프로펠러 후류의 총와도 수식모델 연구

박희승¹·윤현식^{2,†}·김문찬¹·전호환¹
부산대학교 조선해양공학과¹
부산대학교 첨단조선공학연구센터²

Study on the Resultant Vorticity Numerical Model of the Propeller Wake

Hui-Seung Park¹·Hyun-Sik Yoon^{2,†}·Moon-Chan Kim¹·Ho-Hwan Chun¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University¹
Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University²

Abstract

This study numerically carried out the propeller open water test(POW) by solving Navier–Stokes equations governing the three-dimensional unsteady incompressible viscous flow with the turbulence closure model of the $\kappa-\omega$ SST model. Numerical simulations are performed at various range of advance ratios. Corresponding to Reynolds numbers of $5.89 \times 10^5 \sim 6.47 \times 10^5$ based on free stream velocity and the chord length at 0.7 propeller radius. The present results give a good agreement with those of the experiment. The propeller induced vortical structures have been analyzed by visualizing the resultant vorticity. As the advance ratio increases, the magnitude and length of the resultant vorticity decrease significantly. As the main focus of present study, the numerical model to present the $(r-\theta)$ plane-averaged resultant vorticity along the streamwise direction for various advance ratios has been suggested.

Keywords : Propeller wake(프로펠러 후류), Resultant vorticity(총와도), Numerical model(수식모델)

1. 서론

일반적으로 선미부에 설치되는 선박의 프로펠러는 선체에 의해서 발생된 불규칙적인 반류 분포로 인하여 자항시험에서 정확한 특성을 파악하기 어려우므로, 균일한 유동장 조건에서 프로펠러 단독으로 성능 시험이 수행된다. 이와 같이 균일 유동장에서 모형 프로펠러의 추력과 토크를 측정하여 프로펠러의 단독효율 성능을 결정하는 시험을 프로펠러 단독 시험(Propeller Open Water test)이라고 한다.

프로펠러 단독성능을 파악하기 위한 방법은 많은 시간과 비용이 소요되는 모형시험을 통하여 결정할 수 있으나, 사전에 프로펠러 단독성능에 대한 수치해석을 통한 성능분석이 수행되어 왔으며, 포텐셜을 기저로 한 패널 방법(Hsin., 1990; Kim et al., 1993)이 현재까지도 널리 사용되고 있다. 최근 컴퓨터의 성능과 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)의 비약적인 발전으로 인해 프로펠러의 단독성능에 대한 수치해석이 활발하게 이루어지고 있으며, RANS(Reynolds Averaged Navier–Stokes) 방정식을 이용한 점성유동 해석 방법이 제시된 바 있다. (Kim et al., 2002; Park et al., 2004; Park et al., 2006)

선박용 프로펠러의 후류 모델링이나 날개끝(tip) 와(vortex)의 거동을 해석하기 위하여 PIV(Particle Image Velocity)의

속도장측정 방법을 이용하여 프로펠러 후류에서의 유동 구조를 실험적으로 연구한 바 있다. (Lee et al., 2002; Paik et al., 2007)

본 연구는 비정상상태에서 프로펠러 주위의 공간 격자계를 매 시간 증가치마다 직접 회전시켜 유동을 해석하는 SMM(Sliding Mesh Method)을 적용하여 프로펠러 단독 시험에 대한 계산을 수행하였다. 또한 프로펠러 후류에서 와도의 특성을 파악하기 위해 무차원화된 총와도(resultant vorticity)의 크기 및 구조를 등치면(Iso-surface)으로 가시화 하였으며, 프로펠러 후류에서 $(r-\theta)$ 면 평균된 총와도의 크기를 각각 유속방향 거리(x/D)와 전진비(J)의 함수로 근사화하여 후류에서 총와도의 크기를 파악할 수 있는 함수모델로 제안하였다. 저자들의 선행연구 분석을 근거로 할 때, 선행연구들은 프로펠러가 유기하는 와류를 주로 가시화를 통한 정성적인 분석에 초점을 맞추고 있으나, 이를 모델링하는 연구는 현재까지 진행된 바가 없는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구는 프로펠러가 유기하는 와류를 유체역학적으로 와류의 특성을 나타내는 하나의 정량적인 측도인 총와도를 산정하고 또한, 이를 반경방향으로 평균한 후 얻은 값을 후류방향의 함수로 모델링하는 것을 목적으로 한다. 제안된 프로펠러 후류의 총와도 수식 모델을 활용하면 실험이나 전산해석을 수행하지 않고도 프로펠러 후류영역에서 프로펠러가 유기하는 와류의 강도를 근사적으로 예측할 수가 있다.

2. 대상모형 형상 및 제원

본 연구에 사용된 대상 프로펠러는 MOERI에서 설계한 3,600TEU 컨테이너선 (KRISO container ship, KCS)의 전용 프로펠러인 KP505을 대상으로 제원은 Table 1과 같다. (Fujisawa et al., 2000)

대상 프로펠러에 대하여 수치해석을 수행하기 위해서 좌표계의 정의는 Fig. 1에서 정의된 바와 같이, 유속방향을 X축, 반경방향을 각각 Y축과 Z축으로 선정하였다.

Table 1 Principal particulars of KP505

KP505	Principal
Scale Ratio	31.6
Diameter(m)	0.250
Pitch/Diameter mean	0.950
Ae/A0	0.800
Hub ratio	0.180
No. of Blades	5
Section	NACA66

Fig. 1 Coordinate system of KP505

3. 수치해석방법

3.1 지배방정식 및 수치해석방법

본 연구에서는 프로펠러 단독 시험 수치해석을 수행하기 위하여 유한 체적법에 근거한 범용 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. 본 연구에서는 3차원 비정상상태 비압축성 점성유동을 고려하였다. 이에 대응하는 지배방정식으로는 아래의 연속방정식과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes)방정식들인, 식 (1)과 식 (2)으로 각각 고려되어진다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

여기서, x_i , u_i , p , ρ 와 μ 는 직각좌표계, 속도성분들, 압력, 밀도와 점성을 각각 나타낸다. 또한, 식 (2)의 레이놀즈 응력 (Reynolds Stress) 항인 $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 은 $\kappa-\omega SST$ 모델을 사용하여 해석하였다. 속도 압력 연성은 SIMPLEC 방법을 사용하였으며, 대류항과 확산항에는 2차 상류차분법과 2차 중심차분법을 각각 적용하였다.

3.2 격자생성 및 경계조건

프로펠러 단독 시험을 수치해석하기 위한 격자수는 약 138만 개를 사용하였다. 벽면에 수직한 최소격자 간격은 2.5×10^{-4} 이고, 이는 $y^+ = 3 \sim 37$ 에 해당한다. 생성된 계산영역 및 경계조건은 Fig. 2에 도시하였다. 좌표계에 따라 생성된 격자 형상은 Fig. 3에 도시하였다. 프로펠러의 복잡한 형상의 특성상 단일블록(Single-Block)으로 격자 생성의 어려움이 있어 최전하는 프로펠러 주위의 공간 격자를 원통 형상의 다중블록(Multi-Block)으로 생성하였다.

Fig. 2 A schematic of the system

Fig. 3 Generated grid of (a) overview and (b) propeller around

4. 결 과

4.1 프로펠러 단독시험 결과

프로펠러 단독시험은 회전수(rps)를 12로 고정하고 입구 유속을 변화시켜 계산을 수행하였다. 추력계수, 토크계수 및 단독효율은 실험결과(Fujisawa et al., 2000)와 비교하여 Fig. 4에 도시하였다. 전진비에 따른 추력계수, 토크계수와 실험과 비교한 값들을 Table 2와 Table 3에 각각 도시하였다.

실험결과와 비교하여 추력계수는 전진비 1.0을 제외한 구간에서 약 3~5%의 차이를 보이며, 토크계수는 모든 전진비에서 약 5~6%의 차이를 보였다.

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

Table 2 Comparison of thrust coefficients

K_T			
J	EFD	CFD	$(1-EFD/CFD) \times 100(\%)$
0.1	0.482	0.503	4.17
0.2	0.435	0.456	4.60
0.3	0.387	0.399	4.21
0.4	0.336	0.349	3.72
0.5	0.285	0.294	3.06
0.6	0.235	0.241	2.48
0.7	0.185	0.186	0.53
0.8	0.137	0.135	-1.48
0.9	0.083	0.079	-5.06
1.0	0.022	0.015	-40.9

Table 3 Comparison of torque coefficients

K_Q			
J	EFD	CFD	$(1-EFD/CFD) \times 100(\%)$
0.1	0.677	0.726	6.74
0.2	0.622	0.665	6.46
0.3	0.557	0.593	6.07
0.4	0.497	0.526	5.51
0.5	0.437	0.461	5.20
0.6	0.376	0.397	5.28
0.7	0.311	0.328	5.18
0.8	0.247	0.261	5.36
0.9	0.181	0.191	5.23
1.0	0.096	0.102	5.88

4.2 프로펠러 유동장 해석

본 연구에서 프로펠러 후류에서의 유동장 특성을 해석하기 위하여 대표적으로 총와도(resultant vorticity)를 고려하였다. 총와도의 크기는 아래의 식(3)으로 정의된다. 식(3)에서 정의된 총와도의 크기를 프로펠러 직경(D)과 각 전진비에서의 입구유속(V_a)으로 무차원화하여 등치면(iso-surface)과 등와선(contours of resultant vorticity)으로 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 도시하였다.

$$|\vec{\omega}| = \nabla \times \vec{V} \quad (3)$$

Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, 총와도의 크기 및 유속 방향으로 발달되는 길이는 전진비가 클수록 급격하게 감소한다.

입구유속, 즉 전진비가 매우 작을수록 프로펠러 회전에 의해 유발되어 프로펠러 끝 단(tip)에서 발생한 와류는 입구유속의 간섭이 미비하므로 상대적으로 먼 후류까지 발달한다. 반면에 전진비가 커질수록 회전류에 미치는 입구유속, 즉 유동방향의 대류 속도가 증가하여 프로펠러가 생성하는 회전류에 미치는 간섭이 커짐으로 인해 프로펠러 끝단에서 발생한 와는 일찍 소멸되어진다.

Fig. 6은 프로펠러 면 $x/D=0.2$ 에서의 총와도를 등와선으로 나타내었다. 모든 전진비에서 프로펠러의 끝 단과 허브(hub)에서 총와도의 크기가 크게 나타났다. Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, Fig. 6에서도 전진비가 클수록 프로펠러 끝 단과 허브에서 와도의 크기가 감소하였다.

이차원 단면에서 가장 단순한 점성와류(viscous vortex)는 Lamb-Oseen vortex (Batchelor, 1976)이다. 이 와류(vortex)와 관련되는 비정상 상태의 와도(vorticity)는 이차원 Navier-Stokes 방정식의 근사를 통하여 지수함수 형태의 정해(exact solution)로 구해진다. 지수함수 형태의 이 와의 해는 크기(circulation)와 점성(viscosity)에 의해 정의되어진다.

Fig. 5 Instantaneous Iso-surface of nondimensionalized resultant vorticity magnitude for different advance ratios of (a) $J=0.1$, (b) $J=0.2$, (c) $J=0.3$, (d) $J=0.4$, (e) $J=0.5$, (f) $J=0.6$, (g) $J=0.7$, (h) $J=0.8$, (i) $J=0.9$ and (j) $J=1.0$

Fig. 6 Instantaneous contours of nondimensionalized resultant vorticity magnitude on the $x/D=0.2$ plane for different advance ratios of (a) $J=0.1$, (b) $J=0.2$, (c) $J=0.3$, (d) $J=0.4$, (e) $J=0.5$, (f) $J=0.6$, (g) $J=0.7$, (h) $J=0.8$, (i) $J=0.9$ and (j) $J=1.0$

하지만, 본 연구에서는 위에서 언급한 이차원 단면에서의 와도의 모델링에 앞서, $(r-\theta)$ 면으로 평균된 총와도의 값들을 유속방향 거리 및 전진비의 함수로 모델링 하고자 한다. $(r-\theta)$ 면으로 평균된 총와도를 측정하기 위한 $(r-\theta)$ 면의 반경은 프로펠러 반경이며, 프로펠러 면이 위치한 $x/D=0.0$ 에서부터 $x/D=7.0$ 까지 $x/D=0.2$ 간격으로 측정하여 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이, 전진비에 관계없이 총와도의 크기는 $x/D=0.0$ 에서 가장 크게 나타나며, x/D 가 증가 할수록 급격히 감소한 후 일정한 값으로 수렴하였다. 이러한 $(r-\theta)$ 면으로 평균된 총와도는 모든 전진비에서 일정한 감소율을 보임으로 거듭제곱함수(Power function) 형태인 식 (4)로 근사화를 수행하였다. 따라서 식 (4)에 나타나는 각각의 전진비에 따른 계수 $\alpha(J)$ 와 $\beta(J)$ 를 크기와 점성으로 각각 정의하였다.

(a)

(b)

Fig. 7 Profiles of $(r-\theta)$ plane-averaged nondimensionalized resultant vorticity magnitude along (a) the axial direction for different advance ratios and (b) the advance ratio at different axial directions

식 (4)에서 도출한 $\alpha(J)$ 와 $\beta(J)$ 를 전진비의 함수로서 식 (5)와 식 (6)으로 각각 나타내었다. 식 (5)에 정의된 계수 $a_1=8.742$, $b_1=0.191$ 와 $c_1=1.712$ 이며, 식 (6)에 정의된 계수 $a_2=-0.343$, $b_2=0.438$ 와 $c_2=0.012$ 이다.

$$|\vec{\omega}|_{r-\theta} = \alpha(J) \left(\frac{x}{D} \right)^{-\beta(J)} \quad (4)$$

$$\alpha(J) = \frac{a_1}{b_1} \exp\left(-\frac{J}{b_1}\right) + c_1 \quad (5)$$

$$\beta(J) = \frac{a_2}{b_2} \exp\left(-\frac{J}{b_2}\right) + c_2 \quad (6)$$

Fig. 8은 식 (4)를 사용하여 Fig. 7의 $(r-\theta)$ 면으로 평균된 총와도를 근사시 도출한 α 와 β (Origin) 과 식 (5)와 (6)의 전진비 함수로 표현한 α 와 β 를 도시하였다. 식 (5)와 (6)으로 나타낸 α 와 β 는 전진비가 커질수록 0에 수렴하는 값을 보인다. 이는 식 (4)에서 전진비가 커질수록 총와도의 크기가 감소하는 것을 나타낸다.

(a)

(b)

Fig. 8 Profiles of (a) α and (b) β using the data of Origin and numerical models (Equation (5) for α and Equation (6) for β)

최종적으로, 식 (5)와 (6)으로 근사화된 α 와 β 값을 적용하여 서로 다른 전진비에서 ($r-\theta$)면 평균된 총와도의 크기를 식 (4) 정의된 함수로 근사화 하여 Fig. 9 (a)에 도시하였다. 또한 Fig. 7 (b)의 서로 다른 유속방향 위치에서 ($r-\theta$)면 평균된 총와도의 크기도 식 (4)로 근사화 하여 Fig. 9 (b)에 도시한 바와 같이, Fig. 7을 잘 재현하였다.

Fig. 9 Profiles achieved from the numerical model of ($r-\theta$) plane-averaged nondimensionalized resultant vorticity magnitude along (a) the axial direction for different advance ratios and (b) the advance ratio at different axial directions

5. 결론

본 연구에서는 프로펠러를 직접 회전시키는 Sliding mesh 기법을 적용하여 프로펠러 단독시험에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 추력계수, 토크계수 및 단독효율은 실험과 비교 검증하였다.

프로펠러 후류에서 무차원화된 총와도의 크기 및 구조를 파악하기 위하여 등와선(contours of vorticity)과 등치면(Iso-surface)으로 파악해 보았으며, 서로 다른 전진비에서 ($r-\theta$)면 평균된 총와도의 크기를 유속방향에 따라 살펴보았다. 등치면에서 나타나는 총와도

의 크기 및 유속방향으로 발달되는 길이는 전진비가 클수록 급격하게 감소하였으며, ($r-\theta$)면 평균된 총와도의 크기도 프로펠러 면에서 멀어질수록 급격히 감소하여 일정한 값으로 수렴하였다.

($r-\theta$)면 평균된 총와도의 크기를 유속방향으로의 거리(x/D)와 전진비(J)의 함수로 근사화하여, 프로펠러 후류에서 총와도의 크기를 파악할 수 있는 수치함수 모델로 제시하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Kim, H.D. & Kim, H.T., 2002. Analysis of Open-Water Characteristics of marine Propeller by Computational Method for Viscous Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(3), pp.8-17.
- Park, J.J. Choi, Y.B. & Hwang, Y.S., 2004. A Study on the characteristics of viscous flows around Hull by Propeller effect. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting, SNAK*, pp.583-588.
- Park, J.J. Kim, S.P. Kim, Y.S. & Choi, Y.B., 2006. A Viscous flows around Pre-swirl Stator using Moving grid method. *Proceedings of the Annual Meeting, SNAK*, pp.488-493.
- Hsin, C.Y., 1990. *Development and analysis of panel method for propellers in unsteady flow*. Ph.D. Thesis, MIT, September.
- Kim, H.G. Lee, J.T. Lee, C.S. & Suh, J. C., 1993. Prediction of Steady Performance of a Propeller by Using a Potential-Based Panel Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(1), pp.73-86.
- Fujisawa, J. Ukon, Y. Kume, K. & Takeshi, H., 2000. Local Velocity Field Measurements around the KCS Model in the SRI 400m Towing Tank. *Ship Performance Division Report No 00-003-02*.
- Lee, S.J. Paik, B.G. & Lee, C.M., 2002. Phase-Averaged PTV Measurements of Propeller Wake. *Proceedings of 24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, pp.18-25.
- Paik, B.G. Kim, J. Kim, K.Y. & Kim, K.S., 2007. Study on the three dimensional flow characteristic of the propeller wake using PIV techniques. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(3), pp.219-227.
- Batchelor, G. K., 1967. *An introduction to fluid*. Cambridge university press.
- Fluent 6.3.26 User Guide.