

SVA Potsdam 프로펠러 단독 및 캐비테이션 성능 수치해석

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

Numerical Analysis of Non-Cavitating and Cavitating Performance of a SVA Potsdam Propeller

Je-In Kim¹·Il-Ryong Park^{1,†}·Ki-Sup Kim²·Jong-Woo Ahn²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea¹
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Korea Institute of Ocean Science & Technology, 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.

This paper presents numerical results of the performance of a marine propeller in cavitating and non-cavitating flow conditions. The geometry and experimental validation data of the propeller are provided in Potsdam Propeller Test Case(PPTC) in the framework of the second International Symposium on Marine Propulsors 2011(SMP'11) workshop. The PPTC includes open water tests, velocity field measurements and cavitation tests. The present numerical analysis was carried out by using the Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) method on a wall-resolved grid ensuring a $y^+ \approx 1$, where the SST $k-\omega$ model was mainly used for turbulence closure. The influence of the turbulence model was investigated in the prediction of the wake field under a non-cavitating flow condition. The propeller tip vortex flows in both cavitating and non-cavitating conditions were captured through adaptation of additional grids. For the cavitation flows at three operation points, Schnerr-Sauer's cavitation model was used with a Volume-Of Fluid(VOF) approach to capture the two-phase flows. The present numerical results for the propeller wake and cavitation predictions including the open water performance showed a qualitatively reasonable agreement with the model test results.

Keywords : Marine propeller(선박 프로펠러), Propeller open water test(POW, 프로펠러 단독시험), Cavitating flow(캐비테이션 유동), Tip vortex flow(날개 끝 보오텍스 유동), Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학), Potsdam propeller test case(PPTC)

1. 서론

선박의 주요 유동소음은 추진기 시스템에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 프로펠러의 회전으로 인하여 선미부에서 발생하는 변동압력(pressure fluctuation) 및 캐비테이션(cavitation) 현상은 승선감 저하 및 방사소음을 일으키는 원인이 된다(Muscari & Di Mascio, 2011). 이러한 현상을 추정하기 위해서는 회전하는 프로펠러 주위의 압력장(pressure field)과 속도장(velocity field)을 정확히 예측해야 한다. 저항 및 추력과 같은 선체에 작용하는 힘들과 선체 주위 국부유동(local flow)의 특징을 결정하는 프로펠

러 단독성능(Propeller Open Water performance, POW) 및 선체-프로펠러 상호작용을 이해하기 위해 모형시험과 함께 포텐셜유동 및 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 해석들이 진행되고 있다(Kim & Lee, 2005; Moon, et al., 1996; Kim, et al., 2014; Joung, et al., 2014; Lee, et al., 2015).

최근, 독일 함부르크(Hamburg)에서 개최된 SMP'11(the second international Symposium on Marine Propulsors 2011)에서 추진기 주위 유동에 대한 CFD 기법을 검증하기 위해 Delft foil 과 SVA Potsdam 프로펠러에 대한 모형시험 결과와 각 조건에 해당하는 CFD결과들을 비교하여 발표하였다(Abdel-Maksoud,

2011). 여기서, SVA Potsdam 프로펠러의 단독성능 및 캐비테이션 성능에 대한 벤치마크 시험조건들은 PPTC(Potsdam Propeller Test Case)라고 명명하였다. PPTC조건 해석에 참여한 기관은 11개이며 10개의 수치해석 프로그램의 결과를 모형시험 결과와 비교하여 검증하였다 (Fujiyama, et al., 2011; Gaggero, et al. 2011; Li, 2011; Salvatore, et al., 2011; Tuomas, et al., 2011).

본 논문에서는 SMP'11의 PPTC 조건에 나타나 있는 대상 프로펠러의 단독성능, 날개 끝(tip) 주위 국부유동 및 캐비테이션 성능의 세 가지 시험조건에 대한 수치해석을 수행하고 각각의 결과를 모형시험 결과와 비교, 검증한 내용을 보여준다. 먼저, 프로펠러 단독성능 해석은 예인수조(towing tank)와 캐비테이션터널(cavitation tunnel)에서 각각 수행된 모형시험 조건을 모사하였으며, 단독성능 추정에 있어 수치격자 의존성을 검토하였다. 날개 끝 주위 국부유동의 경우 날개 끝 보오텍스 유동(tip vortex flow)에 대한 수치해석 정도를 개선하기 위해 격자세분화(grid adaptation)를 도입한 계산을 수행하고 모형시험에서 LDV(Laser Doppler Velocimetry)로 측정한 유속분포와 비교하였다. 또한, 본 조건의 경우 난류모델에 따른 수치해석 결과의 변화를 검토하였다. 캐비테이션 유동 해석에서는 주어진 세 가지 모형시험 조건에 따른 캐비테이션 형상과 이 때 변화되는 프로펠러의 추력을 주로 비교하였다. 일반적으로, 수치감쇠(numerical damping)의 영향으로 해석하기 쉽지 않은 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 추정 정도를 높이기 위해 앞서 설명한 날개 끝 주위에 격자세분화를 적용한 수치해석을 수행하였다. 끝으로, 수치해석 결과에 대한 검증을 통해 프로펠러의 단독성능 및 캐비테이션 성능 추정에 있어 본 연구에서 사용한 CFD 기법의 정도에 대해 논의하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 지배방정식

본 논문에서 프로펠러의 중심을 기준으로 한 좌표계는 Fig. 1과 같으며, 유동의 진행방향을 +x축, 프로펠러의 우현을 +y축 그리고 프로펠러의 상방향을 +z축으로 두었다. 상류방향으로 볼 때 프로펠러는 시계방향으로 회전하며, 회전 각도는 θ , 프로펠러의 반경은 R 로 표시하였다. r 은 임의의 반경 위치를 나타낸다. 프로펠러 주위 유동을 비압축성 난류유동(incompressible turbulent flow)으로 가정하고 지배방정식으로 사용한 연속방정식(continuity equation)과 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식의 적분방정식의 형태는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{V} dV + \int_S \rho \vec{V} \vec{V} \cdot \vec{n} dS \\ = \int_S (T - pI) \cdot \vec{n} dS + \int_V \rho \vec{b} dV \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체 밀도, \vec{V} 는 유체의 속도벡터, \vec{n} 은 검사체적면의 법선방향 단위벡터, p 는 정압(static pressure), I 는 단위텐서 그리고 \vec{b} 는 단위 질량당 체적력 벡터를 나타낸다. T 는 응력 텐서(stress tensor)이며 난류 와점성(turbulent eddy viscosity) μ_t 를 포함하여 다음과 같이 정의된다.

$$T = (\mu + \mu_t) \left[\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) I \right] \quad (3)$$

여기서, μ 는 동점성계수이며, 위첨자 \mathbb{T} 는 전치행렬을 뜻한다.

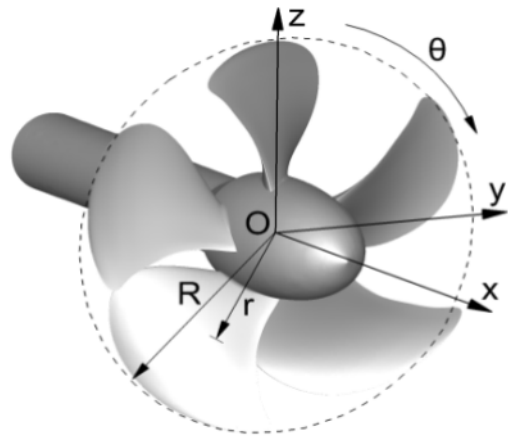


Fig. 1 Coordinates system

지배방정식의 해는 2차 정확도의 이산화기법을 사용하는 유한 체적법(finite volume method)으로 구하며, 이 기법을 기반으로 하는 범용소프트웨어인 STAR-CCM+를 이용하여 수치해석을 수행하였다 (CD-adapco, 2015). 비압축성 유동 해석 시 요구되는 속도-압력을 연성하는 방법으로 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation, Patankar, 1980)방법을 이용하였다.

프로펠러 회전은 프로펠러 면으로 유동이 균일하게 유입되는 문제이므로 격자의 운동이 필요치 않는 MRF(Moving Reference Frame)방법을 사용하여 구현하였다.

2.2 난류모델

유동은 완전히 발달된 난류로 가정하고 해석을 위해 단독성능 및 캐비테이션 성능 계산에는 역 압력 구배가 존재하는 경우 유동 해석에 이점이 높은 점성저층(viscous sub-layer) 영역에서의 $k-\omega$ 모델을 적용하고 그 외 영역에서 $k-\epsilon$ 모델을 결합하는 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 난류모델 (Menter, 1994)을 적용하였다. 캐비테이션이 발생하지 않은 조건에서 모형시험의 LDV 측정결과와 날개 끝 주위 국부유동 해석결과와의 비교에서는 RSM(Reynolds Stress Model, Lardeau & Manceau, 2014), SST $k-\omega$, Realizable $k-\epsilon$ 의 세 가지 난류모델을 적용하여 해의 변화를 비교하였다.

2.3 캐비테이션 모델

프로펠러에 발생하는 캐비테이션 현상을 해석하기 위해서는 VOF(Volume-Of-Fluid)법을 이용한 이상유동(two-phase flow) 해석을 수행하였다. 이상유동의 경우 지배방정식에 포함된 밀도와 점도는 유체의 체적분율에 따라 다음과 같이 재정의된다.

$$\rho = \alpha_v \rho_v + \alpha_l \rho_l \quad (4)$$

$$\mu = \alpha_v \mu_v + \alpha_l \mu_l \quad (5)$$

여기서, 아래첨자 v 는 증기상(vapor phase), l 은 액체상(liquid phase)을 나타내며 α 는 유체의 체적분율을 나타낸다.

STAR-CCM+에서 도입하고 있는 캐비테이션 모델은 단순화된 Rayleigh-Plesset방정식을 기반으로 만들어진 Sauer (2000)가 제시한 모델이다. 해석을 위한 증기의 체적분율(volume fraction) 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = R_e - R_c \quad (6)$$

여기서 \vec{V}_v 는 증기의 속도벡터이다. 우변의 R_e 와 R_c 는 각각 캐비테이션 내부의 증기와 액체상 사이에 기포의 기화(evaporation)와 응축(condensation)을 나타내는 물질 전달 소스 항(source term)이다. 기화와 응축항은 식 (7) 및 (8)와 같으며, 기화압력 p_v 를 기준으로 압력이 높고 낮음에 따라 적용항이 결정된다.

$$p_v \geq p_{ref} \text{ 일 때,}$$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p_{ref}}{\rho_l}} \quad (7)$$

Table 1 Principal dimensions of VP1304 propeller

| Item | | dimension |
|-------------------|----------------|------------------------------|
| Diameter | D | 0.250m |
| Pitch ratio | $P_{0.7c}/D$ | 1.635 |
| Area ratio | A_B/A_O | 0.77896m |
| Chord length | $c_{0.7}$ | 0.10417m |
| Skew | θ_{EXT} | 18.837 |
| Hub ratio | d_h/D | 0.300 |
| No. of blade | Z | 5 |
| Sense of rotation | | right |
| Type | | Controllable Pitch Propeller |

Table 2 Model test conditions for open water tests, velocity field measurement and cavitation tests

| | n [1/s] | J [-] | K_T [-] | σ_n [-] |
|---------|---------------------------|------------|------------------------|-------------------|
| Case1 | 15 (towing tank) | 0.6~1.4 | Open water performance | - |
| | 20 (cavitation tunnel) | | | |
| Case2 | 23 | 1.253 | 0.250 | - |
| Case3.1 | 24.987 | 1.019 | 0.387 | 2.204 |
| Case3.2 | 24.986 | 1.269 | 0.245 | 1.424 |
| Case3.3 | 25.014 | 1.408 | 0.167 | 2.000 |

$p_v \leq p_{ref}$ 일 때,

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{ref} - p_v}{\rho_l}} \quad (8)$$

이 때, R_B 는 공기기포의 반경을 나타내고, 다음과 같이 표현된다.

$$R_B = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_v} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

여기서, n_v 는 유동장내 단위부피 당 기포 개수를 나타낸다. 캐비테이션 해석의 조건에서 초기 기포 크기(initial seed radius) $R_{Bini} = 1.0 \times 10^{-6}$ m로 설정하고 $n_v = 1.0 \times 10^9 / m^3$ 의 값을 사용하였다. 수송방정식의 소스항인 R_e 와 R_c 는 α_v 가 0과 1일 때 0의 값을 가진다.

STAR-CCM+에서 도입하고 있는 캐비테이션 모델의 식과 계수들에 대한 더 자세한 설명은 Sauer (2000)의 문헌에서 찾을 수 있다.

3. 수치해석 결과

프로펠러 성능 해석에서 전진비(advance ratio), 추력계수, 토크계수, 단독효율계수 그리고 캐비테이션 수(cavitation number)에 대한 정의는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (10)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (11)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (12)$$

$$\eta_o = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (13)$$

$$\sigma_n = \frac{(p_{ref} - p_v)}{0.5\rho n^2 D^2} \quad (14)$$

여기서, V_A 는 균일류의 유속, n 은 프로펠러 회전수, D 는 프로펠러 직경, ρ 는 물의 밀도(density), T 는 추력, Q 는 토크, p_{ref} 는 터널 및 유동장의 출구 경계면에 정의된 정압이고, p_v 는 주어진 온도에서의 증기압(vapour pressure)을 각각 나타낸다.

3.1 대상 프로펠러 및 해석 조건

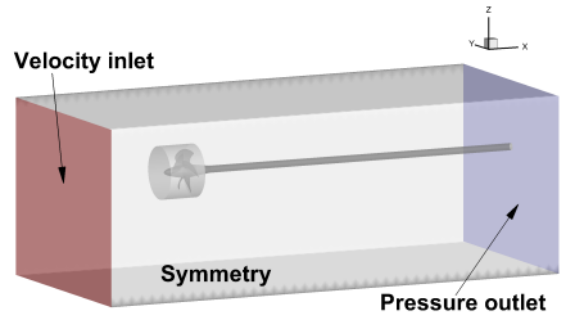
본 논문의 해석 대상이 되는 프로펠러는 CFD 검증을 위한 벤치마킹 테스트를 위해 SVA Potsdam 모형수조(model basin)에서 제공한 가변피치(controllable pitch)형 VP1304프로펠러이다. 이 프로펠러의 형상은 Fig. 2와 같으며, 프로펠러의 주요제원은 Table 1에 나타나 있다.



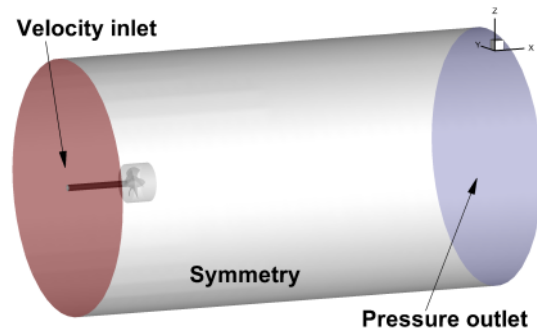
Fig. 2 SVA PPTC propeller model

SMP'11의 PPTC 조건에 나타나 있는 프로펠러 단독성능 (Case1), 날개 끝 속도장 측정(Case2) 및 캐비테이션 성능시험 (Case3) 조건들은 Table 2에 요약되어 있다. Case1의 경우 예인수조와 캐비테이션터널의 모형시험 조건들을 나타낸다. 이 때 회전수는 각각 15rpm 와 20rpm이다. Case2의 경우 캐비테이션터널에서 프로펠러 회전수 23rpm와 전진비 1.253의 조건에서 날개 끝 주위 유속을 측정한 조건을 나타낸다. 캐비테이션 성능시험인

Case3의 경우, SVA 캐비테이션터널에서 고정된 프로펠러 회전수와 세 가지 캐비테이션 조건에 대한 전진비 및 캐비테이션 수를 보여주고 있다. 참고로, 예인수조 시험조건에서 온도 $T=17.5^\circ\text{C}$, 밀도(density) $\rho=998.37 \text{ kg/m}^3$, 운동학적 점성계수(kinematic viscosity) $\nu=1.07\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이며, 캐비테이션터널 시험조건인 온도 $T=23.2^\circ\text{C}$, 밀도 $\rho=997.44 \text{ kg/m}^3$, 운동학적 점성계수 $\nu=9.337\times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.



(a) Towing tank condition

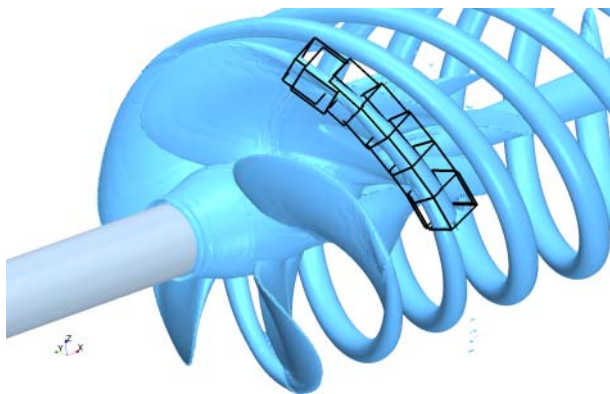


(b) Cavitation tunnel condition

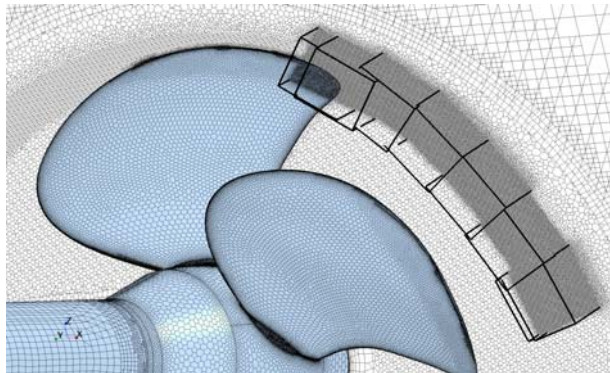
Fig. 3 Flow domains and boundary conditions

Fig. 3(a)는 SVA 예인수조 시험조건을 바탕으로 결정된 계산 영역의 모습을 보여주고 있다. 계산영역의 크기는 프로펠러 직경을 기준으로 프로펠러 중심에 대해 수심조건 1.5D를 고려하였으며, 측면과 유동장의 바닥까지의 거리는 2.5D이다. 여기서, 유동장의 길이는 11D로 결정하였다. 상류 경계면에서는 유속유입(velocity inlet)조건, 하류경계면은 압력유출(pressure outlet)조건, 측면 및 상하면은 slip-wall조건인 대칭면(symmetry plane)조건을 적용하고, 프로펠러와 허브는 고체 경계면(solid wall)으로 처리하였다. Fig.3(b)와 같이 캐비테이션터널에서의 단독성능 시험에 대한 수치해석 영역은 모형시험과 같이 프로펠러 회전축이 유동의 상류방향을 향하도록 하였다. 프로펠러는 균일한 유속 조건의 유동장에서 회전하고, 총 세 가지의 격자계에서 계산이 수행되었다. 격자 간 약 2.5배의 격자수 비율을 유지하도록 하여, 가장 성긴 격자(coarse grid)의 수가 약 1.7백만(M)개, 중간 격자(medium grid)가 약3.7M개 그리고 가장 조밀한 격자(fine grid)가 약 10M개이며, 단, 프로펠러 날개 끝 속도장 측정 및 캐비테이션터널조건 계산은 가장 조밀한 격자계에서만 수행되었다. 회전하는 프로펠러 영역은 Polyhedral 격자로 구성되고, 그 밖의 유동장은 Trimmer 격자로 구성되었다. 한편, 프로펠러 날개 끝

표면과 그 주위의 국부유동 및 날개 끝 보오텍스 캐비테이션은 격자의 해상도가 낮을 경우 수치감쇠의 영향으로 타당한 수치해석 결과를 얻기 힘들다. 이러한 이유로, Case2 와 Case3의 날개 끝 유동 및 날개 끝 보오텍스 캐비테이션을 보다 타당하게 해석하기 위해 가장 조밀한 격자계에 대해서 한 개의 날개 끝 표면에서부터 날개 끝 보오텍스를 따라 격자세분화를 수행하였다. 참고로, 날개 끝 영역의 공간격자 평균 크기는 프로펠러의 직경을 기준으로 $0.004D$ 이고 날개 끝에 마련한 격자세분화 영역은 이보다 약 4배 적은 $0.001D$ 의 격자 간격을 가지도록 하였다. 이로 인해 전체 격자수는 약 15M개로 증가되었다. Fig. 4는 격자가 세분화된 영역과 그 주위의 격자분포를 보여주고 있다.



(a) Grid adaptation region



(b) Adapted grid distribution

Fig. 4 Perspective view of the grid adaptation region along the tip vortex and adapted grid distribution around the propeller tip

3.2 프로펠러 단독성능 (Case 1)

Fig. 5와 6은 예인수조와 캐비테이션터널 시험에서 측정한 대상 프로펠러의 단독성능을 POW곡선으로 수치해석 결과와 비교하고 있다. 여기서, 모형 크기의 프로펠러 성능시험에서 중력의 영향은 크지 않으므로 중력은 고려하지 않았다. 세 가지의 격자계에 대해 예인수조의 단독성능 시험 계산 결과에서 격자수 증가에 따른 타당한 해의 수렴성을 볼 수 있다. 가장 큰 전진비 1.4를 제외하고는 모형시험 결과와 비교적 만족스러운 것을 볼 수 있다. 가장 성긴 격자의 경우 예인수조의 모형시험 결과와 비교해서 전체적으로 추력은 평균 약 9.42%, 토오크는 약 4.13% 그

리고 효율은 약 7.28%의 차이를 보여주었다. 가장 조밀한 격자를 이용한 결과의 경우 예인수조의 모형시험 결과와 비교해서 전체적으로 추력은 평균 약 5.95%, 토오크는 약 2.45% 그리고 효율은 약 5.49%의 차이를 보여주었다. 본 수치해석 결과를 살펴볼 때 격자수의 차이는 지만 프로펠러 단독성능 해석 관점에서 가장 성긴 격자의 결과도 만족스러운 것을 볼 수 있다.

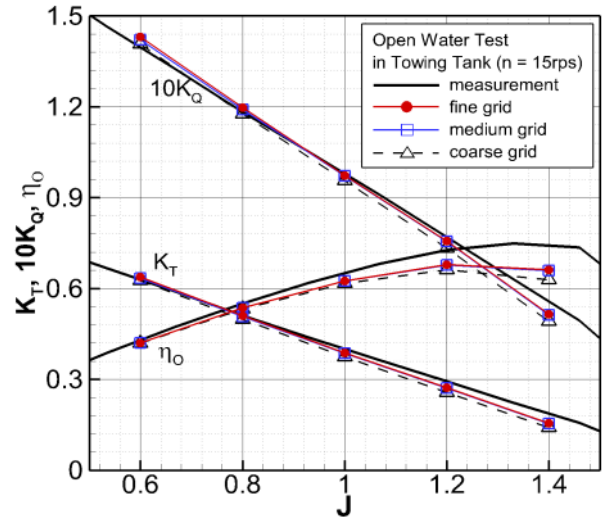


Fig. 5 Comparison of thrust, torque and efficiency coefficients for POW tests in towing tank

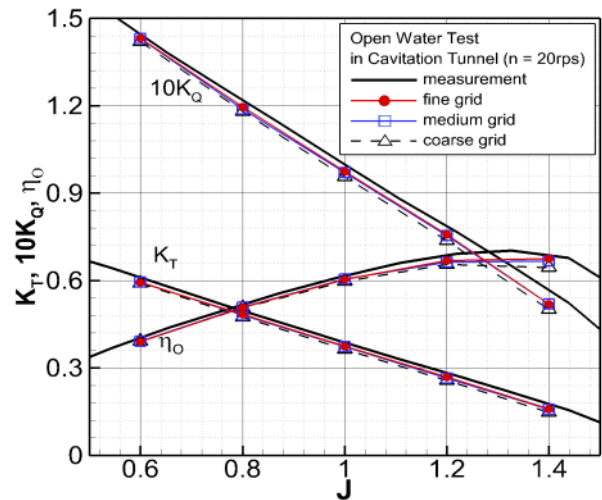
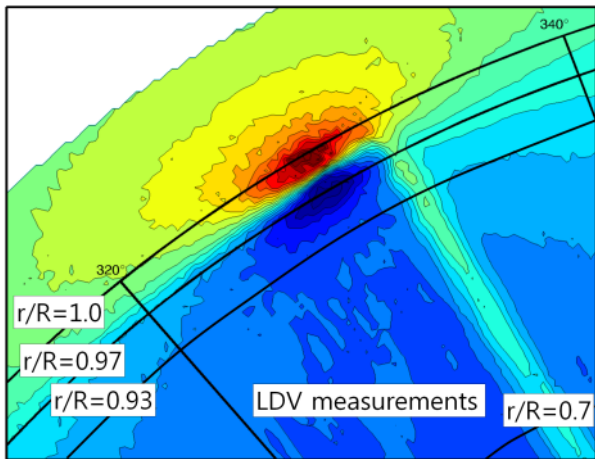
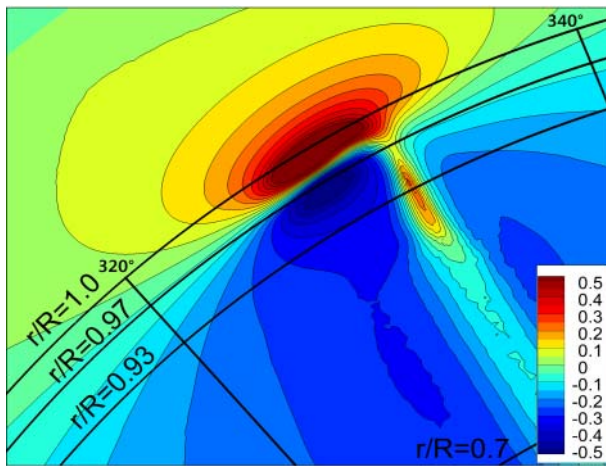


Fig. 6 Comparison of thrust, torque and efficiency coefficients for POW tests in cavitation tunnel

Fig. 6의 캐비테이션터널 시험의 경우 높은 전진비에서 예인수조의 결과보다 비교적 더 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 본 수치해석 결과는 캐비테이션터널 시험결과와 비교하여 가장 성긴 격자의 경우 캐비테이션터널 시험 결과와 비교해서 전체적으로 추력은 평균 약 7.94%, 토오크는 약 5.48% 그리고 효율은 약 3.71%의 차이를 보여주었다. 가장 조밀한 격자를 이용한 결과의 경우 전체적으로 추력은 약 3.48%, 토오크는 약 1.61% 그리고 효율은 약 2.41%의 차이를 보여주었다.



(a) Exp.

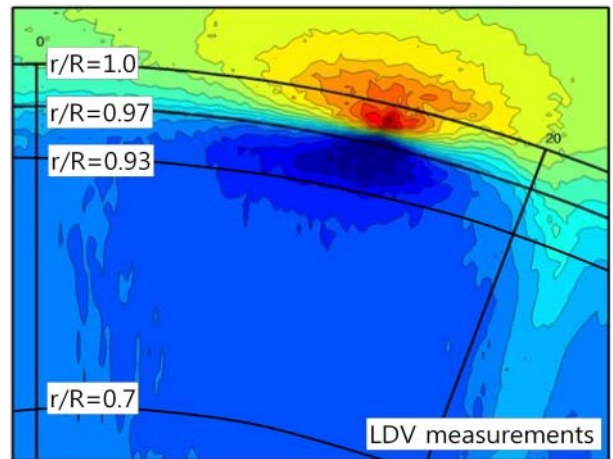


(b) CFD

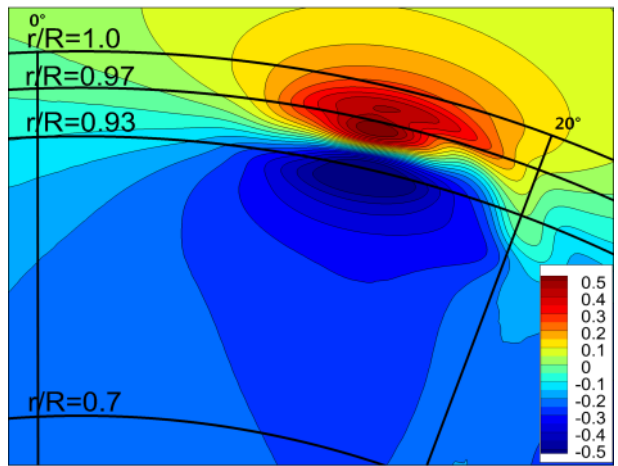
Fig. 7 Comparison of the axial velocity distribution at $x/D=0.1$ near a blade tip in the propeller wake

3.3 프로펠러 날개 끝 속도장 측정 (Case 2)

대상 프로펠러의 날개 끝 국부유동에 대한 수치해석은 추력일치법(thrust identity)을 통해 결정된 유입속도 7.075 m/s로 계산 되었으며 이에 해당하는 전진비는 1.2304이다. Fig. 7과 8은 LDV계측 위치가 프로펠러 중심으로부터 하류 방향으로 각각 $x/D = 0.1$ 과 0.2 인 위치에서 프로펠러 날개 끝 주위의 축방향 속도(axial velocity)분포를 모형시험 계측결과와 비교해서 나타내고 있다. 여기서, 날개가 12시 방향에 놓인 상태를 원주각 0° 로 두었을 때 날개의 위치는 각각 0° 와 72° 에 놓인 상태이다. 수치해석 결과는 모형시험과의 비교를 위해 격자세분화가 이루어진 날개가 상기 언급한 위치에 놓이도록 후처리하였다. $x/D=0.1$ 인 경우, 전체적으로 유속의 분포 및 반경 $0.97 < r/R < 1$ 영역에 놓여있는 보오텍스 중심의 위치가 만족스러운 일치를 보여주고 있다. 다만, $x/D=0.2$ 의 경우 그림에 제시된 반경을 기준으로 보오텍스 중심의 위치가 모형시험의 경우 $r/R=0.97$ 반경 근방에 위치하지만 수치해석의 경우 $r/R=0.93$ 반경 근방에 위치하고 있다. 이러한 차이는 수치감쇠 또는 수치해석에서 차폐효과가 있을



(a) Exp.

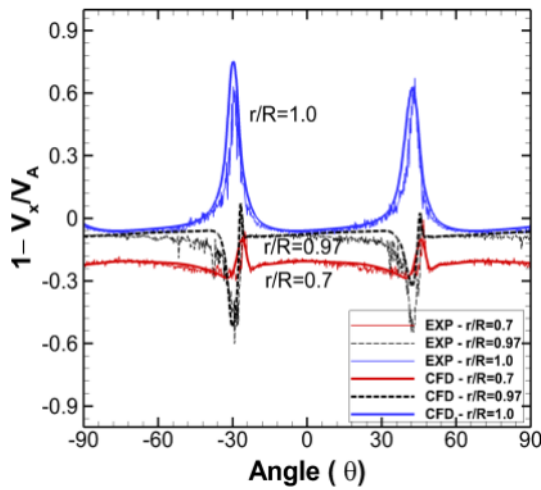


(b) CFD

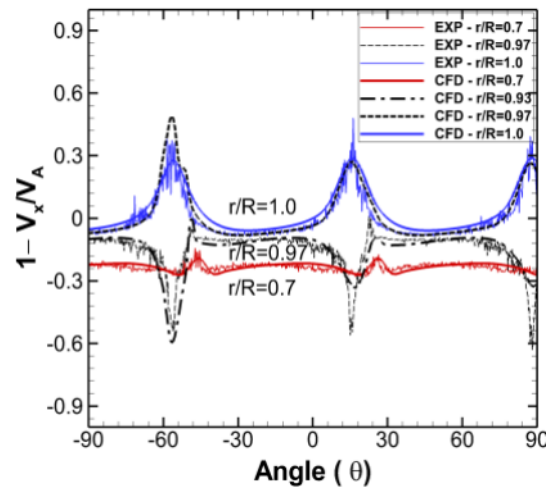
Fig. 8 Comparison of the axial velocity distribution at $x/D=0.2$ near a blade tip in the propeller wake

실제 크기와 모양의 캐비테이션터널 벽의 영향을 고려하지 않은 원인으로 판단되며, 시험조건 등의 차이를 검토 중에 있다. Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 결과에서 $r/R=0.7, 0.97$ 그리고 1.0 의 반경에서 원주방향을 따라 -90° 에서 90° 선상의 축방향, 반경방향(radial direction) 그리고 원주방향(circumferential direction) 유속 성분들을 모형시험과 비교해서 나타낸 것이다. 다소 약간의 차이를 보이는 원주방향 유속을 제외한 계산된 모든 유속은 모형 시험과 만족스러운 일치를 보여주고 있다. 여기서, $x/D=0.1$ 의 비교를 나타내는 그림에서 날개 끝 보오텍스를 따르는 격자세분화 된 영역은 -30° 부분이고, $x/D=0.2$ 의 경우 이 영역은 -60° 부근이며, 이들 영역에서 수치해석에서 얻은 축방향과 원주방향 속도분포가 다소 개선된 결과를 보여주고 있다. 한편, 앞서 언급한 것과 같이 $x/D=0.2$ 의 결과에서 보오텍스 중심 위치의 차이로 수치해석의 $r/R=0.93$ 반경의 유속이 모형시험의 $r/R=0.97$ 반경의 결과와 비슷한 것을 볼 수 있다.

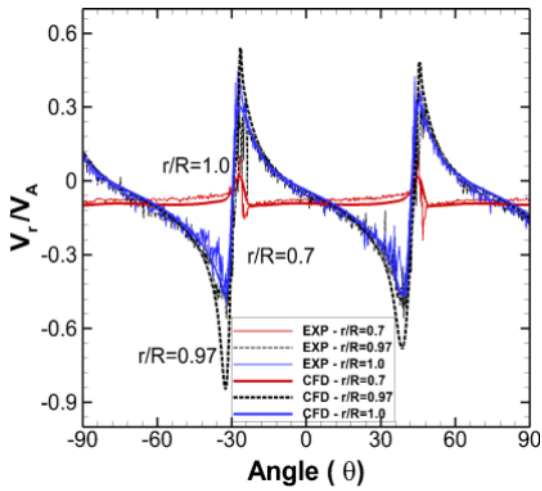
Fig. 10은 격자세분화가 이루어진 날개에 대해 $x/D=0.1$ 에서 비교한 유속 성분들을 난류모델에 따라 비교하고 있다. 여기서, 사용된 난류모델은 RSM, SST $k-\omega$, Realizable $k-\epsilon$ 이다. 본



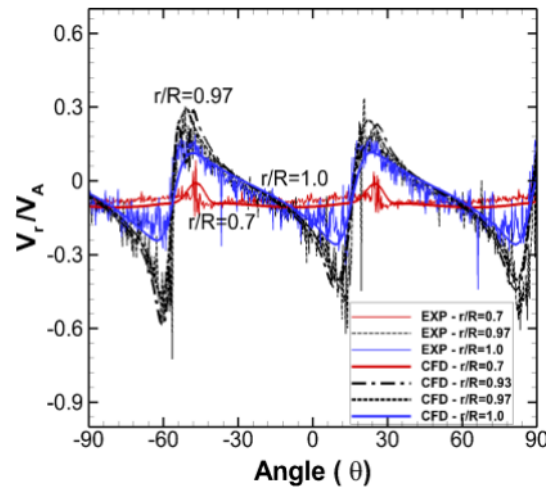
(a) Axial velocity at $x/D=0.1$



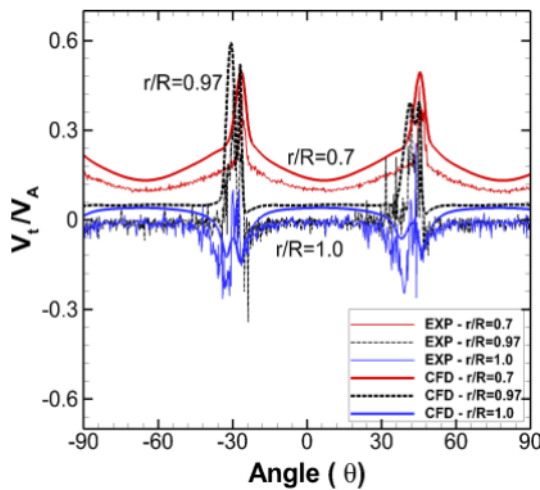
(b) Axial velocity at $x/D=0.2$



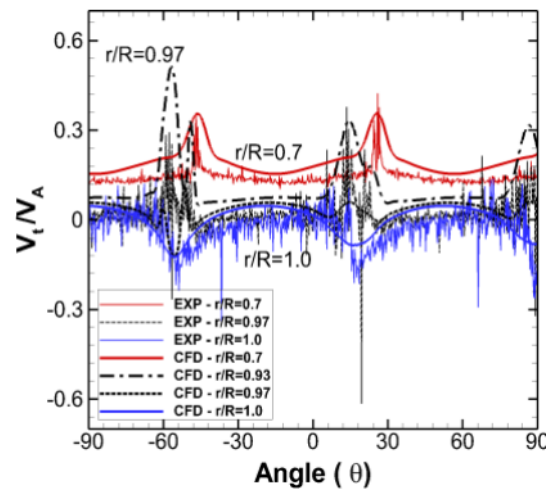
(c) Radial velocity at $x/D=0.1$



(d) Radial velocity at $x/D=0.2$



(e) Circumferential velocity at $x/D=0.1$

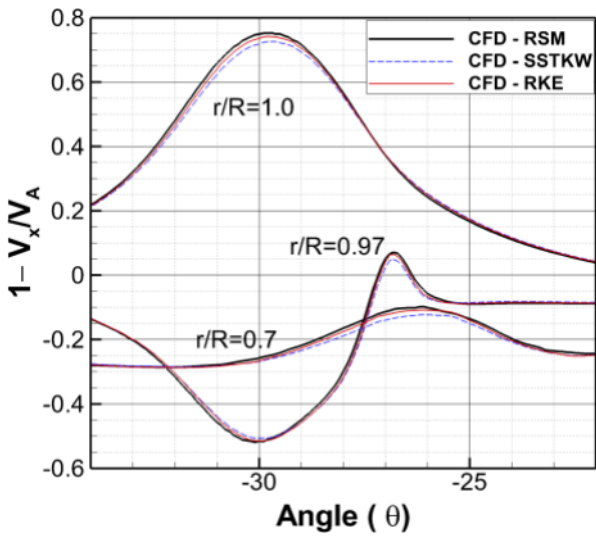


(f) Circumferential velocity at $x/D=0.2$

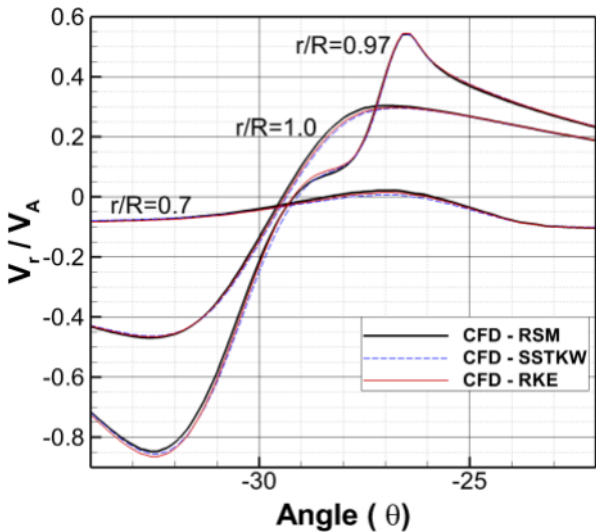
Fig. 9 Comparison of the LDV measured and computed velocity components' profiles over a circumferential period at the radii $r/R=0.7,0.97$ and 1.0 at $x/D=0.1$ and 0.2 in the propeller wake

연구의 수치해석 결과에서는 난류모델 간 축방향 및 반경방향의 유속 차이는 크지 않은 것을 볼 수 있다. 다만, 날개 끝 주위 원

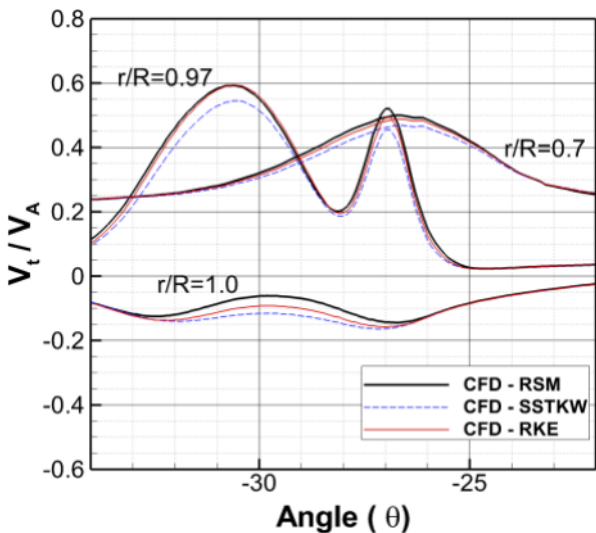
주방향 속도에서 RSM모델과 나머지 두 모델 간의 약간의 차이를 확인 할 수 있다. 일반적으로 고차모델인 RSM모델이 모형시험과



(a) Axial velocity

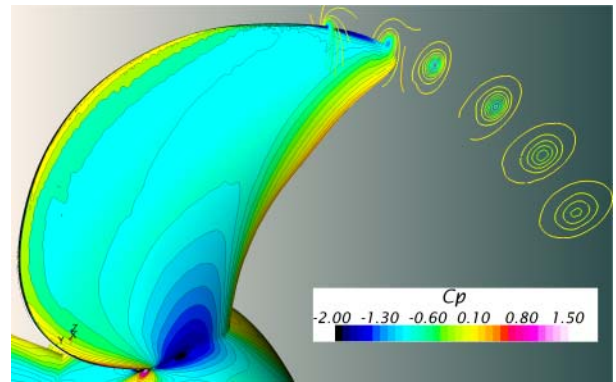


(b) Radial velocity

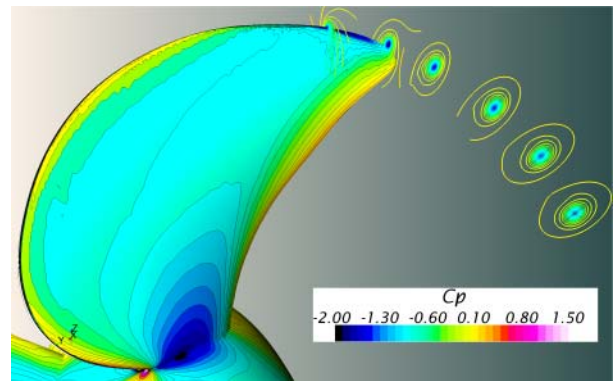


(c) Circumferential velocity

Fig. 10 Comparison of the Velocity components' profiles among turbulence models at $x/D=0.1$



(a) W/o grid adaptation



(b) W/ grid adaptation

Fig. 11 Pressure coefficient distribution on the propeller surface and along the tip vortex

더 잘 일치하는 것으로 알려져 있지만, 본 수치해석 결과를 통해 충분히 많은 격자를 사용하였을 때 Realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델이 RSM 모델과 비교하여 만족스러운 정확도의 해를 제공하는 것으로 판단된다. 이러한 이유로, 계산의 효율을 고려하여 캐비테이션 성능 해석에서도 프로펠러 단독성능 해석과 마찬가지로 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였다.

Fig. 11은 날개 표면 및 날개 끝 보오텍스를 따르는 압력계수 (pressure coefficients, $C_p = (p - p_{ref}) / 0.5\rho V_A^2$) 분포를 비교하고 있다. 날개 끝 주위로 격자세분화를 적용한 경우 낮은 압력이 날개 끝 표면에서부터 날개 끝 보오텍스 선을 따르는 것을 볼 수 있지만, 격자를 집중하지 않은 날개의 경우 보오텍스 선을 따르는 낮은 압력 거동을 잘 추정하지 못하는 것을 볼 수 있다.

3.4 캐비테이션 성능 (Case 3)

세 가지 조건에서의 캐비테이션 성능시험 계산은 추력일치를 통해 전진비를 재조정된 조건에서 계산되었다. 즉, 캐비테이션이 발생하지 않는 상태에서 회전수는 25rps로 고정한 뒤, 유입속도를 조절하여 실험에서 측정된 추력 값을 맞추었다. 그런 다음, 주어진 캐비테이션 수에 맞춰 터널 내부의 압력을 낮추고 결정된 유입속도로 캐비테이션 계산을 수행하였다. 추력일치법에 의해 결정된 유입속도는 Table 3에 나타나 있다. 수치해석 결과에서 캐비테이션 형상을 가시화하기 위해 수증기 체적분율 값을 0.2인

면을 사용하였다. SMP'11의 보고서에서 수치해석 결과들은 체적분율 0.2, 0.5, 0.8의 값으로 가시화하여 비교되었다. 이 때, Case 3.1의 경우 대체로 체적분율 값을 0.5로 가시화 한 경우 캐비테이션 관찰과 좋은 일치성을 보였고, Case 3.2와 Case 3.3의 경우 체적분율 0.2의 값으로 가시화 한 결과가 모형시험 결과와 좋은 일치성을 보이는 것으로 검토되었다. Case 3.1에 대한 본 수치해석 결과에서는 미소한 캐비테이션 체적 변화가 있지만 체적분율 0.2와 0.5의 차이가 크지 않았다. Case3의 세 가지 시험 조건에 대한 캐비테이션 형상의 비교 결과는 Fig. 12와 Fig. 13에 나타나 있다. Fig. 12의 좌측 그림은 캐비테이션 터널 내부에서 관찰된 캐비테이션 사진이며, 우측 그림은 본 계산결과를 나타낸 것이다. 모형시험에서 대상 프로펠러의 날개에서 발생하는 캐비테이션 현상을 보다 명확히 기록하기 위해 관찰된 캐비테이션 형상을 스케치한 결과는 Fig. 13의 좌측 그림에 나타내었다. Fig. 13의 우측 그림은 모형시험에서 스케치된 그림과 같은 구도에서 계산결과를 보여주고 있다.

Table 3 Experimental and CFD adjusted inlet velocities for the cavitation tests

| | EXP. | CFD |
|----------|----------|----------|
| Case 3.1 | 6.37 m/s | 6.12 m/s |
| Case 3.2 | 7.93 m/s | 7.75 m/s |
| Case 3.3 | 8.80 m/s | 8.70 m/s |

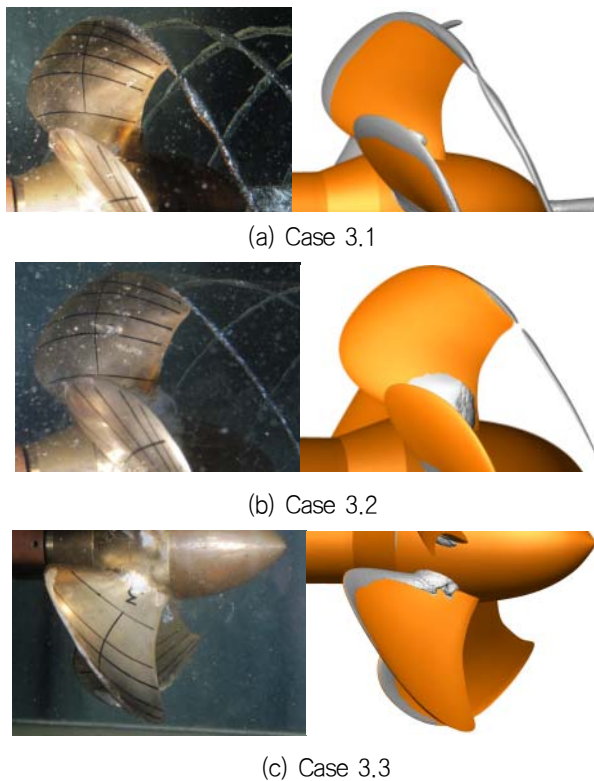


Fig. 12 Comparison of the experimental and numerical cavitation behaviors

Case 3.1의 경우, 날개의 흡입면(suction side)에서 좁은 뿌리 캐비테이션(root cavitation)과 굵은 허브 보오텍스 캐비테이션(hub vortex cavitation)이 관찰된다. 본 수치해석은 이러한 캐비테이션들의 형상과 발생 위치를 비교적 타당하게 예측하고 있으며, 특히 날개 끝 주위 격자세분화를 통해 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 현상을 모형시험과 같이 타당하게 재현하고 있다. 다만, 수치해석 결과에서 모형시험 결과와 다른 양상으로, 반경 $r/R > 0.5$ 의 날개의 전연(leading edge)에서 얇은 층의 캐비테이션(sheet cavitation)이 나타나며 날개 끝 보오텍스 캐비테이션과 이어진다. 이러한 양상은 모형시험 조건과 수치해석 조건이 정확히 일치하지 않는 원인 또는 본 연구에서 사용한 수치모델의 오차로 나타난 결과로 판단된다. Case 3.2의 경우, 흡입면에서 약한 날개 끝 보오텍스 캐비테이션과 큰 뿌리 캐비테이션이 관찰된다.

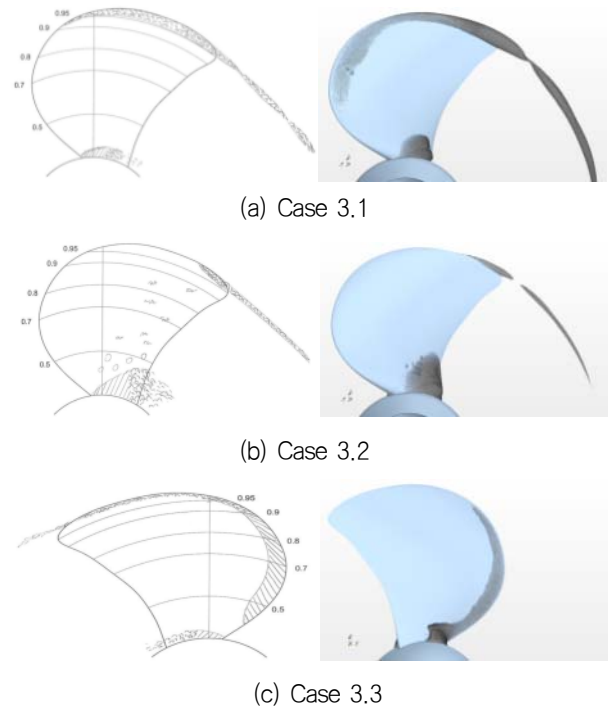


Fig. 13 Comparison of the experimental and numerical cavitation prognoses

Case 3.1에 비해 날개 끝 보오텍스 캐비테이션의 부피가 다소 얇아졌으며 허브 보오텍스 캐비테이션이 관찰되지 않았다. 동일하게 본 수치해석은 뿌리 캐비테이션은 물론, 격자세분화를 통해 다소 약해진 날개 끝 보오텍스 캐비테이션을 Case 3.1의 조건과 같이 잘 예측하는 것을 Fig. 12(b)와 Fig.13(b)의 그림을 통해 볼 수 있다. Case 3.3의 경우, 압력면(pressure side)에서 날개 전연을 따라 좁고 정상적인(steady) 얇은 층 캐비테이션과 뿌리 캐비테이션이 관찰된다. Fig. 13(c)의 실험 스케치를 보면 날개 끝 캐비테이션이 미세하게 관찰되는 것으로 그려져 있지만, Fig. 12(c)의 좌측 사진을 보면 날개 끝 캐비테이션이 잘 관찰되지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 수치해석에서 잡아내기 어려운 매우 작은 부피의 캐비테이션 현상인 것으로 판단된다.

Fig. 14은 Case 3.1 조건에서 캐비테이션이 발생하였을 때 캐비테이션의 형상과 주위 압력분포를 나타내고 있다. 앞서 Case 2의 LDV를 이용한 속도장 측정 결과에서 압력이 낮은 보오텍스 선을 따라 날개 끝 캐비테이션(tip vortex cavitation)이 생성된 것을 볼 수 있다.

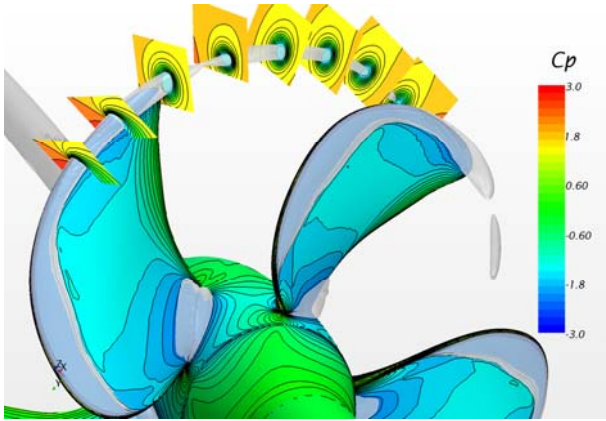


Fig. 14 Pressure on the propeller surface and along the tip vortex with cavitation

Table 4 Comparison of thrust coefficients of cavitating propeller

| | Case 3.1 K_T | Case 3.2 K_T | Case 3.3 K_T |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Exp. (non-cavitating) | 0.3870 | 0.2450 | 0.1670 |
| Exp. (Cavitating) | 0.3725 | 0.2064 | 0.1362 |
| DEU-StarCCM | 0.3851 | 0.2082 | 0.1414 |
| Berg-Procal | 0.3760 | - | - |
| Cradle-SC/Tetra | 0.3750 | 0.1990 | 0.1380 |
| CSSRC-Fluent | 0.3740 | 0.1940 | 0.1320 |
| INSEAN-PFC | 0.3570 | 0.2330 | 0.1610 |
| SSPA-Flunt | 0.3880 | 0.2050 | 0.1440 |
| TUHH-FreSCO+ | 0.3830 | - | 0.1440 |
| UniCenua-Panel | 0.3922 | 0.2369 | 0.1378 |
| UniCenua-StarCCM | 0.3782 | 0.2035 | 0.1306 |
| UniTriest-CFX(FCM) | 0.3740 | 0.2030 | 0.1300 |
| UniTriest-CFX(Kunz) | 0.3750 | 0.2100 | 0.1330 |
| UniTriest-CFX(Zwart) | 0.3730 | 0.1960 | 0.1330 |
| VOITH-Comet | 0.3852 | 0.2101 | 0.1513 |
| VTT-FinFlo | 0.3860 | 0.2020 | 0.1420 |

Table 4는 캐비테이션 조건에서 프로펠러의 추력에 대해 모형

시험 결과와 SMP'11 워크숍에 참가했던 기관들의 수치해석 결과들을 서로 비교하고 있으며, Table 5는 각 수치해석 결과들이 모형시험 결과에 대비되어 나타나는 차이를 비교하고 있다. 각각의 시험조건에 대해 캐비테이션 현상 추정 결과가 다소 차이를 보였던 Case 3.1과 Case 3.3의 경우 본 수치해석 결과(DEU-StarCCM)가 모형시험에서 측정된 추력계수와 다소 차이를 보여주고 있다. 캐비테이션 현상에 대한 예측이 모형시험과 비교적 잘 일치하였던 Case 3.2의 조건에 대해서는 계산된 추력이 모형시험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Table 5 Difference between computed and measured thrust coefficients of cavitating propeller

| | Case 3.1 ΔK_T [%] | Case 3.2 ΔK_T [%] | Case 3.3 ΔK_T [%] |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| DEU-StarCCM | 3.38 | 0.87 | 3.82 |
| Berg-Procal | 0.94 | - | - |
| Cradle-SC/Tetra | 0.67 | -3.59 | 1.32 |
| CSSRC-Fluent | 0.40 | -6.01 | -3.08 |
| INSEAN-PFC | -4.16 | 12.89 | 18.21 |
| SSPA-Flunt | 4.16 | -0.68 | 5.73 |
| TUHH-FreSCO+ | 2.82 | - | 5.73 |
| UniCenua-Panel | 5.29 | 14.78 | 1.17 |
| UniCenua-StarCCM | 1.53 | -1.41 | -4.11 |
| UniTriest-CFX(FCM) | 0.40 | -1.65 | -4.55 |
| UniTriest-CFX(Kunz) | 0.67 | 1.74 | -2.35 |
| UniTriest-CFX(Zwart) | 0.13 | -5.04 | -2.35 |
| VOITH-Comet | 3.41 | 1.79 | 11.09 |
| VTT-FinFlo | 3.62 | -2.13 | 4.26 |

4. 결론

본 논문에서는 RANS법을 이용한 수치해석을 통해 SVA VP1304 프로펠러의 단독성능, 날개 끝 국부유동 특성 및 캐비테이션 성능에 대해 해석하고 이를 SMP'11에서 제공한 모형시험 결과와 검증하고 수치해석의 정도에 대해 논의하였다.

대상 프로펠러의 예인수조 조건의 단독성능 수치해석의 경우, 높은 전진비에서 모형시험과 다소 차이를 보였으나 그 외 전진비에서는 비교적 만족스러운 일치를 보여주었다. 함께, 격자 수 증가에 따른 해의 수렴성도 타당한 결과를 보여주었다. 여기서, 프로펠러 단독성능 해석 관점에서 본 논문에서 사용한 가장 성긴 격자의 결과도 비교적 타당하였다. 캐비테이션터널 조건의 단독성능시험에 대한 해석결과의 경우 계산한 모든 전진비에서 모형시험과 만족스러운 일치를 보여주었다.

프로펠러 날개 끝 속도장 비교에서는 축방향, 반경방향, 원주

방향 속도 성분이 LDV 계측 결과와 비교해서 전체적으로 만족스러운 일치를 보여주었다. 난류모델간 결과 비교에서는 원주방향 속도성분을 제외하고는 축방향과 반경반향의 유속차는 크지 않았다. 충분히 많은 격자를 사용하였을 때 Realizable $k-\epsilon$ 모델과 SST $k-\omega$ 모델이 RSM 모델과 비교하여 만족스러운 정확도를 보여주었다. 날개 끝 보오텍스 유동에 대한 해석정도를 높이기 위해 적용한 격자세분화를 통해 다소 개선된 속도장 및 낮은 압력장의 거동을 타당하게 해상할 수 있었다.

캐비테이션 성능 계산에서는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션을 비교적 타당하게 해석하기 위해 날개 끝 표면과 날개 끝 보오텍스를 따르는 격자세분화를 수행하여 모형시험과 좋은 일치를 보여주었다. 캐비테이션 현상 추정에서 다소 차이를 보인 경우 계산된 추력은 모형시험과 다소 차이를 보였지만, 캐비테이션 현상이 모형시험과 타당한 일치를 보인 경우 만족스러운 일치를 보여주었다. 전체적으로 수치해석 결과에서 나타나는 모형시험 결과와의 차이는 사용된 수치모델 오차 또는 수치해석에서 고려되지 않은 실제 모형시험의 조건이 그 원인으로 판단된다.

향후, 다양한 프로펠러에 대한 RANS 기법의 검증과 함께 DES(Detached Eddy Simulation) 및 LES(Large Eddy Simulation) 기법을 활용한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 민군기술협력사업('선박용 CPP 캐비테이션 초생선속 최적 설계기술 개발', NS2780)으로 수행된 결과의 일부이며, 지원해 주신 산업통상자원부, 방위사업청 및 유관기관에 감사드립니다.

References

- Abdel-Maksoud, M. (editor), 2011. Proceedings of smp'11 workshop on cavitation and propeller performance. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg, Germany, 17-18 June 2011, pp.322.
- CD-adapco, 2015. *STAR-CCM+ v.10.04 user's manual*.
- Fujiyama, K. Kim, C.H. & Hitomi, D., 2011. Performance and cavitation evaluation of marine propeller using numerical simulations. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg, Germany, 17-18 June 2011, pp.322.
- Gaggero, S. Villa, D. & Brizzolara, S., 2011. SMP workshop on cavitation and propeller performances: The experience of the university of Genova on the potsdam propeller test case. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 17-18 June 2011, pp.322.
- Joung, T.H. Jeong, S.J. & Lee, S.K., 2014. CFD simulations and experimental tests for three different ducted propellers. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(3), pp.199-208.
- Kim, G.D. & Lee, C.S., 2005. Application of high order panel method for improvement of prediction of marine propeller performance. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.113-123.
- Kim, M.G. Ahn, H.T. Lee, J.T. & Lee, H.G., 2014. Fully unstructured mesh based computation of viscous flow around marine propellers. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(2), pp.162-170.
- Lardeau, S. & Manceau, R., 2014. Computations of complex flow configurations using a modified elliptic-blending reynolds-stress model. *Symposium on the 10th Engineering Turbulence Modelling and Measurement Conference*, Marbella, Spain, 17-19 September 2014.
- Lee, K.U. Jin, D.H. & Lee, S.W., 2015. Propulsive performance prediction of a ducted propeller in open water condition using CFD. *Journal of Computational Fluids Engineering*, 20(2), pp.1-6.
- Li, D.-Q. 2011. Prediction of non-cavitating and cavitating performance of a SVA porsdam propeller. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 17-18 June 2011, pp.322.
- Menter, F.R., 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), pp.1598-1605.
- Moon, I.S. Kim, Y.G. & Lee, C.S., 1996. Prediction of unsteady performance of a propeller by using potential-based panel method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 33(1), pp.9-18.
- Muscari, R. & Di Mascio, A., 2011. Numerical simulation of the flow past a rotating propeller behind a hull. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 17-18 June 2011, pp.322.
- Patankar, S.V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Salvatore, F. Greco, L. & Calcagni, D., 2011. Computational analysis of marine propeller performance and cavitation by using an inviscid-flow BEM model. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 17 - 18 June 2011, pp.322.

Sauer, J., 2000. *Instationär kavitierende strömungen—Ein neues modell, basierend auf front capturing (VoF) und Blasendynamik*. PhD thesis. Universität Karlsruhe.

Tuomas, S. Timo, S. & Ilkka, S., 2011. FINFLO RANS- predictions for propeller performance. *The Second International Symposium on Marine Propulsors*, Hamburg, Germany, 17–18 June 2011, pp.322.

