 PHVC의 상호작용에 의하여 프로펠러 하류의 회전유속과 축방향 유속 감소량, 즉, 유동의 운동에너지 회수(recovery) 정도를 살펴보고자 한다. KRISO LCT 모형시험에서 국부유동의 계측은 프로펠러 기준선과 프로펠러 허브 중심축이 만나는 점을 원점으로 하류방향으로 프로펠러 직경의  $0.5D$ ,  $0.8D$ ,  $1.1D$  떨어진 위치에서 수행되었다. 프로펠러 하류에서 상류를 바라볼 때 각 계측면에서  $z=(+)$ 6mm 떨어진 위치의 9사에서 3시 방향의  $x$ 축 방향과  $z$ 축 방향의 유속분포를 LDV(Laser Doppler Velocimeter)로 계측하였다. 모형시험과 CFD 결과는 모두 시간 평균값을 나타낸다.  $z$ 축으로 (+)6mm위치에서 유속분포를 측정할 이유는 PHVC 장착 경우에는 허브 보오텍스 캐비테이션이 발생하지 않았으나 PHVC가 없는 경우에는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 허브 보오텍스 캐비테이션이 발생하였기 때문이다. 이는 동력계 설치를 위하여 터널 시험부 트렁크 상부면 커버를 열어둔 상태 즉 대기압 상태로 시험을 수행하여 허브 보오텍스 캐비테이션을 억제할 수 없었고 캐비테이션 발생 영역 내에서는 LDV로 유속을 계측이 불가능하기 때문이다.

보는 바와 같이 허브 보오텍스 캐비테이션의 영역을 제외하기 위함이다.

Fig. 14에서 나타낸 바와 같이 프로펠러 하류에서 축방향 유속과 접선방향 유속분포의 계측치와 CFD 값은 전반적으로 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 특히 PHVC 장착 시 허브 반경 내 접선방향 유속 감소로 하류의 회전운동 에너지가 회수되는 경향은 수치해석 결과에서도 잘 보여주고 있다. 반면에 특히 PHVC가 없는 경우에 프로펠러 허브직경 내 영역에서 상대적으로 축방향 유속분포가 계측치와 큰 차이를 보이는 것은 CFD 해석에서는 Fig. 11과 같이 비정상 특성을 갖는 허브 보오텍스 캐비테이션을 고려하지 않아 실험에서 발생한 캐비테이션 체적에 의한 배수효과와 부력효과를 고려하지 못하여 기인한 것으로 사료된다. 이러한 영향은 다소의 차이를 갖고 하류로 갈수록 증가하나 프로펠러와 PHVC 상호작용에 의한 유속분포 변화특성은 잘 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 프로펠러 캡 위치에 부착하여 추진효율을 향상시킬 수 있는 장치인 PHVC의 유체성능 추정에 CFD 해석법을 적용하고 KRISO LCT 모형시험 결과를 통해 그 타당성을 검증한 결과를 제공하였다. PHVC 부착 유무에 따른 개별적인 해석조건에서 계산된 추력, 토크 및 단독효율 계수들은 모형시험과 좋은 일치를 보여주었다. 다만, PHVC 효과로 향상되는 작은 추력 증가량에 대한 추정 결과는 정량적인 차이를 보였으며, 이로 인해 PHVC를 부착하지 않은 조건에 대비한 프로펠러의 추진효율 증가량을 모형시험보다 다소 낮게 평가하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 CFD 접근법은 PHVC로 인한 추진효율의 증가를 정성적인 측면에서 잘 예측하였으며 그 물리적 타당성을 유동해석 결과를 통해 확인할 수 있었다. 특별히, 프로펠러와 PHVC의 상호작용으로 인한 프로펠러면 하류의 국부유동의 특성 변화의 경우 본 수치해석 결과는 LCT 모형시험 결과와 만족스러운 일치를 보여주었다. 결론적으로, PHVC와 같은 에너지절감장치의 유체성능 검증에 있어 설계 단계에서의 CFD의 유용성은 높다고 판단된다.

향후, 수치모델 검토 및 보다 정밀한 CFD 시뮬레이션을 통해 높은 전진비 영역을 포함하여 모형시험과의 정량적인 차이를 줄이기 위한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 산업원천기술사업과 민간기술협력사업으로 수행되었음을 밝히며 지원해 주신 산업통상자원부 및 방위사업청 유관 기관에 감사드립니다.

## References

- CD-adapco, 2015. *STAR-CCM+ v.10.04 User's Manual*. Available at: <http://www.cd-adapco.com>
- Hansen, R.H. Dinham-Peren, T & Nojiri, T., 2011. Model and Full Scale Evaluation of a 'Propeller Boss Cap Fins' Device Fitted to an Aframax Tanker. *Second International Symposium on Marine Propulsors, SMP'11*, Hamburg, Germany, June 2011, pp.186-196.
- Kang, Y.D. Kim, M.C. & Chun, H.H., 2004. A Study on the Design of a Biased Asymmetric Pre-swirl Stator Propulsion System. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(3), pp.13-21.
- Kawamura, T. Ouchi, K. & Nogiri, T., 2012. Model and Full Scale CFD Analysis of Propeller Boss Cap Fins(PBCF). *Journal of Marine Science and Technology*, 17, pp.469-480.



- Kim, K.S. Ahn, J.W. Park, Y.H. Kim, G.D. Kim, Y.I. & Lee, C.H., 2015. Experimental Study for Marine Propeller-PHVC Interaction in KRISO LCT. *Proceedings of Annual Autumn Conference, SNAK, Geoje*, 4-6 November 2015, pp.889-897.
- Lim, S.S. Kim, T.W. Lee, D.M., Kang, C.G. & Kim, S.Y., 2013. Parametric Study of Propeller Boss Cap Fins for Container Ships. *International Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 6, pp.187-205.
- Ouchi, K. Kawasaki, T. & Tamashita, M., 1990. Propeller Efficiency Enhanced by PBCF(Propeller Boss Cap Fins). *4th International Symposium of Marine Engineering (ISME'90) KOBE, JAPAN*, 15-19 October.
- Park, S.H. Seo, J.H. Kim, D.H. Rhee, S.H. & Kim, K.S., 2011. Numerical Analysis of a Tip Vortex Flow for Propeller Tip Shapes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.501-508.
- Shin, H.J. Lee, J.S. Lee, K.H. Han, M.R. Hur, E.B. & Shin, S.C., 2013. Numerical and Experimental Investigation of Conventional and un-Conventional Pre-swirl Duct for VLCC. *International Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 5(3), pp.414-430.
- Xiong, Y. Wang, Z. & Qi, W., 2013. Numerical Study on the Influence of Boss Cap Fins on Efficiency of Controllable-pitch Propeller. *Journal of Marine Science and Application*, 12, pp.13-20.

