

P.O.W 상태에서의 Tip Rake Propeller에 대한 성능연구

이준형¹·김문찬^{1,†}·신용진¹·강진구¹·장현길²
부산대학교 조선해양공학과¹
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd²

A Study on Performance of Tip Rake Propeller in Propeller Open Water Condition

Joon-Hyoung Lee¹·Moon-Chan Kim^{1,†}·Yong-Jin Shin¹·Jin-Gu Kang¹·Hyun-Gil Jang²
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd²

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 deals with a comparison of performance between tip rake propeller and normal propeller in P.O.W condition. In comparison with normal propeller, tip rake propeller is good at preventing occurring negative effect: tip vortex, etc. But, officially formulated information about tip rake propeller doesn't become known. So this paper makes design variables about rake factors and applies them to propeller geometry. And propellers applied design variables are compared with each other about open water propeller efficiency. Also this paper confirms a vorticity reduction at propeller tip.

Keywords : EEDI(1톤의 화물을 1해상 마일 운반 시 배출되는 이산화탄소량), Energy saving device(ESD, 연료저감장치), Tip Rake propeller(팁 레이크 프로펠러), Propeller Open Water(P.O.W, 프로펠러 단독실험)

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈 및 지구 온난화 문제에 대한 관심이 증대되고 있는 가운데, 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 2013년부터 신조되는 선박에 대하여, 건조, 항해 및 관리에 대한 에너지 효율에 관련된 지표를 제시하여 단계적으로 적용하도록 하고 있다. 특히 건조 시 적용하는 에너지효율지수인 EEDI(Energy Efficiency Design Index for new ships)는 1톤의 화물을 1해상마일 운송하는 동안에 발생하는 이산화탄소 배출량을 나타내며, 2013년 1월 10% 저감을 시작으로 단계적으로 2025년까지 30%를 저감하여야 한다. 이에 따라 전 세계적으로 EEDI를 감소시키기 위하여 선형 및 추진 장치의 개선을 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

추진시스템의 성능을 개선하기 위한 노력은 오랫동안 이루어져 왔으며, 복합 추진시스템을 구축하여 추진성능을 개선하고자 하였다.

복합 추진시스템은 크게 Pre Device, Main Device, Post

Device로 나누어진다. Pre Device에는 Pre-Swirl Stator, Mewis duct, Schneekluth duct 등이 효과가 있는 것으로 알려져 있으며, Main Device로는 고성능 특수프로펠러, 상반회전프로펠러(contra-rotating propeller), 덕트 프로펠러 등이 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 또한, Post Device로는 Twisted Rudder, Propeller-Rudder, Rudder Bulb & Fin 등이 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

특히 프로펠러 전류 장치의 경우, Pre-Swirl Stator와 Mewis Duct와 같은 장치의 연구가 활발히 이루어져 있으며, 그 성능이 선종에 따라 차이는 보이지만 개략적인 에너지 저감효과는 3~4%정도 인 것으로 알려져 있다. 또한 Main Device의 경우에서도 Contra-Rotating Propeller와 Kappel Propeller 같은 특수 프로펠러가 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 후류 장치의 경우에는 그동안 타의 형상을 개선하거나 핀 또는 벌브와 같은 부가물을 설치함으로써 그 성능을 개선하고자 하였으며, 최근에는 프로펠러와 타를 연계시킴으로써 추진성능을 개선하고자 하였다. 하지만 각각의 장치가 효율을 가지고 있다고 하더라도 복합적으로 결합시켜 장치할 경우, 그 성능이 감소되어 효율이 예상치보

다 높지 않거나, 반대로 효율이 줄어드는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 EEDI지수를 순차적으로 만족하기 위해서는 상호작용을 고려한 복합추진시스템의 구축이 반드시 필요하다.

고성능 프로펠러에 대한 종류와 성능은 개략적으로 알려져 있으나, 각각의 설계 기법이나 상세한 성능은 잘 알려져 있지 않다. 그러한 이유에서 성능이 우수한 프로펠러에 대한 다각도적인 접근 방법은 반드시 필요하다.

본 연구에서는 고성능 특수 프로펠러로 알려져 있고, Tip Fin Propeller의 대표라고 할 수 있는 Kappel propeller(forward type)와 Tip Rake Propeller(backward type)를 기준으로 주된 연구를 수행하였다. 두 프로펠러는 항공기에 적용되고 있는 윙렛(winglet)의 개념을 선박에 적용시킨 프로펠러로, 윙렛은 날개 끝에 생기는 보텍스를 약화시켜 유도저항을 줄여 최종적으로 효율을 증가시킨다 (Ha, et al., 2014). 따라서 두 프로펠러는 날개 끝에서 생기는 변동압력변화를 감소시켜 보텍스와 같은 3차원 효과를 방지하여 최종적으로 효율을 증가시키는 원리를 가지고 있다. 하지만 이 역시 공개되어 있는 설계 기법이나 상세한 성능 비교는 미미한 실정이다 (Yamasaki, et al., 2013). 따라서 두 프로펠러에 대한 자료 수집과 분석을 통하여 각 설계 인자와 성능과의 관계를 분석하여 설계인자에 따른 고성능 프로펠러를 설계하고 그 성능을 비교 검토하였다. 본 논문의 프로펠러 간의 성능 비교는 모두 모형 프로펠러에 대한 결과를 기준으로 비교하였다.

2. Tip Rake 프로펠러 설계

2.1 기준 프로펠러 선정

본 연구에서는 컨테이션용으로 개발되어진 KP505를 기준 프로펠러로 선정하였으며, 이 프로펠러는 KCS(KRISO Container Ship)와 함께 Geometry (Kwon, 2013)와 그 성능이 공개되어 있어 학술 및 비교 목적으로 빈번히 사용되는 모델이다. 이 프로펠러는 반경별 레이크가 적용되지 않아 본 연구의 목적인 프로펠러 날개 끝에서의 레이크 적용에 따른 성능비교에 유리하다 판단되었다.

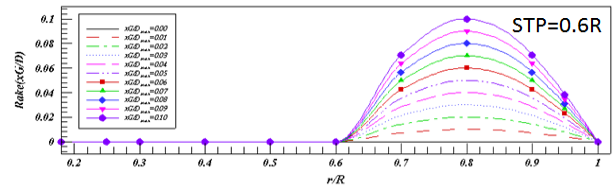
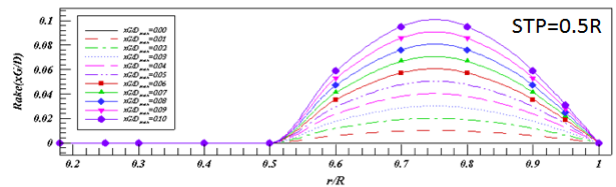
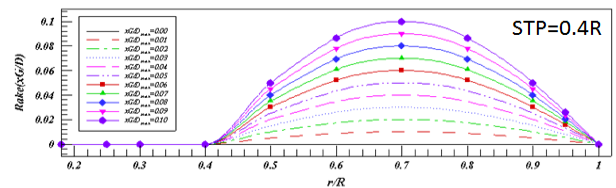
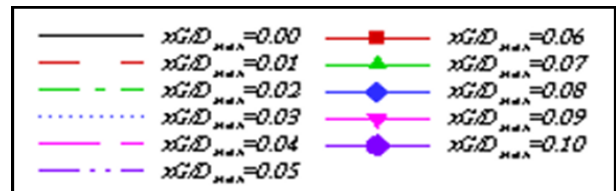
2.2 레이크 변경

본 연구에서는 팁 레이크를 구현하기 위하여 레이크가 적용되는 시작반경(STP), 레이크의 최대크기(xG/D), 레이크 적용 타입(forward, backward)의 변수를 두어 기준 프로펠러에 레이크를 적용하였다.

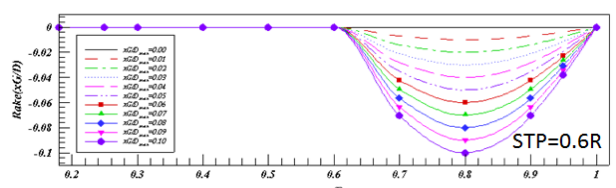
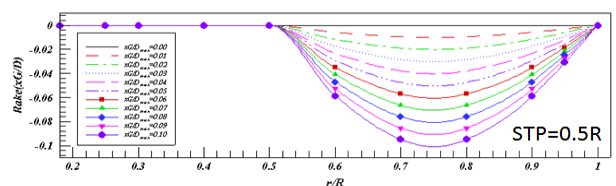
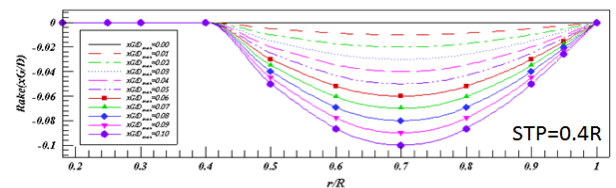
레이크 적용 시작점은 0.4R, 0.5R 및 0.6R로 선정하고 날개 끝까지 적용하였다. 0.4R 이전에 적용될 경우, 프로펠러의 형상이 팁 레이크의 형상보다는 전체적으로 오목하거나 볼록한 형상이 되어 날개 끝 3차원 효과를 줄이기 위한 형상이 되기 힘들기 때문이다. 또한 0.7R 이후로 적용될 경우, 날개 끝에서 과도한 형상 변화로 이후 3차원 형상 모델링 및 제작에 어려움이 있을 것으로 판단하였다.

레이크의 최대 크기는 프로펠러 직경의 1% ~ 10%로 선정하였다. 10%가 초과될 경우, 프로펠러의 형상이 과도한 곡률을 가지는 형상을 띄게 되어 형상의 연속성이 떨어지게 된다.

Fig. 1은 Forward type, Backward type 프로펠러 설계에 적용한 반경별 레이크분포를 나타낸다. 레이크분포 곡선은 sine curve형상을 따라가도록 분포하였다.



(a)Forward Type



(b)Backward Type

Fig. 1 Rake distributions depending on radius

3. 프로펠러 단독성능 수치해석

3.1 포텐셜기반 수치해석

본 연구에서는 포텐셜기반 프로펠러 해석 프로그램인 KPA4를 이용하여 프로펠러의 단독성능에 대하여 해석을 수행하였다. 포텐셜기반의 수치해석은 이미 프로펠러의 단독성능에 대한 해석에 보편적으로 사용되어왔다 (Kim, et al., 1993; Kim & Lee, 2005). 본 연구의 해석에 사용된 KPA4는 VLM(Vortex Lattice Method)기저의 프로펠러 설계 프로그램이다. 정상유동(steady flow)에서 해석을 수행하였고, 프로펠러의 전체적인 힘과 단면에서의 부하 분포 등에 대한 계산에 있어서는 정확도가 높기 때문에 충분히 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. 또한 해석 결과에 대하여 효율 비교 시, 보다 높은 신뢰도를 가지기 위하여 추진기에 동일한 K_T/J^2 에서 효율을 비교하였다. 이를 위하여 부산대학교에서 수행되어진 KCS선의 자항시험 결과를 이용하였고 (Kwon, 2013), Table 1에 나타내었다.

KPA4를 해석 시, 기준 프로펠러의 직경 대비 레이크가 적용되었을 경우의 전개 직경을 계산하여 늘어난 비율을 고려한 프로그램 해석 입력값(Cd, drag coefficient)의 변화를 주어 해석을 하였고, 이는 Table 2에 정리하였다. 해석 프로펠러 모델의 직경은 250 mm이며, 프로펠러의 회전수는 16 rps로 $J=0.05$ 부터 $J=1.00$ 까지 0.05의 간격을 주어 해석하였다.

Table 1 Result of KCS in self-propulsion test at PNU

V_S	C_{TS}	S_S	D_S	t_s	w_s	K_T/J^2
24	0.00244	9645.0	7.9	0.260	0.266	0.4725

Table 2 Input values of drag coefficient(x103)

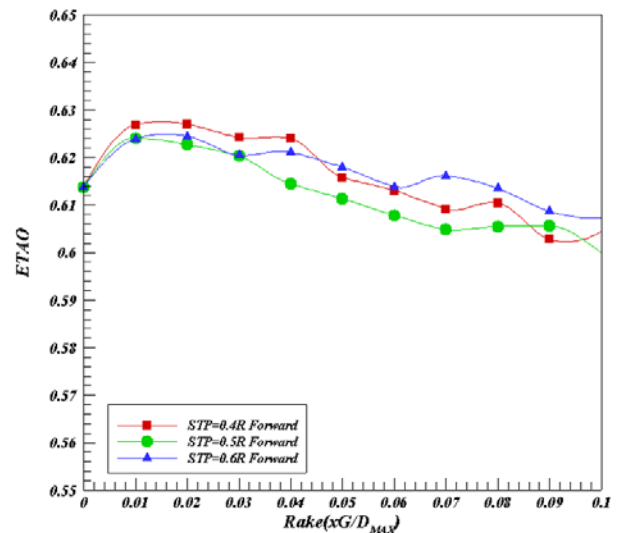
xG/D	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10
STP 0.4R	8.51	8.56	8.62	8.72	8.83	8.97	9.13	9.30	9.49	9.69
STP 0.5R	8.52	8.57	8.65	8.76	8.89	9.05	9.23	9.43	9.64	9.86
STP 0.6R	8.52	8.58	8.68	8.81	8.98	9.16	9.37	9.59	9.83	10.08

*Cd of KP505 : 0.0085

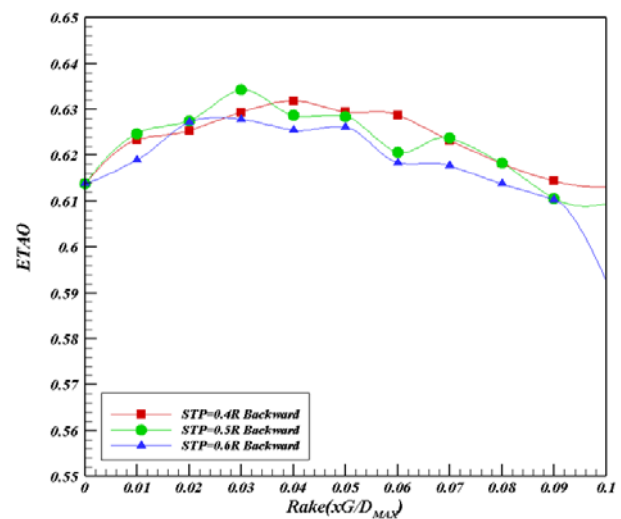
3.2 포텐셜기반 수치해석 결과

본 연구에서 포텐셜기반 수치해석을 통한 프로펠러의 단독성능을 해석하였으며, 성능 비교의 신뢰도를 상승시키기 위하여 동일한 K_T/J^2 에서 각 프로펠러의 단독효율을 상호 비교하였다. Fig. 2는 프로펠러 단독성능에 대한 포텐셜기반 수치해석 결과를

비탕으로 레이크 적용 변수별 동일한 K_T/J^2 에서의 프로펠러 단독성능을 나타낸 그래프이고, 이 결과를 토대로 Forward Type과 Backward Type의 두 가지 형태에서 기준 프로펠러 대비 가장 효율이 높은 케이스의 프로펠러를 선정하였다. Forward 프로펠러에서는 STP=0.4R, xG/D=0.02의 경우가 기준 프로펠러 대비 2.15%로 가장 우수한 결과를 보였고, Backward 프로펠러에서는 STP=0.5R, xG/D=0.03의 경우가 기준 프로펠러 대비 3.35%로 가장 우수한 결과를 보였다. 그러나 위의 주어진 레이크분포에 따라 3-D 모델링을 수행한 결과, Fig. 3과 같이 레이크분포가 적용되는 프로펠러 환경에서 매끄럽지 않은 불연속성이 보임을 확인하였다. 따라서 Fig. 4와 같이 레이크분포를 수정해 주었고, 최종적으로 Forward 프로펠러는 기준 프로펠러 대비 1.934%의 효율 증가를 보였고, Backward 프로펠러는 기준 프로펠러 대비 2.207%의 효율 증가를 보였으며, 이는 Table 3에 정리하였다.



(a)Forward Type



(b)Backward

Fig. 2 Comparison of open water propeller efficiency based on potential

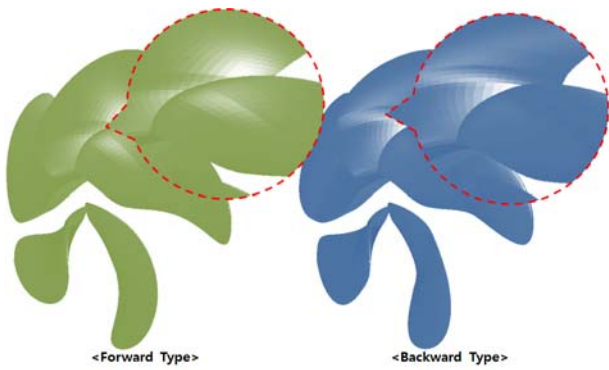


Fig. 3 Discontinuity of 3-Dimensional configuration

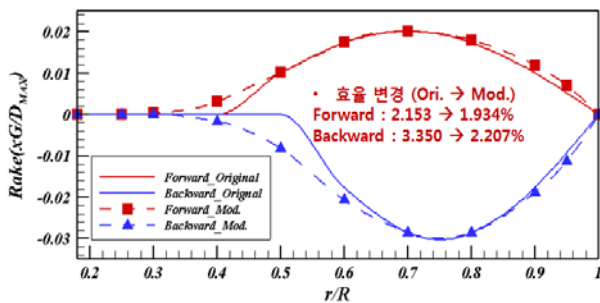


Fig. 4 Modified rake distributions depending on radius

Table 3 Comparison of open water propeller efficiency based on potential

	PP016 (KP505)	PP033 (Forward)	PP034 (Backward)
J	0.659	0.662	0.661
η_o	0.614	0.626	0.627
Diff.	-	1.934%	2.207%

3.3 CFD기반 수치해석

본 연구에서 포텐셜기반 해석에서 결정되어진 효율이 우수한 레이크 분포를 갖는 프로펠러를 선정하여, 그에 대한 CFD기반 해석을 수행하였다. 해석대상은 기준 프로펠러인 PP016 (KP505), PP033(Forward Type), PP034(Backward Type)의 총 3가지의 프로펠러이며, Fig. 5에 각각의 프로펠러에 대한 최종 3-D 형상을 나타내었다. CFD기반 수치해석에서는 프로펠러의 단독성능 해석뿐만 아니라, 해석 프로펠러들의 Tip에서 레이크의 적용으로 나타나는 효과를 확인하기 위해 날개 끝 보텍스에 대한 국부유동해석 (Park, et al., 2011; Baek, et al., 2014)도 함께 수행하였다. CFD기반 수치해석 시 고려한 해석모델 프로펠러의 직경은 250 mm이고, 포텐셜기반 수치해석과 동일하게 프로펠러의 회전수 16 rps로 프로펠러 단독성능 해석은 J=0.1부터 J=0.9 까지 0.1의 간격을 주어 해석하였으며, 국부유동 해석은 J=0.7에서 수행하였다.

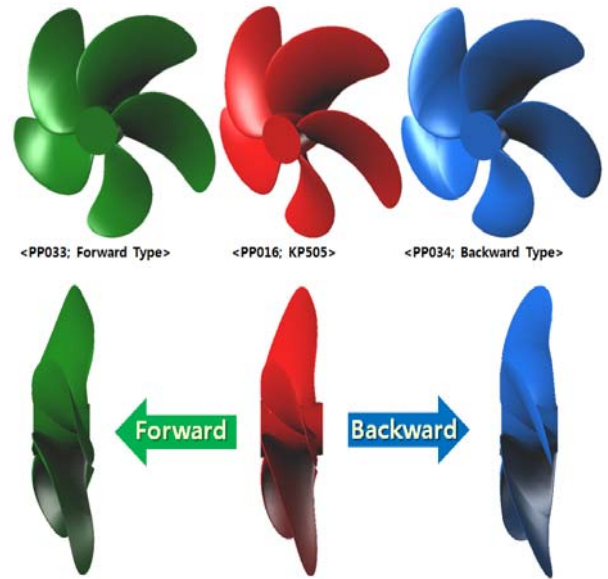


Fig. 5 3-Dimensional configuration of the three selected Propellers

3.3.1 수치해석 방법

본 연구에서는 CD-adapco사에서 개발된 상용 CFD 프로그램인 Star CCM+를 사용하여 해석을 수행하였다. 3차원 비정상상태 비압축성 점성 유동 해석을 수행하였고, 지배방정식은 연속 방정식과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식이다.

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\overline{\rho u_i' u_j'}) + \frac{\partial}{\partial x_i}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})]$$

여기서 x_i, u_i, p, ρ 와 μ 는 직각좌표계, 속도성분, 압력, 밀도, 점성을 각각 나타낸다. 또한 식 (2)의 레이놀즈 응력(Reynolds Stress) 항은 $k-w$ 모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 속도 입력 연성 방법은 SIMPLE 방법을 사용하였으며, 대류항과 확산항에는 2차 차분법을 적용하였다.

본 연구에서 고려한 계산영역과 경계조건을 Fig. 6에 도시하였다. 프로펠러 단독성능 해석에서는 프로펠러 회전으로 인한 유동 해석영역의 운동은 MRF(Moving Reference Frame)기법을 적용하였고, 국부유동 해석에서는 Sliding Mesh기법을 적용하였다. CFD기반 수치해석에서 사용한 해석조건을 Table 4에 정리하였다.

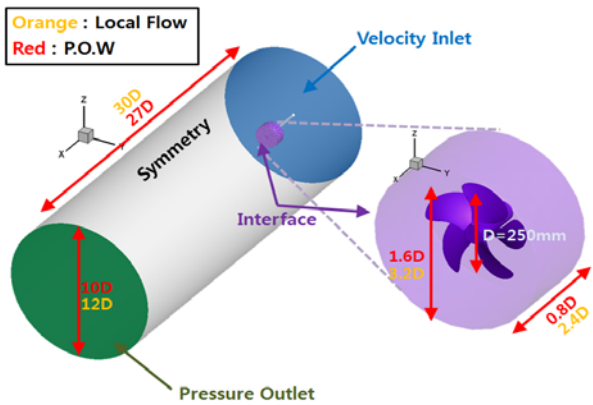


Fig. 6 Computational domain and boundary conditions

Table 4 CFD analysis conditions

	P.O.W analysis	Local flow analysis
Governing equation	RANS Equation	
Discretization	Cell Centered FVM	
Turbulence model	Realizable $k-\omega$ model	
Wall function	Non-Equilibrium	
Velocity-Pressure Coupling	SIMPLE Algorithm	
Rotation method	MRF	Sliding Mesh
y^+	100	
Cell number	1,700,000	5,100,000

3.4. CFD기반 수치해석 결과

본 연구에서 위의 격자계로 3가지의 프로펠러에 대한 프로펠러 단독성능 및 국부유동 해석을 수행하였다. 프로펠러 단독성능 해석결과에서 저속구간에서 큰 오차를 보이는 결과를 보여, 현재 저속구간의 경향을 맞추기 위한 수치해석 기법에 대한 연구가 추가 진행 중에 있다. 반면, 설계 전진비 근처구간($0.6 < J < 0.7$)에서의 경향이 대체적으로 유사함을 확인할 수 있다.

3.4.1 프로펠러 단독성능

본 연구의 3가지 프로펠러에 대하여 CFD기반 해석을 통한 프로펠러 단독효율을 비교하였다. 이 전에 부산대학교에서 수행한 KCS선의 저항시험 결과를 참고하여, 동일한 K_T/J^2 에서 각 프로펠러의 단독효율을 구하였다. 비교결과, 동일한 K_T/J^2 에서 기준 프로펠러(PP016;KP505)를 기준으로 단독효율을 비교하였을 때, PP033(Forward Type)은 -1.408% , PP034(Backward Type)은

-1.102% 로 기준 프로펠러 대비 2가지의 팁 레이크 프로펠러 모두 단독효율이 나빠지는 결과를 보였다. 이는 Table 5에 정리하였고, Fig. 7에 그래프로 도시하였다.

포텐셜기반 수치해석 결과와 비교하였을 때, CFD기반 수치해석 결과의 경향이 반대로 나온 이유는 프로펠러 Tip에서의 레이 크 적용에 따른 효과가 본 연구에서 사용한 격자구성 및 계산조건으로는 정확한 구현이 되지 않은 것으로 판단되며, 프로펠러 Tip에 격자를 더 분포시키거나 프로펠러 회전기법 및 난류 모델 등의 계산조건을 바꾼 CFD기반 수치해석이 필요하리라 생각된다.

Table 5 Comparison of open water propeller efficiency based on CFD

	PP016 (KP505)	PP033 (Forward)	PP034 (Backward)
J	0.673	0.672	0.673
η_0	0.642	0.633	0.635
Diff.	-	-1.408%	-1.102%

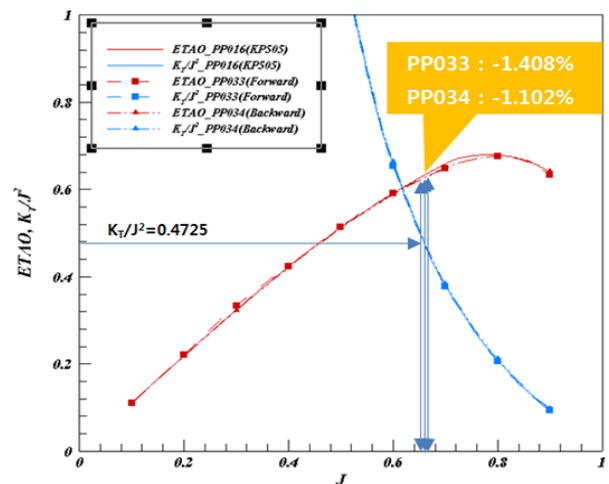


Fig. 7 Comparison of open water propeller efficiency based on CFD

3.4.2 국부유동

프로펠러 단독성능 뿐만 아니라 $J=0.7$ 에서 프로펠러 날개 끝에서의 국부유동 해석을 수행하였다. Fig. 8에서 각각의 프로펠러에 대한 날개 끝 보텍스 크기를 가시화하여 도시하였는데, Backward 프로펠러의 날개 끝 부분에서 보텍스가 다른 두 프로펠러에 비하여 날개 끝 보텍스 크기가 작음을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 9에서는 Vorticity로 날개 끝 보텍스의 강도를 도시하였는데, Backward 프로펠러의 날개 끝 보텍스의 강도가 다른 두 프로펠러에 비하여 약한 것을 확인할 수 있었다. 이는 Backward 프로펠러에 적용한 팁 레이크의 영향으로 인하여 프로펠러 날개 끝에서 야기되는 3차원 효과를 감소시키는데 기인하는 영향으로 판단된다.

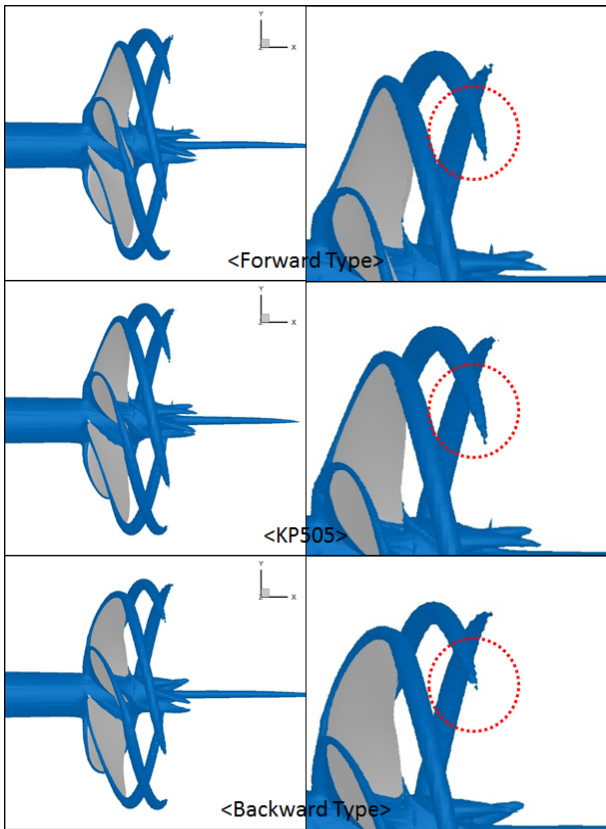


Fig. 8 Iso-surfaces of tip vortex(J=0.7)

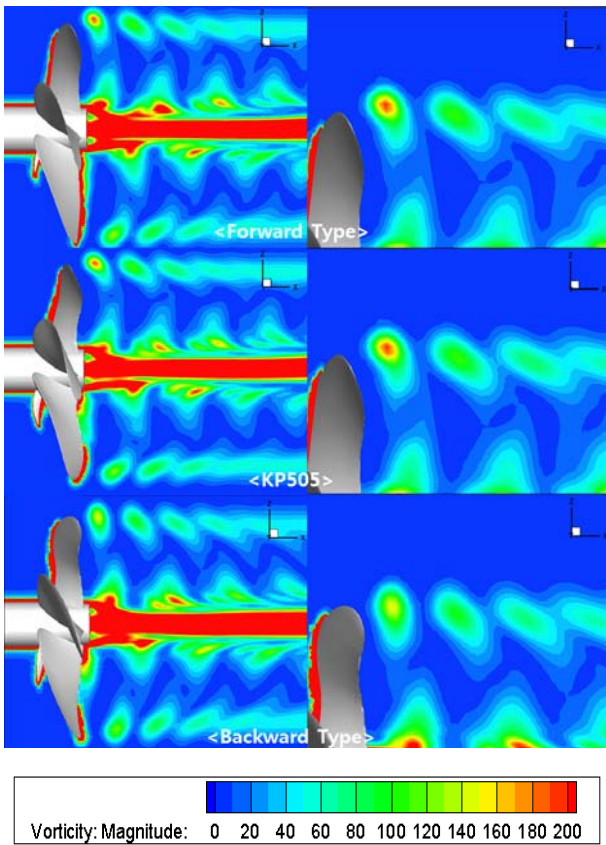


Fig. 9 Vorticity magnitude(J=0.7)

4. 프로펠러 단독성능 시험

4.1 모형 프로펠러

본 연구에서 모형시험을 위하여 기준 프로펠러(PP016; KP505)와 위의 내용에서 포텐셜기반 수치해석으로 도출된 효율이 우수한 PP033(Forward Type), PP034(Backward Type)을 알루미늄으로 모형을 제작하였으며, Fig. 10에 모형 프로펠러의 사진을 나타내었다. 모형프로펠러의 직경은 포텐셜기반 수치해석과 CFD기반 수치해석에서 고려한 250 mm로 제작하려 하였으나, 시험 장비의 허용가능 용량 등의 문제로 부산대학교 예인수조에서 실험 가능한 최대 사이즈인 200 mm로 선정하여 스케일 차이로 인한 영향을 최소화 하려고 하였다.

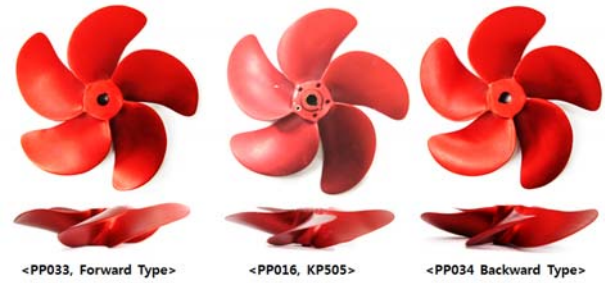


Fig. 10 Model propellers

4.2 모형시험 결과

본 연구에서 우수 프로펠러로 선정된 두 가지 프로펠러와 기준 프로펠러에 대하여 모형시험을 통한 성능 비교를 위한 모형시험을 $J=0.05$ 부터 $J=1.00$ 까지의 범위에서 0.05간격으로 수행하였고, 모형시험에서 고려한 모형 프로펠러의 회전수는 20rps이다. 모형시험에서 각 J 에 대한 Reynolds number를 Fig. 11에 그래프로 도시하였다($J=0.7$ 기준, $Rn=6.09 \times 10^5$). 이 또한 부산대학교에서 수행한 자항시험 결과를 참고하여, 설계속도 24 knots의 K_T/J^2 에서 각 프로펠러의 단독효율을 구하였다. 모형시험 결과, 동일한 K_T/J^2 에서 PP033(Forward Type)은 기준 프로펠러 대비 0.264%, PP034(Backward Type)은 기준 프로펠러 대비 1.280% 단독효율이 좋아지는 결과를 보였고, 이는 Table 6에 정리하였고, Fig. 12에 그래프로 도시하였다.

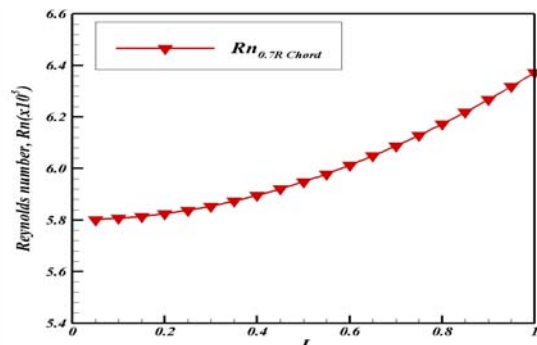


Fig. 11 Reynolds number of each J in experiments

Table 6 Comparison of open water propeller efficiency based on experiments

	PP016 (KP505)	PP033 (Forward)	PP034 (Backward)
J	0.646	0.651	0.651
η_o	0.607	0.608	0.614
Diff.	-	0.264%	1.280%

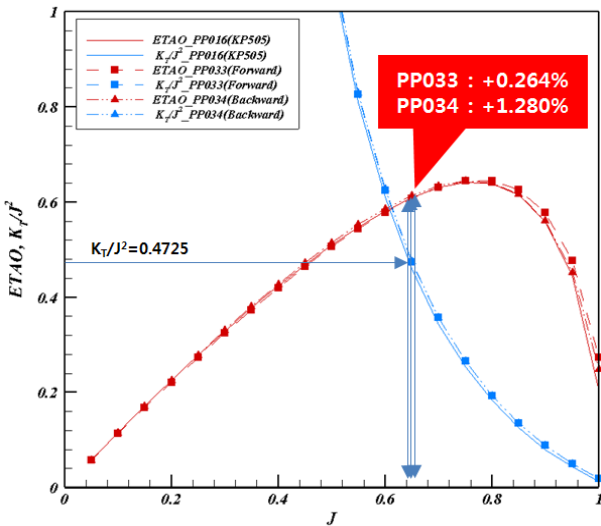


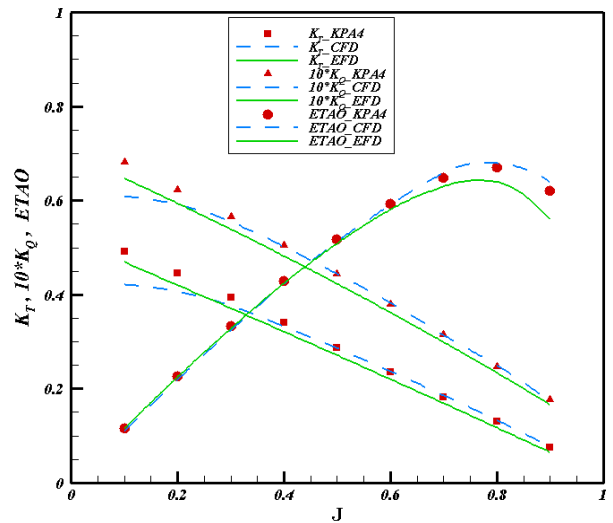
Fig. 12 Comparison of open water propeller efficiency based on experiments

5. Potential • CFD • EFD 비교

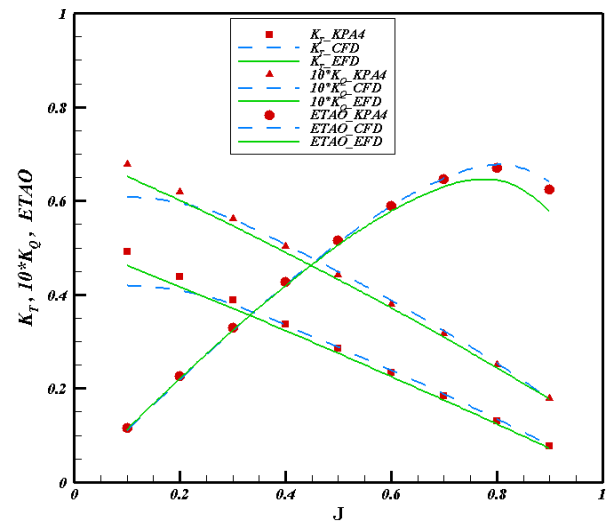
본 연구에서 기준 프로펠러(PP016;KP505)와 PP033 (Forward Type), PP034(Backward Type)의 세 가지 프로펠러에 대한 포텐셜기반 프로그램인 KPA4를 이용한 성능해석, CFD기반 성능해석, EFD기반 성능해석 결과를 가지고 프로펠러 단독시험의 결과에 대하여 비교해 보았다. 이 결과, 3가지 프로펠러에서 모두 CFD기반 성능해석 결과에서는 낮은 J영역에서 다소 차이를 보였으나, J=0.5 이상에서는 KT와 KQ의 결과들이 비교적 유사한 경향으로 일치하는 것을 볼 수 있었다. 또한 포텐셜기반 성능해석 결과와 CFD기반 성능해석 결과가 모형시험결과 보다 다소 높게 나타남을 알 수 있었다. 이에 대한 내용은 Fig. 13에서 확인할 수 있다.

6. 결론 및 고찰

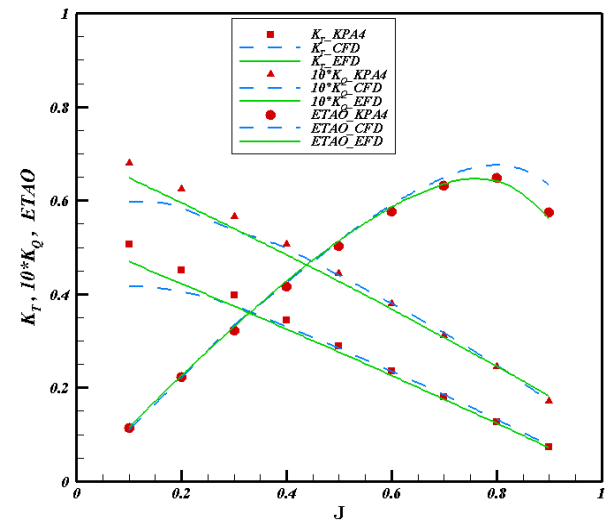
본 연구에서는 컨테이너선(KCS)용 프로펠러인 KP505를 기준으로, 레이크가 적용되는 반경 그리고 레이크의 최대 크기를 변수로 Tip 레이크에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 결과는 모형 프로펠러에 대한 결과이며, 각 해석에서 도출된 프로펠러 단독효율 비교결과를 Table 7에 정리하였다.



(a) PP016(KP505)



(b) PP033(Forward type)



(c) PP034(Backward type)

Fig. 13 Comparison of results

팁 레이크 프로펠러 설계 및 레이크에 따른 초기 영향성 평가

는 포텐셜기반 프로그램을 이용하였다. 그 결과 포텐셜기반 해석 프로그램을 이용하여 레이크 형상의 일련의 변수들을 변화시켜 성능 변화를 검토하였으며, 최종적으로 Backward 프로펠러는 기존 프로펠러 대비 효율이 약 2.2% 정도 증가됨을 보였고 Forward 프로펠러는 약 1.9% 정도의 효율 증가를 보였다.

위의 결과로 도출되어진 프로펠러를 CFD 프로그램을 이용하여 POW 해석 및 국부유동 해석을 수행하였다. CFD해석에서는 세 가지 프로펠러에 대하여 Star CCM+를 이용한 수치해석을 수행하여 기존 프로펠러보다 우수한 결과가 도출되는 것을 목표로 하였으나, 추진기 단독효율 측면에서는 기존 프로펠러 대비 효율 약간 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 국부유동 해석에서는 Backward 프로펠러의 경우, 기존 프로펠러 대비 날개 끝 보텍스 감소를 확인할 수 있었지만, Forward 프로펠러의 경우, 날개 끝 보텍스가 기존 프로펠러와 거의 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

포텐셜기반 프로그램에서 선정된 최종 프로펠러에 대하여 모형 제작하였고, 부산대학교 예인수조에서 단독성능 시험을 수행하였다. 그 결과 모형실험 결과에 있어서 효율 향상의 폭은 포텐셜 이론에 의한 해석의 경우보다 다소 적으나 Backward 프로펠러가 기존 프로펠러보다 약 1.3% 우수하고 Forward 프로펠러의 경우는 약 0.3% 정도 우수한 결과를 보였다.

본 연구를 통하여 팁 레이크 적용에 따른 프로펠러의 성능 비교 결과, 포텐셜기반 및 CFD기반 수치해석과 모형시험에서 효율 증가 및 날개 끝 보텍스 감소에 있어서 Backward 프로펠러, Forward 프로펠러, 팁 레이크가 없는 프로펠러 순으로 그 성능이 예상되었다. 하지만 CFD 계산에 있어서는 날개 끝 보텍스의 세기는 Backward 프로펠러의 경우가 감소하는 것으로 보였지만, 나머지 프로펠러들에서의 차이는 확인하기가 어려웠고, 특히 효율에 있어서 정량적으로나 정성적으로 포텐셜 해석과 실험의 경향을 따라가지 않아 이에 대한 더 깊은 연구가 필요하리라 생각된다. 이러한 이유로는 팁 레이크의 유무와 방향에 따라 발생하는 효율 차이가 적어 계산 파라미터에 따른 상관관계 연구 등이 필요하리라 생각된다.

Table 7 Comparison results of each analysis step

Type	Potential	CFD	EFD
KP505	-	-	-
Forward	1.9%	-1.1%	0.3%
Backward	2.2%	-1.4%	1.3%

후 기

본 연구는 대우조선해양에서 부산대학교 조선해양 플랜트 글로벌 핵심 연구 센터 (GCRC)로의 산학연구로서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Baek, D.G. Yoon, H.S. Jung, J.H. Kim, K.S. & Park,

B.G., 2014. Effect of advance ratio on the evolution of propeller wake. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51, pp.1-7.

Ha, D.S. Jeon, E.C. Ahn, K.W. & Yeom, G.W., 2014. Aerodynamic analysis of various winglet shapes. *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers 2014 Spring Conference*, pp.216-217.

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. Lee, J.T. Lee, C.S. & Seo, 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.

Kwon, J.I., 2013. *A study on biased asymmetric pre-swirl stator for container ship*. Master's thesis. Pusan National University.

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, pp.501-508.

Yamasaki, S. Okazaki, A. Mishima, T. Kawanami Y. & Yoshitaka, U., 2013. The effect of tip rake on propeller induced pressure fluctuations first report: a practical formula to estimate the reduction rate of pressure fluctuations the application of backward tip rake. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 17, pp.9-17.



이준형



김문찬



신용진



강진구



장현길