

전진비가 추진기 후류에 미치는 영향

백동근¹·윤현식^{2,†}·정재환¹·김기섭³·백부근³
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 조선해양플랜트글로벌핵심연구센터²
한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 해양운송연구부³

Effect of the Advance Ratio on the Evolution of Propeller Wake

Dong Geun Baek¹·Hyun Sik Yoon^{2,†}·Jae Hwan Jung¹·Ki-Sup Kim³·Bu-Geun Paik³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Global Core Research Center for Ships and Offshore Plants, Pusan National University²
Marine Transportation Research Division, KIOST/ MOERI³

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 present study numerically investigated the effect of the advance ratio on the wake characteristics of the marine propeller in the propeller open water test. Therefore, a wide range of the advance ratio(0.2(J),0.8) and the region ranging from the trailing edge to one propeller diameter downstream location are considered to analyze the effect of advance ratio on the evolution of wake in terms of the tip vortices, slip stream and pressure. In order to simulate the incompressible viscous turbulent flow around the propeller, the Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations with the turbulence closure model of $\kappa-\omega SST$ Model are considered. The three-dimensional vortical structures of tip vortices are visualized by the swirl strength, resulting in fast decay of the tip vortices with increasing the advance ratio. Furthermore, to better understanding of the wake evolution, the contraction ratio of the slip stream for different advance ratios is extracted from the velocity fields. Consequently, the slip stream contraction ratio decreases with increasing the advance ratio and successively the difference of the slip stream contraction ratio between J=0.2 and J=0.8 is about 0.1R.

Keywords : Advance ratio(전진비), Tip vortex(날개 끝 보텍스), Three-dimensional vortical structures(3차원 와동구조), Propeller(프로펠러)

1. 서론

'선박제조연비지수(EEDI, energy efficiency design index)' 채택의 의무화는 그동안 지속적으로 연구되어져 왔던 친환경 고효율 추진기의 개발을 더욱 가속화 시키고 있다. 이러한 추진기 개발과 관련된 연구는 아래와 같이 크게 세 분야로 분류될 수 있다.

첫 번째, 프로펠러 단독 연구 (Lee, et al., 2004; Di Felice, et al., 2004; Felli, et al., 2006; Paik, et al., 2007; Felli, et al., 2011a), 두 번째로는 방향타 단독 연구 (Paik, et al., 2008a; Paik, et al., 2008b; Paik, et al., 2010; Wu & Liu 2011; Paik, et al., 2012)와 마지막으로 프로펠러와 방향타의 연계 연구(Van, et al., 2006; Felli, et al., 2011b)가 있다.

위에서 언급한 추진기에 관련된 다양한 연구들 중에서, 본 연구와 밀접한 관련이 있다고 판단되는 프로펠러 단독 연구들은 다음과 같다. 먼저, 실험적 연구로서, Di Felice, et al. (2004)는 2차원 particle image velocimetry (PIV)를 사용하여 하중조건이 추진기 후류에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위

해, 서로 다른 세 가지 전진비(0.748, 0.88, 1.012)를 고려하였으며, 각 전진비에 대해 프로펠러 후류를 분석하였다. 이의 결과로서, 낮은 전진비에서 슬립스트림(slip stream)의 수축이 크게 나타나는 것을 보였으며, 또한, 전진비가 팁 및 허브 보텍스들의 거동에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

Lee, et al. (2004)는 3차원 stereoscopic PIV(SPIV)를 사용하여 추진기 후류의 특성을 연구하였다. 따라서, 선행연구인 Di Felice, et al. (2004)의 2차원 PIV를 활용한 실험에서는 계측되어 질 수 없었던 프로펠러 회전방향 속도성분인 out-of-plane 속도를 포함한 추진기 후류의 3차원 유동장 특성을 보다 구체적으로 분석하였다. 이들도 Di Felice, et al. (2004)과 마찬가지로 하중조건이 추진기 후류에 미치는 영향에 분석하기 위하여 세가지 서로 다른 하중조건들(J=0.59, 0.72, 0.88)을 고려하였다. 이들은 하중조건이 증가할수록, 팁 보텍스의 강도와 스큐(skew)는 증가하며, 또한 out-of-plane 속도는 슬립스트림 내부에서 자유동속도 대비 8~13%정도 크기를 가지고 증가하는 것을 보였다.

Felli, et al. (2006)는 PIV와 slotting을 연동하여 프로펠러 후류의 속도장뿐만 아니라 이전 논문들에서 연구되어지지 않았던

속도장과 압력의 연관성에 관한 연구를 수행하였다. 팁 보텍스가 압력장 변화에 가장 지배적인 요소임을 제시하였다. 이러한 팁 보텍스가 유기하는 압력은 축(shaft)의 진동에 결과적으로 큰 영향을 미침을 확인하였다. 또한, 이 팁 보텍스는 먼 후류(far wake)에서 와의 분해(vortex breakdown) 과정동안 허브 보텍스의 변형을 강하게 유발함을 보였다.

위에서 언급한 PIV기반 실험적 연구들이 프로펠러 후류의 속도장 및 압력에 대해 연구를 주로 수행한 반면에, Paik, et al. (2007)은 PIV를 이용하여 프로펠러 팁 보텍스의 거동에 초점을 맞추었다. 이를 위해 보텍스 탐지법과 Galilean 분해법을 활용하여 보텍스의 가시화를 수행하였다. 두가지 방법 모두 팁 보텍스의 존재를 잘 증명하였으며, 보텍스 탐지법을 통해 도출한 팁 보텍스의 중심은 팁 보텍스의 궤적에 관한 자세한 정보를 제공하였다. 이러한 궤적을 통해, 보텍스가 일정 후류까지는 축을 향해 다가다가, 이후, 더 이상 수축(contraction)되지 않고, 반경방향으로 진동하며 하류로 나아가는 것을 확인하였다.

Felli, et al. (2011a)은 LDV를 통하여 프로펠러 날개 수가 프로펠러 팁 보텍스에 미치는 영향을 연구하였다. 실험을 통해, 날개가 두 개인 프로펠러의 경우, 날개 끝에서 발생한 두 개의 보텍스가 하류로 나아가며 한 쌍의 보텍스로 합쳐지는 것을 확인하였다. 세 개인 경우는 한 쌍의 보텍스와 단일 보텍스로, 그리고 네 개인 경우는 두 쌍의 보텍스가 하류로 나감을 보였다. 더 먼 영역(far wake)에서는 날개 수에 관계없이, 모든 팁 보텍스가 하나로 합쳐져 하류로 나아가는 것을 확인하였다. 팁 보텍스와 허브 보텍스는 프로펠러 후류의 불안정성에 지배적인 역할을 한다. 특히, 이중 팁 보텍스가, 전진비나 날개 수에 관계없이, 먼저 프로펠러 후류의 불안정성을 야기함을 발표하였다.

컴퓨터 기술이 발달함에 따라, CFD를 이용한 추진기 연구가 급격히 증가하고 있다. 하지만 현재까지 대부분 CFD를 이용한 프로펠러 단독 연구는, 유동의 특성보다는 프로펠러 해석에 도입된 수치해석 기법의 검증이나, 격자 및 난류모델의 의존성에 대한 연구(Morgut & Nobile, 2012; Peng, et al., 2013; Jang & Mahesh, 2013)가 주를 이루고 있다.

최근, Park, et al. (2011)은 CFD기반 추진기 후류 유동 특성에 관한 연구의 일환으로 전진비에 따른 프로펠러 후류의 총와도 수식모델링에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해, 폭 넓은 전진비(0.1~1)를 고려하였으며, 전진비가 클수록 총와도의 크기는 급격하게 감소하여 일정한 값으로 수렴함을 확인하였다. 이러한 전진비에 따른 프로펠러 후류에서의 총와도의 특성을 수치적으로 모델링하였다.

위에서 언급한 다양한 실험기반 연구들은 제한된 전진비에서 프로펠러의 후류가 포함하고 있는 다양한 유체역학적 특성들 중 주로 한가지 특성(와구조의 가시화, 압력, 팁 보텍스의 궤적 등)에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 또한, 추진기 후류유동특성을 자세히 분석한 CFD기반 선행연구도 매우 드문 실정이다.

따라서, 본 연구는 폭 넓은 전진비(0.2~0.8)를 고려하여 전진비가 추진기 후류에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 선행연구에서 개별적으로 분석되어졌던 압력, 속도, 와도 등을 동시에 상

세히 분석함으로써 추진기 후류의 유체역학적 특성을 보다 포괄적으로 제시하고자 하였다.

2. 대상모형 형상 및 제원

전진비가 추진기 후류에 미치는 영향을 연구하기 위해 본 연구에서 고려한 프로펠러는 한국해양과학기술원(KIOST)에서 설계한 3,600TEU컨테이너선(KRISO container ship, KCS)의 전용 프로펠러인 KP505이며, 그 제원은 Table1과 같다. 본 수치해석을 위해 도입된 좌표계는 Fig. 1과 같으며, 유속방향을 X축, 유속과 수직인 Y축과 Z축을 반경방향으로 선정하였다.

Table 1 Principal particulars of KP505

Scale Ratio	31.6
Diameter(m)	0.250
Pitch/Diameter mean	0.950
A_e/A_0	0.800
Hub ratio	0.180
No. of Blades	5
Section	NACA66

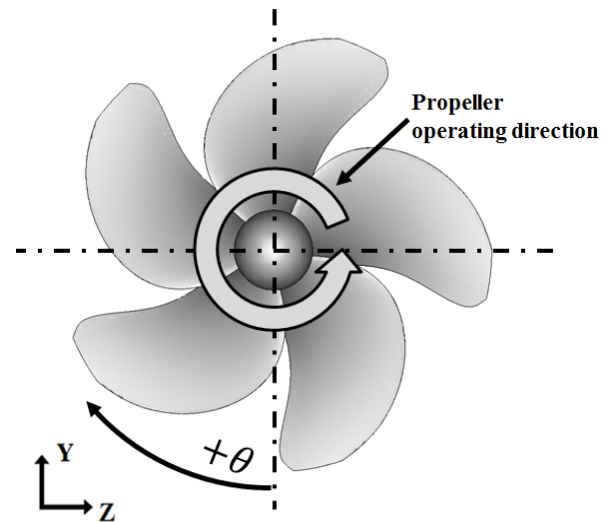


Fig. 1 Coordinate system of KP505

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 범용 프로그램인 STAR CCM+를 사용하여 프로펠러 단독 시험 시험을 수치적으로 수행하였다. 비정상 비압축성 난류유동을 지배하는 방정식들로 아래의 연속방정식과 RANS (reynolds averaged navier-stokes) 방정식들이 고려되어졌으며, 아래의 식 (1)과 (2)에 각각 기술하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \tag{2}$$

여기서 u_i , x_i , p , t , ρ 와 μ 는 각각 속도, 좌표, 압력, 시간, 밀도와 유체의 점성계수를 의미한다. 난류모델로는 $\kappa - \omega SST$ 모델을 사용하였으며, 대류항(convection term)과 확산항(diffusion term)은 2차 상류차분법과 2차 중심차분법을 각각 적용하여 이산화하였다.

본 연구에서 고려한 계산영역과 경계조건을 Fig. 2에 도시하였다. 추진기 후류 유동을 모사하기 위하여 고려된 격자수는 약 250만개이며, 격자생성의 효율을 높이기 위해 도입한 다중블록(multi block)격자계를 사용하여 생성한 계산 전체영역에서 격자계 및 프로펠러 표면격자계를 Fig. 3에 나타내었다.

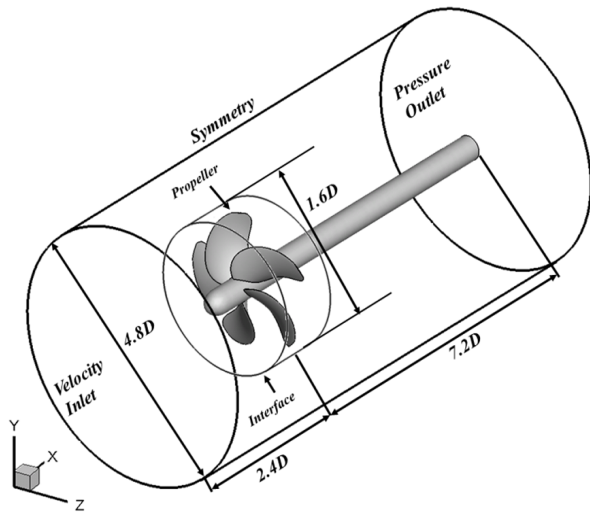


Fig. 2 A schematic of the system

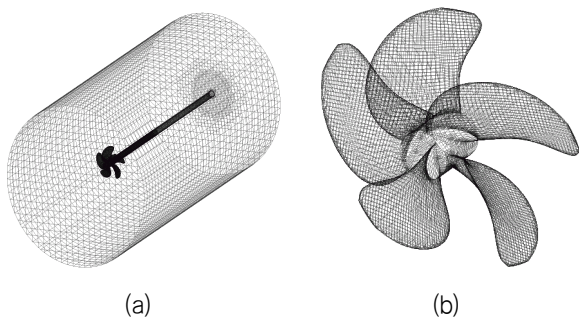


Fig. 3 Grid distribution; (a) total domain (b) surface grid.

4. 프로펠러 단독 시험 검증

도입된 수치해석 기법의 검증을 위하여, 프로펠러 회전수는 12rps로 고정하였고, 입구유속을 변화시켜 전진비 0.1~1.0 구간에서 0.1간격으로 총 10가지 경우를 고려하여 계산을 수행하였다.

추력계수(K_T)와 토크계수(K_Q)는 프로펠러 후류가 완전히 발달한 이후의 값들을 평균하여 구하였고, 실험결과(Fujisawa et al. 2000)와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 실험결과와 비교하여, 전진비 1.0을 제외한 모든구간에서 추력계수와 토크계수는 3~5%의 차이를 보이며, 전반적으로 실험결과와 잘 일치한다.

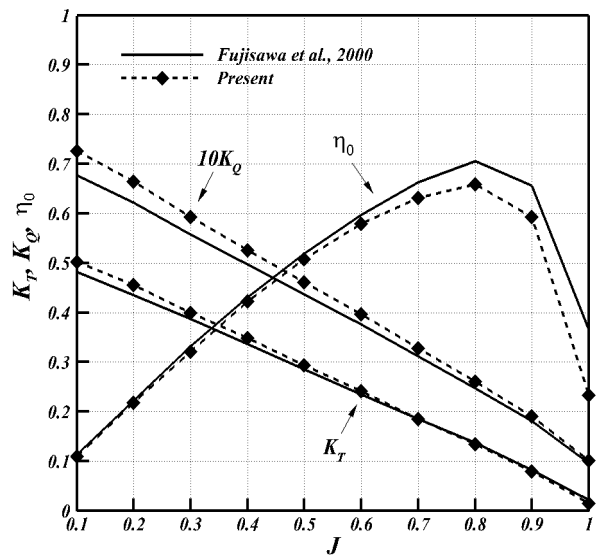


Fig. 4 Comparison of thrust coefficient, torque coefficient and open water efficiency between EFD and CFD

5. 수치 해석 결과

Fig. 5는 위상각 $\theta = 0^\circ$ 에서 프로펠러 평면과 수직인 평면에서의 속도장을 보여준다. 프로펠러 평면은 $z/D=0$ 을 따라 정렬되며 프로펠러축과 날개끝은 y/D 가 0과 -0.5 에 각각 위치하고 있다.

프로펠러 후방에서 속도구배를 가지는 반류면은 슬립스트림 영역 안에 전진비에 관계없이 형성되어 임의의 간격을 가지며 하류로 나아가는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 이는 프로펠러 후면과 날개끝에서 발생한 반류면이 연속적으로 발생했기 때문으로 보인다. 이러한 현상은 Lee, et al. (2004)이 실험으로 밝힌 현상과 유사한 형태를 갖는다.

속도 구배는 전진계수가 작아질수록(하중이 증가될수록) 커지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5에서는 각 영역의 속도 성분을 입구 유속으로 나누어 무차원화 된 속도(U/U_∞)로 나타내었다. 본 연구에서 고려한 가장 높은 하중조건 $J=0.2$ (Fig. 5(a))에서는 가장

높은 무차원 속도 영역의 값이 5.5, 그리고 속도구배에 의한 두꺼운 전단층이 보인다. 반면, 전진비 0.5와 0.7 그리고 0.8에서는 가장 높은 속도 영역의 값은 각각 2, 1.5, 1.25정도를 가지는 것으로 보아, 하중이 감소함에 따라 슬립스트림 영역 내의 상대속도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 결과, 전단층의 존재는 약화되면서 슬립스트림의 경계면이 파형화 되는 것을 확인할 수 있다.

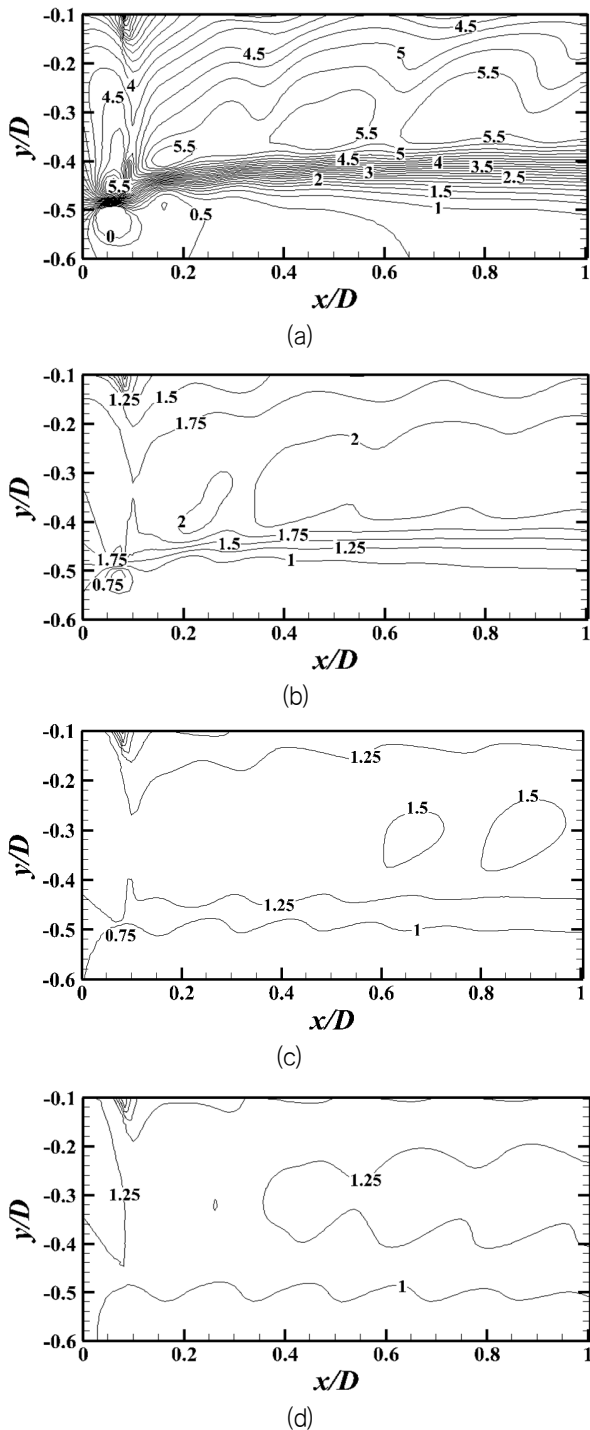


Fig. 5 Contour plots of axial velocity(U/U_{∞}) in the longitudinal plane at $\theta = 0^\circ$; (a) $J=0.2$, (b) $J=0.5$, (c) $J=0.7$, (d) $J=0.8$

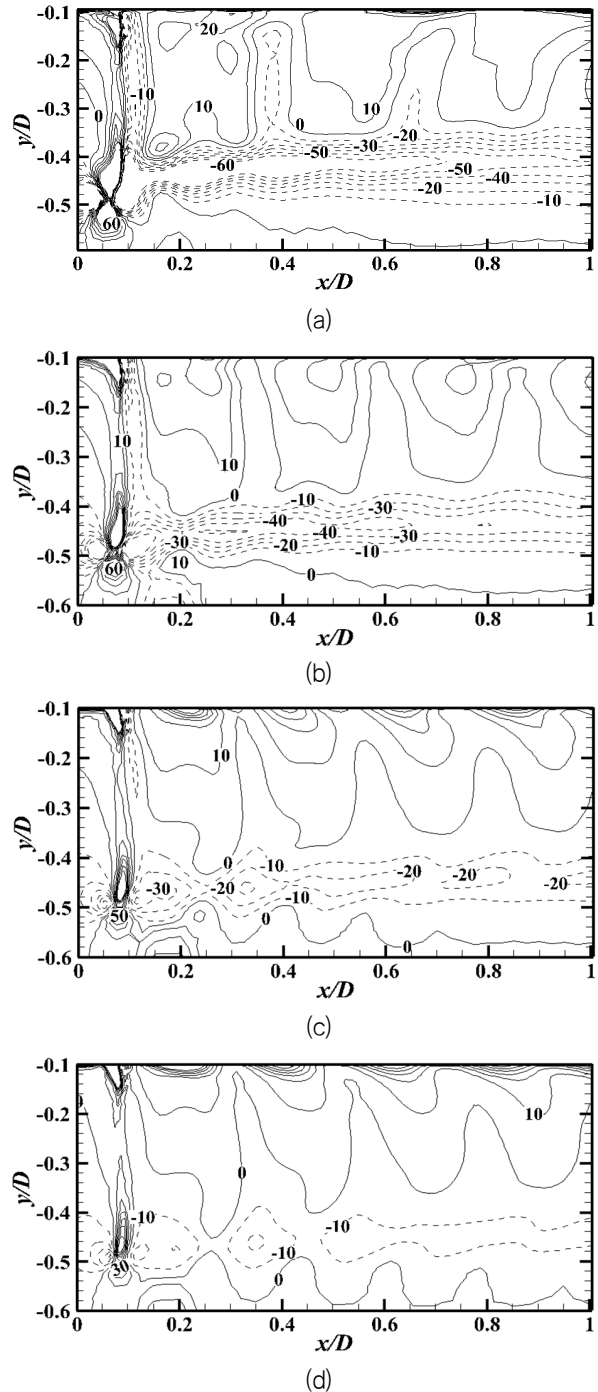


Fig. 6 Contour plots of instantaneous vorticity in the longitudinal plane at $\theta = 0^\circ$; (a) $J=0.2$, (b) $J=0.5$, (c) $J=0.7$, (d) $J=0.8$

Fig. 6은 위상각 $\theta = 0^\circ$ 에서 전진비 변화에 따른 와도장을 보여준다. 하중이 감소함에 따라 슬립스트림 경계면에서의 와도의 절대값이 감소하는 것을 확인할 수 있으며 날개 끝에서 발생한 와가 높은 하중조건에서 후류 형태에 더욱 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한 압력 면과 흡입 면을 따라 발달된 와는 부호가 반대인 경계층으로 이루어져 있고, 크고 작은 값을 갖는 와들이 서로 상호작용을 하며 하류로 나아가는 것을 확인할 수 있다.

이러한 와의 상호작용은 이전 날개에서 발생한 팁 보텍스의 영향을 받아 후류에 나타나는 것으로 보인다. 이러한 영향으로 슬립스트림은 프로펠러축을 향해 수축/팽창이 반복되고, 하류로 나아감에 따라 슬립스트림의 수축/팽창은 점차 사라지는 것을 확인할 수 있다.

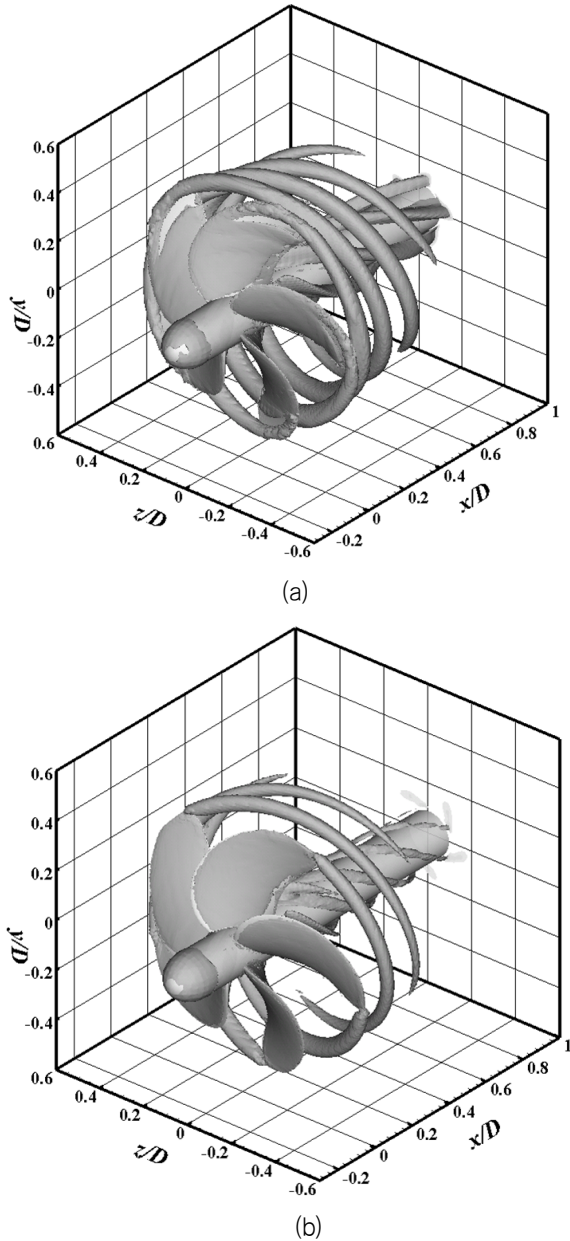


Fig. 7 Iso-surfaces of swirl strength for two different loading conditions((a) $J=0.2$, (b) $J=0.7$)

팁 보텍스의 궤적에 대한 정보는 프로펠러 설계에 있어서 매우 유용한 정보이다. 하지만 프로펠러 후류에 대한 와도장을 이용하여 보텍스의 중심을 찾아내는 작업은 소용돌이 운동이 없는 와도 지역을 포함하기에 적합한 방법이 아니다. 따라서, 본 연구에서는 후류 내에 존재하는 보텍스들의 정확한 위치를 탐지하기 위해 Zhou, et al. (1996)이 제안한 vortex identification method를 이

용하였다. 이는 허수 고유치로부터 얻은 보텍스의 소용돌이 강도에 근거한 탐지 법으로, 소용돌이 운동이 전혀 없는 높은 와도 지역을 배제시켜 보텍스의 중심을 탐지하는 방법이다. Fig. 7은 두 전진비에서의 와 구조를 보여주는데 전진비가 낮을수록 크고 선명한 와가 생성되어 후류로 나아가는 것을 확인할 수 있으며, 높은 전진비에서는 이와 같은 현상이 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 두 전진비에서의 압력장을 보여준다. 높은 하중 조건에서는 압력 면과 흡입 면을 따라 발생한 양/음의 압력이 서로 상호 작용을 하며 하류로 나아감과 동시에 축 부근에서는 높은 음 압력이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하중 조건이 감소함에 따라 압력구배가 줄어들며 설계 전진비와 근접한 $J=0.7$ 에서는 높은 하중조건인 $J=0.2$ 와 비교하여 상대적으로 낮은 크기의 압력장이 나타난다.

높은 하중조건에서 발생한 뚜렷한 압력구배는 하류로 나아가며 점점 약해지고, $x/D=0.8$ 을 지나면서 날개끝에서 발생한 압력구배는 거의 사라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 7에서 나타낸 와구조와 흡사한 경향을 갖는다. 또한 프로펠러 후연에서 발생한 양의 압력은 하류로 나아가며 그 성질이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 압력 구배는 프로펠러 근처($x/D=0.2$)의 값을 나타낸 Fig. 9에서 명확히 확인할 수 있다. 또한, 프로펠러 근방에서 발생한 양의 압력은 하중 증가에 따라 슬립스트림 내 ($-0.4 < x/D < -0.15$)에서 그 값이 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 하중감소에 따라 줄어들며, $J=0.5$ 이상의 전진비에서 현저히 줄어들어 전진비($J=0.7$) 이상에서는 압력 분포가 상대적으로 미미한 것이 확인된다.

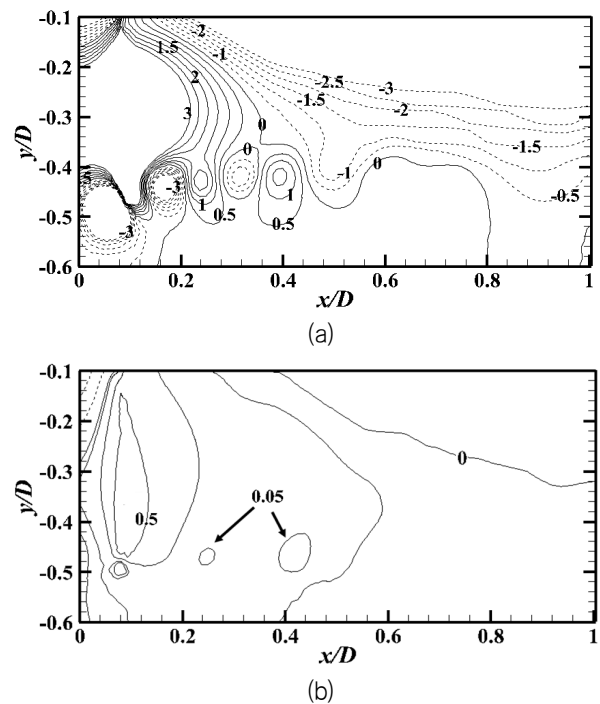


Fig. 8 Contour of pressure coefficient in the longitudinal plane at $\theta = 0^\circ$ (a) $J=0.2$, (b) $J=0.7$

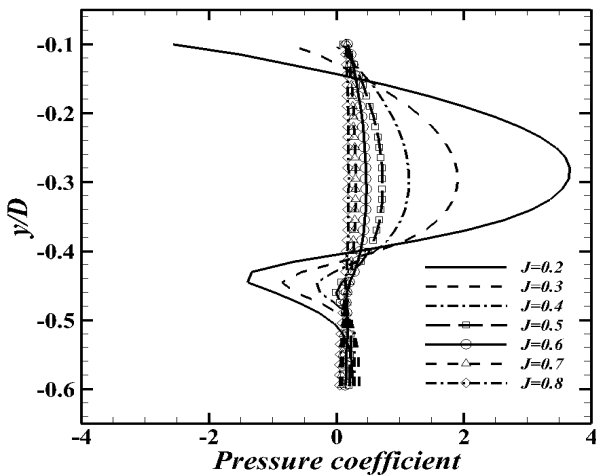
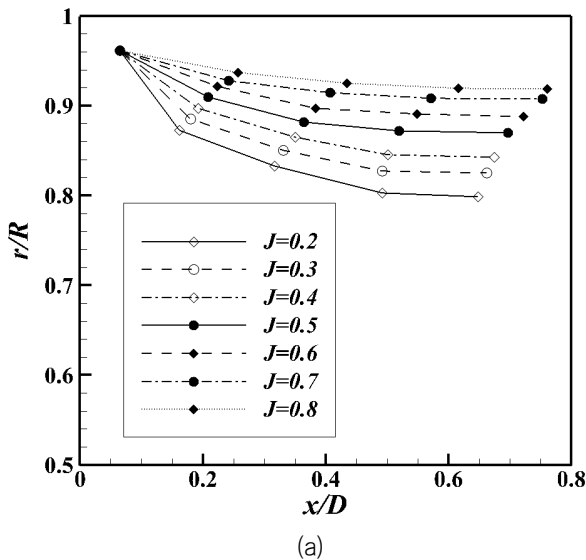
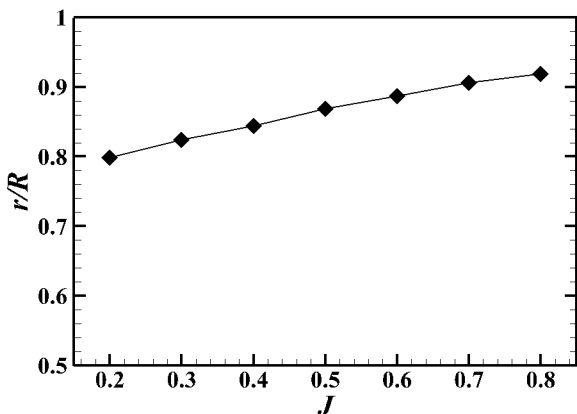


Fig. 9 Variation of pressure profile at several advance ratio at $x/D=0.2$



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Locations of tip vortices on the X-Y plane and (b) contraction rate for different advance ratios of $J=0.2\sim 0.8$

Fig. 10(a)는 모든 전진비에 대해 이전 날개에서 발생한 팁

보텍스의 중심점들을 연결하여 얻은 위치이다. 높은 하중조건에서는 슬립스트림의 강한 수축으로 인해 이전 날개에서 발생한 팁 보텍스의 수축량이 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 10(b)를 통하여 좀 더 명확하게 확인할 수 있다. 대표적으로 높은 하중조건 $J=0.2$ 와 낮은 하중조건인 $J=0.8$ 에서는 r/R 이 약 0.8과 0.92에 해당하는 값으로 수축되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 앞서 분석한 속도와 압력을 포함한 여러 현상들의 상호작용에 의한 것으로 보인다.

6. 결론

본 연구는 CFD를 활용하여 전진비가 추진기 후류에 미치는 영향을 분석하였다. 도입된 수치해석기법들은 선행연구와 비교 및 검증을 통해 신뢰성을 확보하였다. 폭 넓은 전진비(0.2~0.8)를 고려하여, 전진비에 따른 후류의 특성들로서, 팁 보텍스의 거동, 슬립스트림 영역의 변형, 압력장과 팁 보텍스의 연계성 등을 자세히 분석하였다.

프로펠러 후연과 날개끝에서 연속적으로 발생하는 반류면은 전진비에 관계없이 형성되어지며 임의의 간격을 가지고 하류로 나아가는 선행 실험연구의 결과를 본 수치해석연구에서도 검증하였다. 전진비가 증가함에 따라 슬립스트림 영역 내의 상대속도가 감소함으로, 전단층이 약해지고 파형의 슬립스트림의 경계면이 형성됨을 확인하였다. 팁 보텍스와 압력은 낮은 전진비에서 보다 밀접한 상관관계를 보였다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업원천과제인 “친환경 추진기 캐비테이션 제어기술 개발(10033689, 저진동고효율 추진기 및 방향타 개발 기술)의 일환이며 지원에 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

References

- Di Felice, F. Di Florio, D. Felli, M. & Romano, G. P., 2004. Experimental Investigation of the Propeller Wake at Different Loading Conditions by Particle Image Velocimetry. *Journal of Ship Research*, 48(2), pp.168-190.
- Felli, M. Di Felice, F. Guj, G. Roberto, C., 2006. Analysis of the Propeller Wake Evolution by Pressure and Velocity Phase Measurements. *Experiments in Fluids*, 41, pp.441-451.
- Felli, M. Camussi, R. & Di Felice, F., 2011a. Mechanisms of Evolution of the Propeller Wake in

- the Transition and far Fields. *Journal of Fluid Mechanics*, 682, pp.5–53.
- Felli, M. Falchi, M. & Pereira, F., 2011b. Investigation of the flow field around a propeller–rudder configuration: on–surface pressure measurements and velocity–pressure–phase–locked correlations. *Second International Symposium on Marine Propulsors*, Italy, June 2011, pp.169–177.
- Fujisawa, J. Ukon, Y. Kume, K. & Takeshi, H., 2000. *Local Velocity Field Measurements around the KCS Model (SRI M.S.No.631) in the SRI 400m Towing Tank*. Ship Performance Division Report No. 00–003–02, Tokyo: Ship Research Institute.
- Jang, H. & Mahesh, K. 2013. Large Eddy Simulation of flow around a Reverse Rotating Propeller. *Journal of Fluid Mechanics*, 729, pp.151–179.
- Lee, S.J. Paik, B.G. Yoon, J.H. & Lee, C.M., 2004. Three–Component Velocity Field Measurements of Propeller Wake using a Stereoscopic PIV Technique. *Experiments in Fluids*, 36, pp.575–585.
- Morgut, M. & Nobile, E., 2012. Influence of Grid Type and Turbulence Model on the Numerical Prediction of the Flow around Marine Propellers Working in Uniform Inflow. *Ocean Engineering*, 42, pp.26–34.
- Paik, B.G. Kim, J. Park, Y.H. Kim, K.S. & Yu, K.K., 2007. Analysis of Wake behind a Rotating Propeller using PIV Technique in a Cavitation Tunnel. *Ocean Engineering*, 34, pp.594–604.
- Paik, B.G. Kim, K.Y. Ahn, J.W. Kim, Y.S. Kim, S.P. Park, J.J., 2008a. Experimental Study on the Gap Entrance Profile Affecting Rudder Gap Cavitation. *Ocean Engineering*, 35, pp. 139–149.
- Paik, B.G. Kim, K.Y. Ahn, J.W. Park, S.H. Heo, J.K. & Yu, B.S., 2008b. Influence on the Rudder Gap Cavitation by the Scaling of its Clearance. *Ocean Engineering*, 35, pp.1707–1715.
- Paik, B.G. Kim, K.Y. Kim, K.S. Park, S.H. Heo, J.K. Yu, B.S., 2010. Influence of Propeller Wake Sheet on Rudder Gap Flow and Gap Cavitation. *Ocean Engineering*, 37, pp. 1418–1427.
- Paik, B.G. Kim, G.D. Kim, K.S. Kim, K.Y. & Seo, S.B., 2012. Measurements of the Rudder Inflow Affecting the Rudder Cavitation. *Ocean Engineering*, 48, pp.1–9.
- Park, H.S. Yoon, H.S. Kim, M.C. & Chun, H.H., 2011. Study on the Resultant Vorticity Numerical Model of the Propeller Wake. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.141–146.
- Peng, H.H. Qiu, W. & Ni, S., 2013. Effect of Turbulence Models on RANS Computation of Propeller Vortex Flow. *Ocean Engineering*, 72, pp.304–317.
- Van, S.H. Kim, W.J. Yoon, H.S. Lee, Y.Y. & Park, I. R., 2006. Flow Measurement around a Model Ship with Propeller and Rudder. *Experiments in Fluids*, 40, pp.533–545.
- Wu, S. & Liu, H., 2011. Numerical Study of a Flap Rudder Based on Turbulence Model LES. *Applied Mechanics and Materials*, 88–89, pp.240–243.
- Zhou, J. Adrian, R.J. & Balachandar, S., 1996. Auto Generation of Near–Wall Vortical Structures in Channel Flow. *Physics of Fluids*, 8, pp.288–290.



백동근

윤현식

정재환

김기섭



백부근