추진기 날개 끝 형상변화에 따른 보오텍스 유동에 대한 수치해석

박선호¹·서정화¹·김동환¹·이신형^{2,†}·김기섭³
서울대학교 대학원 조선해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소²
한국해양연구원³

Numerical Analysis of a Tip Vortex Flow for Propeller Tip Shapes

Sunho Park¹·Jeong Hwa Seo¹·Dong Hwan Kim¹·Shin Hyung Rhee^{2,†}·Ki-Sup Kim³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea²
Korea Ocean Research & Development Institute³

Abstract

In order to control the tip vortex cavitation occurring around the tip of a rotating propeller blade, researches on the propeller cavitation and blade tip vortex flows have been increased. In this paper, the propeller tip vortex flow for a blunt and sharp tips was studied using an unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations solver based on a cell-centered finite volume method. In numerical open water test, torques, thrusts, pressure distributions and vortex flows were compared for various rotating speeds. To consider a hull wake, the nominal wake was specified in inlet boundary condition. Pressure distributions and vortex flows with the hull wake were investigated for various propeller rotating angles. From the results, it was confirmed that the blunt tip propeller delayed the tip vortex flow

Keywords : Propeller blade tip(추진기 날개 끝), Tip vortex flow(날개 끝 보오텍스 유동), Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서론

선박 추진장치인 프로펠러에 부하가 커지면 프로펠러 날개에는 캐비테이션이 발생하며 발생량, 종류 및 특성에 따라 추력, 선체 기진력으로 작용하는 변동압력, 표면침식, 수중방사소음 등에 공학적인 문제점을 주고 있다. 특히 프로펠러 날개 끝 보오텍스 캐비테이션(blade tip vortex cavitation)은 캐비테이션 초기발생속도, 선체표면 변동압력 및 소음 특성에 주요하게 작용한다. 따라서 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 발생을 완화 또는 지연을 통하여 성능 향상에 많은 관심이 증대되고 있다.

프로펠러 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 발생특성은 날개 끝 보오텍스의 강도와 특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 관련 연구로는 주로 날개 끝 보오텍스 생성, 발달, 소멸 및 궤적에 대한 구조 분석적 연구가 많이 진행되고 있다. Calcagno, et al. (2002)는 스테레오 입자영상속도계(particle image velocimetry, PIV)를 이용하여 추진기 후류에서 보오텍스의 3차원적 발달과정을 관찰하였다. Paik and Lee (2002)는 입자영상속도계를 이용하여 낮은 레이놀즈 수에서 단독으로 회전하는 추진기 후류

보오텍스 구조를 조사하였고, Paik, et al. (2007)은 레이놀즈 수 10^6 이상에서 단독으로 회전하는 추진기 후류를 계측하여 날개 간 상호작용, 날개 끝 보오텍스의 소용돌이 강도 등을 분석하였다. Paik and Lee (2003)은 선미반류를 고려하여 추진기 후류의 보오텍스와 난류구조를 조사하였다. Scarano, et al. (2002)는 입자영상속도계를 이용하여 예인수조에서 비행기 날개 끝에서 발생하는 보오텍스의 궤적, 속도, 회전량에 대해 분석하였다. Kim and Rhee (2010)은 날개 끝에서 발생하는 보오텍스를 계산하고 적합한 계산조건을 제시하였다. 날개 끝의 액체 분사에 대해서는 Chahine, et al. (1993)가 폴리머(polymer)를 분사하여 날개 끝 보오텍스를 지연시키는 실험을 하였으며, Zhang, et al. (2009)는 수치계산을 하여 효과를 분석하였다. Ahn, et al. (2010)은 추진기 날개 끝에서 물분사 실험에 따른 소음 레벨을 측정하여 보오텍스 발생 지연에 대해 연구하였다. Fruman, et al. (1995)는 분사하는 액체의 종류에 따른 점성 및 탄성 특성에 따라 보오텍스의 특성이 다른 것을 확인하였다. Ahn, et al. (2001)은 추진기의 피치, 캠버, 두께/코오드 비에 따른 소음 레벨을 측정하여 소음 특성을 분석하였다.

본 논문에서는 날개 끝 보오텍스 캐비테이션 제어를 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일반적인 날개 끝 형상을 갖는 프로펠러(KP933)와 날개 끝 부분이 두터운 blunt tip을 갖는 프로펠러(KP934)에 대하여 점성유동 수치해석을 수행하고 날개 끝 보오텍스의 구조와 특성을 해석한다.

수치해석에서 사용된 프로펠러 상류 유동조건은 균일류와 반류유동 상태이고 각각의 프로펠러에 대하여 적용하였다.

2. 대상 프로펠러 형상

본 연구에 사용된 기준 프로펠러(KP933)는 살물선(bulk carrier)용으로 설계된 것이며 날개 수는 4익이다. Fig. 1은 수치해석에 사용된 2종의 프로펠러 형상을 보이며 Fig. 1(a)는 두 추진기가 다른 부분을 나타내고, Fig. 1(b)는 다른 부분을 날개 끝 위쪽에서 바라본 형상이다. KP933과 KP934 프로펠러의 형상은 반경별 날개두께 분포를 제외하고 다른 기학적 형상을 동일하다. KP933의 날개두께 분포는 날개 뿌리(blade root)부터 $1.0R$ (R : 프로펠러 반경)까지 점점 감소하는 형태이고, KP934는 날개뿌리부터 $0.85R$ 까지 반경별 날개 두께분포는 KP933과 동일하지만 $0.85R$ 이후 날개 끝 까지는 증가하다가 감소하는 형태를 갖는다(Kim, et al., 2011).

그리고 날개 끝 부분의 형상은 KP933은 상대적으로 얇은 두께($0.0025D$)를 가지고, KP934는 상대적으로 두꺼운 두께($0.008D$)를 가진다. 날개 끝은 2종 모두 부드러운 곡률이 아닌 절단된 형상을 가지고 있으며, 절단면의 코오드 길이는 $0.09D$ 로 동일하다.

(left: sharp tip (KP933), right: blunt tip(KP934))

Fig. 1 Propeller tip shapes

Fig. 2는 대상선박의 모형선 공칭반류를 보여주고 있다. 수치 계산에 사용된 추진기는 모형 크기이며 직경(D)은 250mm 이다. 아래 공칭반류 분포에서 바깥쪽 실선이 $0.5D$ 에 해당한다.

Fig. 2 Nominal wake

3. 계산방법

3.1 계산조건

균일류에서 회전하는 추진기 단독성능 계산에 대해서는 추진기 회전속도를 고정시키고 유입속도를 변화하여 전진비를 변화시켰다. 날개를 회전시키지 않고 유체를 회전시켰으며, 4개의 날개가 아닌 1개의 날개만 고려하고 날개와 날개 사이는 주기 경계조건을 사용하였다. 선미 반류 중에서 프로펠러 날개 주위 유동해석에서는 공칭반류 분포를 계산영역 입구면에서 경계조건으로 사용하였다. 4개의 모든 날개는 계산영역에 포함되고 추진기를 직접 회전시키는 방법을 사용하였다. 각각의 유입유동에 따라 추진기 날개 위치 각도에 따른 보오텍스 특성을 분석하였다.

3.2 수치 모델링

질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, realizable $k-\epsilon$ 난류 모델 방정식을 비압축성 기반 비정상 상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며, 속도와 압력의 연성은 PISO 알고리즘을 선택하였다. 대류항은 2차 상류차분 도식으로 차분하였고, 확산항은 2차 중심차분을 사용하였다. 계산 매트릭스의 수렴성을 증가시키기 위해 Algebraic Multi-Grid (AMG) 방법을 사용하였고, 계산 매트릭스는 Gauss-Seidel 반복 계산을 이용하였다. 계산은 상용 CFD code인 Fluent v.12를 이용하였다.

3.3 경계조건 및 격자

균일류에서 프로펠러 단독성능 수치해석에서는 1개의 날개만 고려하였기 때문에 Fig. 3과 같이 90°의 각도를 가지는 4분 원기둥 형태의 계산영역을 고려하였다. 수치계산영역은 프로펠러 면과 직경(D)를 기준으로 전류방향으로 3D, 후류방향으로 7D, 반경 방향으로 3D의 크기로 설정하였다. 프로펠러 날개를 에워싸는 가까운 영역(near field)은 높이 0.4D, 반지름 0.6D의 작은 4분 원기둥으로 구성하였다. 추진기 회전 대신 유입류에 회전성분(원심력, 전향력)을 고려하여 계산하였으며, 날개 간의 상호작용을 고려하기 위하여 날개와 날개 사이의 경계면에서는 주기(periodic) 경계조건을 적용하였다.

추진기의 복잡한 형상으로 인하여 추진기를 포함하는 작은 4분 원기둥을 만들어 사면체 격자로 격자계를 구성하고 그 밖의 영역은 육면체 격자로 격자계를 구성하였다. 추진기의 앞날(leading edge), 뒷날(trailing edge) 및 날개 끝(blade tip)에서는 Fig. 3(b)와 같이 조밀한 격자를 분포시켰으며 총 사면체 격자는 100만개를 작성하였다. 육면체 격자는 20만개를 사용하여 총 120만개의 격자로 격자계를 구성하였다.

Fig. 3 Domain extent and propeller surface meshes

선미 반류를 고려한 계산은 추진기를 직접 회전시키기 위해 날개 4개를 모두 고려하였다. 격자는 균일류 계산에 사용된 격자를 90° 회전 복사하면서 생성하였다. 사면체 격자로 이루어진 추진기를 둘러싼 작은 원기둥을 회전시켜 추진기의 회전을 고려하였다. 입구 경계조건에서 고려된 공칭반류가 후류로 전진하면서 점성 전단층(viscous shear-layer)의 발달로 속도분포의 구배가 완화되어 Fig. 2와 같은 속도구배가 유지되지 않고 부드럽게 연결되기 때문에 입구 경계면까지의 거리를 최소화 하였으며,

추진기의 영향을 고려하여 전류방향으로 0.4D의 크기로 계산영역을 선정하였다.

4. 계산결과

4.1 균일류를 고려한 계산결과

균일류에서 회전하는 추진기 단독성능은 추진기의 회전속도를 25 rps로 고정시키고 유입류의 속도를 변화시키면서 전진비 0.2, 0.4, 0.6, 0.8에서 계산하였다. Table 1은 전진비에 따른 KP933, 934의 추력과 토크를 나타낸다. 낮은 전진비에서 KP934의 추력 및 토크가 약 3% 작게 계산되었으며, 이는 날개 끝에서의 3차원 효과의 영향이 더 커진 것으로 판단된다. 높은 전진비에서는 KP934가 추력은 1%, 토크는 0.4% 크게 계산되었으며, 추진기의 설계영역에서는 거의 동일한 효율로 계산되었다.

Table 1 K_T and $10K_Q$ for KP933 and KP934

J	K_T		$10K_Q$	
	KP933	KP934	KP933	KP934
0.2	0.3203	0.3117	0.3779	0.3641
0.4	0.2243	0.2194	0.2921	0.2856
0.6	0.1232	0.1223	0.1950	0.1947
0.8	0.0123	0.0124	0.0798	0.0801

Fig. 4 ~ 7은 전진비 0.2 ~ 0.8에서의 압력면과 흡입면에서의 압력계수($C_p = (P - P_{ref}) / \frac{1}{2} \rho (nD)^2$) 분포를 나타낸다. 여기서, P_{ref} 는 계산영역에 일정한 정수압을 분포시키기 위해 출구 경계면에 고려하는 압력으로 본 계산에서는 0으로 계산하였다. 압력면과 흡입면 모두 전체적인 압력분포가 KP933이 KP934보다 높은 것을 확인할 수 있다. 흡입면의 날개 끝 부분에서는 KP934가 KP933보다 낮은 압력분포를 보이는 것을 확인할 수 있다.

날개 끝에서 발생하는 보오텍스는 강한회전으로 인해 중심(core)으로 갈수록 압력이 낮아지기 때문에 날개 끝 보오텍스에 대해서는 압력계수 분포를 이용하여 분석하였다. Fig. 8 ~ 11은 전진비 0.2~0.8에 따른 날개에 수직한 면에서의 낮은 압력분포를 나타낸다. KP933의 경우 보오텍스가 KP934보다 먼저 발달하기 시작하며 그 크기도 큰 것을 확인할 수 있다. KP934는 절단된 날개 끝 앞에서는 작은 보오텍스가 발달하나 절단된 날개 끝을 지나면서 보오텍스가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 낮은 전진비에서는 보오텍스 발달과정이 잘 계산되었으나 높은 전진비에서는 받음각의 변화로 보오텍스 발달과정이 명확하게 드러나지 않았다. 날개 끝이 상대적으로 두꺼운 KP934가 KP933보다 낮은 전진비에서 추력과 토크가 약 3% 작게 계산된 반면 보오텍스가 지연되고 작게 발달하는 것을 확인하였다.

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 4 Pressure coefficient distributions and streamlines at $J=0.2$ (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 6 Pressure coefficient distributions and streamlines at $J=0.6$ (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 5 Pressure coefficient distributions and streamlines at $J=0.4$ (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 7 Pressure coefficient distributions and streamlines at $J=0.8$ (left: KP933, right: KP934)

Fig. 8 Pressure coefficient distributions at J=0.2

Fig. 9 Pressure coefficient distributions at J=0.4

Fig. 11 Pressure coefficient distributions at J=0.8

4.2 선미 반류를 고려한 계산결과

선미 반류에서 회전하는 두 추진기에 대한 해석을 하였다. 전진비 0.654, 회전수 25rpm에서 추진기 각도에 따른 두 추진기의 날개 끝 보오텍스 특성을 검토하였다. Fig. 12는 예인수조에서 계측한 공칭반류와 계산에서 입구 경계조건에 구현한 공칭반류 분포를 나타낸다. 계산에 사용된 공칭반류는 계측된 공칭반류를 이용하여 입구경계면에 보간을 통해 구현하였으며, 계측된 공칭반류와 비교해 상대적으로 완만한 변화를 보인다. 실험에서 계측한 공칭반류를 잘 구현하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12 Nominal Wake

Fig. 13 ~ 17은 전진비 0.634에서 날개의 각도에 따른 압력면과 흡입면에서의 압력계수 분포를 나타낸다. 날개의 각도는 날개 각도 0° 를 기준으로 $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$ 의 위치를 고려하였다. 균일류에서 작동하는 추진기와 동일하게 KP933가 KP934보다 압력면에서의 압력이 높게 계산되었으며, 반경방향 0.9R 정도의 뒷날 근처에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 날개 끝 쪽의 압력분포도 KP934가 KP933보다 낮은 것을 알 수 있다. 흡입면에서의 압력분포는 거의 동일하게 계산되었으며, 날개 끝의 압력분포를 보면 보오텍스와 공동이 발달되는 앞날 부근에서 압력이 낮게 계산되었으며, KP934의 낮은 압력 영역이 KP933보다 조금 길게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 13 Pressure coefficient distributions and streamlines with -20 degree blade (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 14 Pressure coefficient distributions and streamlines with -10 degree blade (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 16 Pressure coefficient distributions and streamlines with 10 degree blade (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 15 Pressure coefficient distributions and streamlines with 0 degree blade (left: KP933, right: KP934)

(a) pressure side

(b) suction side

Fig. 17 Pressure coefficient distributions and streamlines with 20 degree blade (left: KP933, right: KP934)

Fig. 18 Pressure coefficient distributions with -20 degree blade (left: KP933, right: KP934)

Fig. 19 Pressure coefficient distributions with -10 degree blade (left: KP933, right: KP934)

Fig. 20 Pressure coefficient distributions with 0 degree blade (left: KP933, right: KP934)

Fig. 21 Pressure coefficient distributions with 10 degree blade (left: KP933, right: KP934)

Fig. 22 Pressure coefficient distributions with 20 degree blade (left: KP933, right: KP934)

균일류에서의 계산과 동일하게 날개의 수직단면에서 압력분포를 이용하여 날개 끝 보오텍스의 특성을 비교하였다. Fig. 18 ~ 22는 날개의 각도 -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, $+20^\circ$ 위치에서의 압력분포를 나타낸다. 그림에서 “tip”은 잘려진 날개 끝의 위치를 나타낸다. KP933이 KP934와 비교해 잘려진 날개 끝의 앞에서부터 보오텍스가 상대적으로 크게 발달하는 것을 알 수 있다. 반면 KP934는 잘려진 날개 끝의 앞쪽에서는 보오텍스가 상대적으로 작았으나 잘려진 날개 끝을 지나면서 보오텍스가 상대적으로 크게 발달하는 것을 알 수 있다.

Fig. 23은 추진기 날개 0° 위치에서 잘려진 날개 끝 주위의 압력분포를 나타낸다. 잘려진 날개 끝 앞에서는 얇은 날개 끝을 가지는 KP933의 압력분포가 KP934보다 낮아 강한 보오텍스가 발달하는 것을 알 수 있다. 잘려진 날개 끝을 지나면서 압력면과 흡입면의 압력차가 발생하고 잘려진 면에서 압력면에서 흡입면으로 넘어가는 유동이 발달하는 것을 알 수 있다. 넘어가는 유동은 잘려진 날개가 클수록 크게 나타났으며, 넘어가는 유동이 날개 끝 보오텍스와 합쳐지는 것을 알 수 있다. 날개 끝이 두꺼운 KP934는 잘려진 날개 끝을 지나면서 날개 끝 보오텍스의 강도가 커지는 것을 알 수 있다 (Park, et al., 2005). 잘려진 날개 끝 형상을 가지는 추진기에서는 날개의 앞날에서 발생된 보오텍스가 잘려진 면에서 넘어가는 유동의 보오텍스와 합쳐져서 후류로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 23 Pressure coefficient distributions around the knuckled tip with 0 degree blade (left: KP933, right: KP934)

5. 결 론

본 논문에서는 날개 끝 부근($R=0.85$ 이상)에서 날개단면의 두께분포가 다른 두 추진기의 날개 끝에서 발생하는 보오텍스의 특성에 대해 비교하였다. 균일류와 선미 반류에서 회전하는 추진기에 대해 계산하였으며, 균일류에서는 전진비에 따른 특성을 고려하였고, 선체 반류중에서는 날개의 위치각도에 따라 특성을 검토하였다. 날개 끝이 상대적으로 두꺼운 KP934는 KP933에 비해 추력과 토크가 약 3%정도 작고 날개 끝 보오텍스의 강도도 작게 추정되었다. 얇은 날개 끝을 가지는 KP933은 잘려진 날개 끝 앞에서부터 상대적으로 큰 강도의 보오텍스가 발달하여 후류로 빠져나가는 반면에 KP934는 잘려진 날개 끝 앞에서는 상대적으로 작은 강도의 보오텍스가 발달하고 잘려진 날개 끝을 지나면서 압력면에서 흡입면으로 roll up 유동에

의해 보오텍스가 조금 커지는 모습을 확인하였다. 결론적으로 상대적으로 두꺼운 날개 끝을 가지는 KP934가 KP933보다 작은 크기의 보오텍스를 생성하는 것을 확인하였다.

날개 끝($R=0.85$ 이상)에서의 큰 두께비는 추력 및 토크와 같은 효율은 거의 일정하게 유지하면서 보오텍스의 생성을 지연시키는 것을 수치적으로 확인하였다. 프로펠러 날개 끝 두께변화에 따른 날개 끝 보오텍스 유동의 생성 지연과 와류강도 감소 기술은 프로펠러 캐비테이션에 의한 선체표면 변동압력 감소 및 캐비테이션 초기발생 속도 향상 기술로 활용이 기대된다.

후 기

이 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업의 “친환경 추진기 캐비테이션성능 제어기술 개발(10033662)”, 교육과학기술부의 “WCU사업(R32-2008-000-10161-0)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Ahn, B.K. Lee, C.S. Han, J.H. & Kim, J.H., 2010. Propeller Tip Vortex Cavitation Control and Noise Reduction by Water Injection, *28th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Pasadena, Clifornia, 12-17 September 2010.
- Ahn, J.W. Park, Y.H. Moon, I.S. & Kim, K.S., 2001. Cavitation and Noise Characteristics of High-Speed Propellers with Geometric Variation, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), pp.23-30.
- Calcagno, G. Di Felice, F. Felli, M. & Pereira, F., 2002. Propeller Wake Analysis Behind a Ship by Stereo PIV, *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan, 8-13 July 2002.
- Chahine, G.L. Frederick, G.F. & Bateman, R.D., 1993. Propeller Tip Vortex Cavitation Suppression Using Selective Polymer Injection, *Journal of Fluid Engineering*, 115(3), pp.497-503.-961.
- Fruman, D.H. Pichon, T. & Cerrutti, P., 1995. Effect of Drag-reducing Polymer Solution Ejection on Tip Vortex Cavitation, *Journal of Marine Science and Technology*, 1(1), pp.13-23.
- Kim, S.E. & Rhee, S.E., 2010. Efficient Engineering Prediction of Turbulent Wing Tip Vortex Flows, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 62(3), pp.291-309.
- Paik, B.G. Kim, J. Kim, K.Y. & Kim, K.S., 2007. Study on the Three Dimensional Flow Characteristics of the Propeller Wake Using PIV Techniques, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(3), pp.219-227.
- Paik, B.G. & Lee, S.J., 2002. Velocity Field Measurements of Propeller Wake Using a Phase-averaged PTV Technique, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(3), pp.41-47.
- Paik, B.G. & Lee, S.J., 2003. PIV Velocity Field Measurements of Flow around a Ship with Rotating Propeller, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(5), pp.17-25.
- Park, S. Heo, J. & Yu, B.S., 2005. A Comparison of the Tip Shapes of a Rudder in view of Cavitation, *Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea*, BEXCO, Republic of Korea, 12-13 May 2005.
- Scarano, F. van Wijk, C. & Veldhuis, L.L.M., 2002. Traversing Field of View and AR-PIV for Mid-field Wake Vortex Investigation in a Towing Tank, *Experiments in Fluids*, 33, pp.950
- Zhang, Q. Hsiao, C.T. & Chahine, G., 2009. Numerical Study of Vortex Cavitation Suppression with Polymer Injection, *7th International Symposium on Cavitation*, Ahn Arbor, Michiga, USA, 17-22 August, 2009.
- Kim, K.-S. et al., 2011. *Ship Propeller with Thick Thickness around Blade Tip*, Patent Application Number : 10-2011-0050680

박 선 호

서 정 화

김 동 환

이 신 형

김 기 섭