

CFD를 이용한 덕트 프로펠러 단독 상태에서의 추진 성능 예측

이 경 언,¹ 진 두 화,² 이 상 옥*²

¹현대중공업 선박연구소

²울산대학교 기계공학부

PROPULSIVE PERFORMANCE PREDICTION OF A DUCTED PROPELLER IN OPEN WATER CONDITION USING CFD

K.-U. Lee,¹ D.-H. Jin² and S.-W. Lee*²

¹Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries

²School of Mechanical Engineering, University of Ulsan

In this study, a numerical prediction on propulsive performance of a ducted propeller in open water condition was carried out by solving Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) equation using computational fluid dynamics(CFD). A configuration of propeller Ka-470 inside duct 19A was considered. Hexahedral grid system was generated by dividing whole computational domain into three separate regions; propeller, duct and outer flow region. A commercial CFD software, ANSYS-CFX was used for numerical simulations. Results were compared with experimental data and showed considerable improvement in accuracy, in comparison to those from surface panel method which is based on potential flow assumption. The results also exhibited the importance of grid system within the gap between the inner surface of duct and blade tip for accurate prediction of propulsive performance of ducted propeller.

Key Words : 덕트 프로펠러(Ducted Propeller), 단독상태(Open Water Condition), 추진성능(Propulsive Performance), 점성유동(Viscous Flow), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)

1. 서 론

덕트 프로펠러(ducted propeller)는 일반적으로 가속형 덕트와 감속형 덕트 타입으로 구분하며, 가속형 덕트 프로펠러의 경우, 덕트에 의한 부가 추력을 발생시킴으로써 추진 효율 증가를 얻을 수 있어 저속에서 높은 추력이 요구되는 예인선이나 저인망 어선에 자주 사용되고 있다. 또한 감속형 덕트 프로펠러는 비록 추진 효율 손실이 있으나, 덕트 내부 유동장의 유속을 감소시켜 고속 운항시 캐비테이션 발생 위험성을 낮출 수 있는 장점이 있어 고속 수중 운동체 및 잠수함 등에 많이 적용되고 있다[1]. 이와 같이 넓은 적용 범위를 가지는 덕트 프로펠러의 최적 설계 및 추진 성능 향상을 위하여 많

은 연구가 수행되어져 왔으나, 대부분의 기존 연구들은 비점성 포텐셜 유동 가정을 기반으로 한 표면 패널법(surface panel method)을 적용하였다[2-4].

Baltazar and Falcao de Campos[2]는 표면 패널법을 이용하여 간극(gap) 모델에 따른 덕트 프로펠러의 성능 예측 결과를 비교하였다. 두 가지 타입의 덕트 프로펠러(프로펠러 Ka-470 + 덕트 19A 및 프로펠러 4902 + 덕트 37)에 대한 정상상태 유동장을 해석하고 덕트 뒷전(trailing edge)에서 반류(wake)가 떨어져 나가는 위치 변화에 따른 덕트와 날개 표면에서의 압력분포를 비교하였으며, 이를 통하여 덕트와 프로펠러 날개끝 사이의 간극 크기에 따라 덕트와 프로펠러가 받는 부하가 크게 영향을 받음을 확인하였다. 또한 프로펠러 Ka-470 모델과 덕트 19A 모델에서 변형된 덕트 19Am 모델에 대한 수치 해석 연구[3]를 통하여 반류 모델의 개선에 의한 추진 성능 예측의 정확도를 높이고자 하였으며, 이 때 덕트가 없는 단독 프로펠러에 대한 추진 성능 예측의 경우 우수한 결과를 얻을 수 있었으나, 덕트 프로펠러추진 성능 해석의 경우 실험값과

Received: April 15, 2015, Revised: June 12, 2015,

Accepted: June 15, 2015.

* Corresponding author, E-mail: leesw@ulsan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2015.20.2.001>

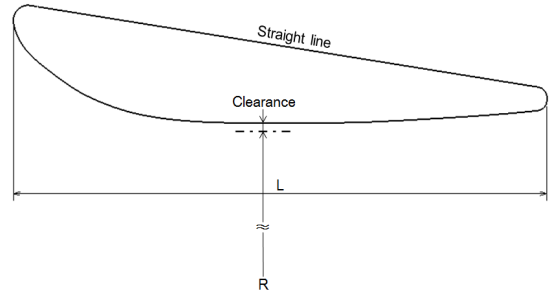
© KSCFE 2015

상대적으로 큰 차이를 보였다.

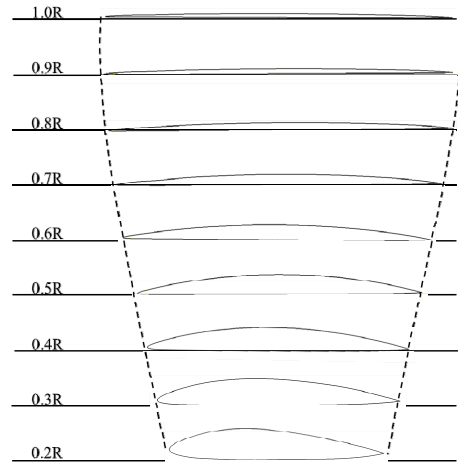
또한, Stefano et al.[4]도 표면 패널법을 이용하여 프로펠러 날개와 동등한 길이를 갖는 단순 원통형 파이프 내부에서 다양한 피치를 가지는 프로펠러에 대한 성능 해석을 수행하였다. 이 연구에서 날개끝과 원통 사이의 간극은 날개 반경의 5%로 설정하여 실험값에 매우 근접한 수치해석 결과를 얻어 낼 수 있었으나, 이 경우 상대적으로 간극이 큰 경우에 해당하며 덕트에 의한 경계층 점성 영향이 크지 않은 것으로 평가된다.

일반적으로 덕트 프로펠러는 익형 단면의 덕트에 의한 경계층 유동장 내에서 프로펠러가 회전하고 있기 때문에 덕트 프로펠러 추진 성능의 정확한 예측을 위해서는 덕트 경계층 점성 유동을 고려한 CFD 해석이 필수적인 것으로 알려져 있다. 이를 위하여 Yoo et al.[5]은 덕트 및 전치 가이드 베인(inlet guide vane)을 가지는 프로펠러에 대해 3차원 점성유동 CFD 해석을 수행하고, 단단(single-stage) 터빈 유동에 대한 해석 결과에 대하여 실험값과 비교 검증을 수행하였다. 또한 최근에 Jung et al.[6]은 감속, 가속형 덕트를 포함하는 세 가지 서로 다른 타입의 덕트 프로펠러에 대한 단독성능 CFD 해석을 수행하고, 모형시험을 통하여 수치해석 결과를 비교 검증하였다.

선박 프로펠러 추진 성능 해석에 일반적으로 적용되어온 기존의 표면 패널법은 비점성 포텐셜 유동의 가정을 기반으로 하므로 덕트 경계층 유동과 프로펠러 유동 사이의 상호작용에 대한 정확한 예측에는 한계성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 덕트의 점성 경계층 유동 및 프로펠러 날개끝(blade tip) 간극에 의한 영향을 보다 정확하게 고려하기 위하여 3차원 비압축성 레이놀즈 평균 나비에-스톡스(Reynolds



(a) Duct 19A



(b) Propeller Ka-470

Fig. 1 Profiles of the ducted propeller

averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식을 적용하여 점성 유동장 수치 해석을 수행하였다.

CFD 해석을 위한 덕트 프로펠러 모델로는 Baltazar and Falcao de Campos[2]가 표면 패널법을 적용하여 추진 성능 해석을 수행한 프로펠러 Ka-470와 덕트 19A 모델을 적용하였으며, 본 연구에서 얻는 수치해석 결과를 Baltazar et al.[2,3]의 표면 패널법 해석 결과 및 실험값 등과 비교 분석하였다.

2. 수치 모델 및 해석 방법

2.1 프로펠러 모델

본 수치 해석에 적용된 프로펠러 Ka-470 모델 및 덕트 19A 모델의 주요 체원[7]을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 이에 대한 도면을 Fig. 1에 보였다. 프로펠러 날개 직경은 $D = 0.3$ m이며, 덕트의 길이는 0.5D로 설정하였다. 프로펠러 및 덕트의 3차원 형상 모델링은 상용 CAD S/W인 CATIA V5를 사용하였다.

Table 1 Geometry data of the propeller Ka-470 model

r/R	c/D	$skew$	$rake$	P/D	t/c
0.2	0.231	0.0012	0	1.0	0.173
0.3	0.264	0.007	0	1.0	0.133
0.4	0.294	0.004	0	1.0	0.102
0.5	0.320	0.002	0	1.0	0.077
0.6	0.345	0.003	0	1.0	0.055
0.7	0.365	0	0	1.0	0.038
0.8	0.379	0	0	1.0	0.024
0.9	0.388	0	0	1.0	0.016
1.0	0.389	0	0	1.0	0.013

Table 2 Geometry data of the duct 19A model

x/L	0	0.0125	0.025	0.050	0.100	0.150	0.200
y/L	0.1825	0.1466	0.1280	0.1087	0.0634	0.0387	0.0217
y_o/L	—	0.2072	0.2107	0.2080	straight line		
x/L	0.30	0.40 ~ 0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	
y/L	0.0048	0.0000	0.0029	0.0082	0.0145	0.0236	
y_o/L	straight line						—

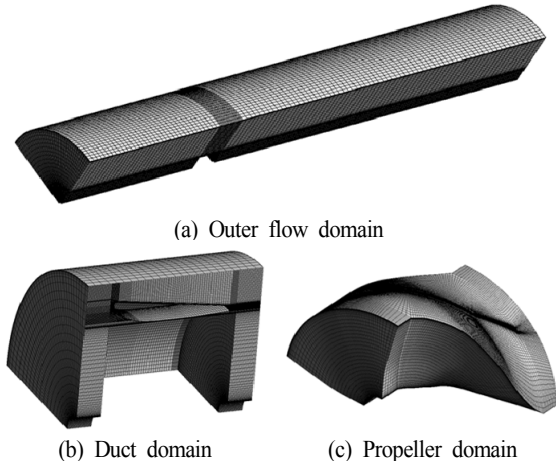


Fig. 2 Three components of the computational domain

2.2 수치격자 시스템

본 연구에서는 보다 효율적인 수치 격자 생성을 위하여 Fig. 2에 보인 것과 같이 전 계산 영역을 크게 프로펠러 영역, 덕트 영역 및 그 외의 바깥 유동장 영역 등 세 개의 영역으로 분리하여 구성하였으며, 프로펠러 영역은 Turbo-Grid S/W, 덕트 영역과 바깥 유동장 영역은 ICEM-CFD 격자 생성 S/W를 사용하여 전 영역에 걸쳐 육면체 격자(hexahedral element)를 생성하였다. 육면체 격자는 사면체 격자(tetrahedral element)에 비해 동일한 수의 요소(element) 수 대비 약 2배의 노드수를 가지며, 상대적으로 빠른 수렴과 높은 정확도를 가진다. 본 해석에서 사용된 각 영역의 격자수를 Table 3에 나타냈다. 특히 프로펠러 영역 수치 격자의 경우, 덕트를 제외한 단독 프로펠러에 대하여 격자수에 따른 추진 성능 해석 결과를 비교 분석한 후, 격자계에 독립적인 수렴해를 갖는 격자수를 기반으로 결정하였다.

Fig. 3는 생성된 프로펠러 날개면과 덕트면 위의 표면 격자 시스템을 보여 주고 있으며, Fig. 4와 Fig. 5에서는 프로펠러에 대한 보다 자세한 격자구성을 보여주기 위해 날개끝의 뒷전(trailing edge) 및 허브(hub)에서의 날개 앞전(leading edge)과 뒷전의 격자를 확대해 나타내었다. Fig. 5(a),(b)에 나타난 것처럼 날개 형상의 보다 정확한 표현을 위하여 날개 주위로는 O-type의 격자시스템을 구성하였다.

Table 3 The number of element for computational domains

Domain	Number of element
Propeller	739,600
Duct	541,700
Outer flow	360,400
Total	1,641,700

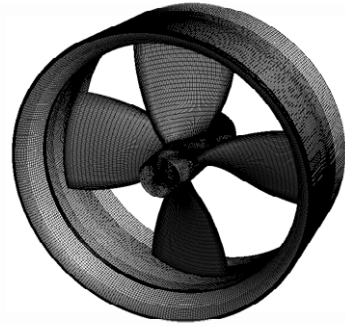


Fig. 3 Overview of surface mesh on the propeller and the duct

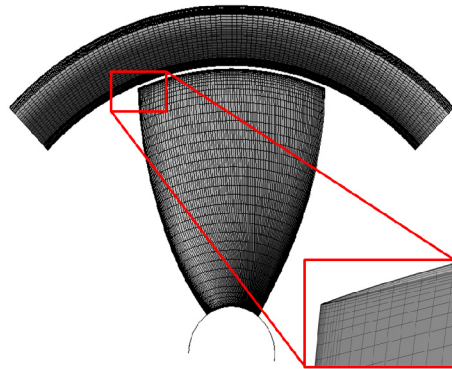
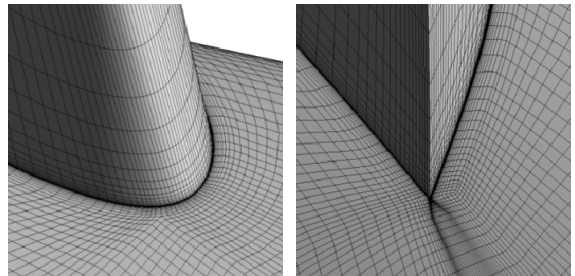


Fig. 4 Propeller surface mesh with an enlarged view of trailing edge at the blade tip



(a) Leading edge (b) Trailing edge

Fig. 5 Computational mesh at the hub surface

2.3 수치해석 방법

지배방정식으로는 3차원 비압축성 레이놀즈 평균 나비에-스톡스(RANS) 방정식을 적용하였으며, 해석 시간 단축 및 계산의 효율화를 위하여 주기적(periodical) 경계 조건을 이용하여 전체 계산 영역의 1/4 모델만 해석하였다. 유동 입구 영역에는 균일한 속도 조건, 출구에는 정압 조건을 적용하였으며, 덕트와 프로펠러 표면에서는 No-Slip 경계조건을 적용하였다.

난류 모델로는 SST(shear stress transport) 모델을 적용하였

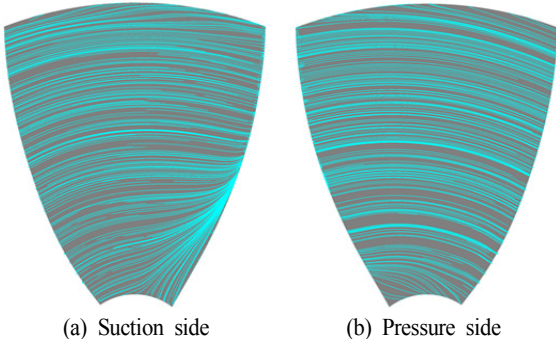


Fig. 6 Streamlines on blade surface of ducted propeller(J=0.3)

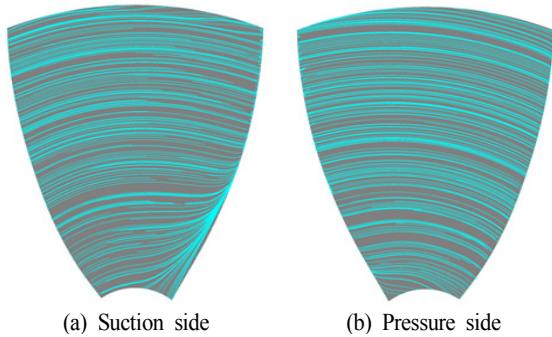


Fig. 7 Streamlines on blade surface of ducted propeller(J=0.7)

다. SST 난류 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델을 병합한 형태로 두 모델의 장점을 모두 가지며, 일반적으로 유동 박리 현상 예측에도 우수한 것으로 알려져 있다[8]. 프로펠러는 회전체이기 때문에 프로펠러 영역에는 회전(rotation) 조건과 그 외의 영역에는 고정(stationary) 조건을 설정하였다. 회전영역과 고정영역이 접하는 면에는 ANSYS-CFX의 Frozen Rotor 기법을 적용하였으며, 이러한 Frozen Rotor 기법은 MRF(moving reference frame) 기반의 회전영역의 회전 좌표계와 고정영역의 기존 좌표계를 연결해주는 준정상상태(quasi-steady) 해석 기법으로 정상상태 성능 해석을 위하여 효율적인 기법이다. 본 계산에 앞서 이러한 Frozen Rotor 기법에 의한 정상상태 해석 결과를 Sliding Mesh 기법을 적용하여 얻은 비정상 해석 결과와 비교 검증하였으며, Sliding Mesh 기법의 1회전 동안의 시간 평균값과 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 날개면 유선 및 압력분포

Fig. 6와 Fig. 7은 각각 전진비 $J = 0.3$ 과 $J = 0.7$ 에서 날개 흡입면 및 압력면에서의 한계유선(limiting streamline)을 보여

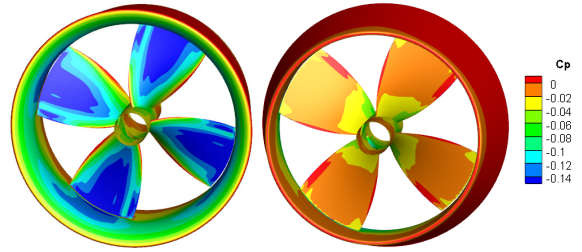


Fig. 8 Pressure contours on blade surface of ducted propeller (J=0.3)

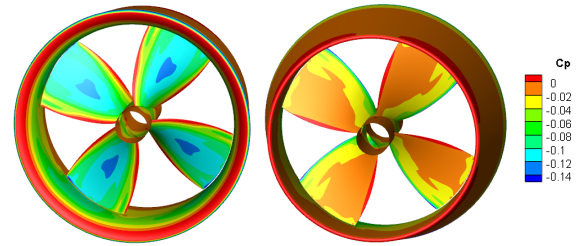


Fig. 9 Pressure contours on blade surface of ducted propeller (J=0.7)

주고 있으며, Fig. 8과 Fig. 9은 대응하는 동일한 조건에서 날개 표면의 무차원화된 압력 계수 분포를 나타내고 있다. 무차원화된 압력 계수는 다음 식으로 정의된다.

$$C_p = \frac{p - p_{inlet}}{\frac{1}{2} \rho [V^2 + (r\omega)^2]} \quad (1)$$

두 전진비 조건에서 앞전(leading edge) 유동 박리현상이 발생하지 않고 날개 표면을 따라 흘러 나가는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 것처럼 $J = 0.3$ 인 전진비 조건에서 $J = 0.7$ 인 경우에 비해 흡입면에서 압력 강하가 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 여러 반경 위치(r/R)에서의 압력분포를 나타낸 Fig. 10과 Fig. 11에서 보다 분명히 확인할 수 있으며, 특히 $J = 0.3$ 의 경우 흡입면에서 앞전(leading edge)부터 뒷전(trailing edge)까지 상대적으로 균일한 압력분포를 가짐을 알 수 있다. 이것은 덕트와의 상호작용으로 인하여 프로펠러 유입 유동이 가속되어 받음각(angle of attack)이 작아짐으로써 추력 부하가 상대적으로 균일하게 분포되기 때문으로 보인다.

Fig. 12는 덕트 내부면의 압력 분포를 표면 패널법[1]의 결과와 비교하였다. 그림에 표시된 점선은 날개면 위치를 나타내며, 좌측은 프로펠러 흡입면, 우측은 압력면이 된다. 프로펠러 날개의 위치를 기준으로 덕트 내부면 압력의 급격한 변화

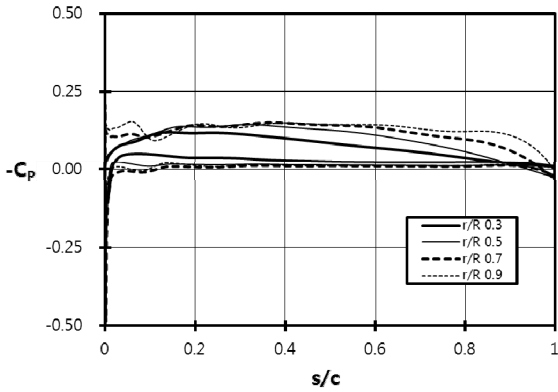


Fig. 10 Pressure coefficient at various radial positions(J=0.3)

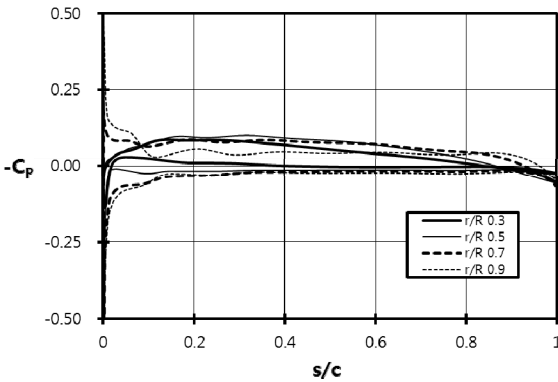


Fig. 11 Pressure coefficient at various radial positions(J=0.7)

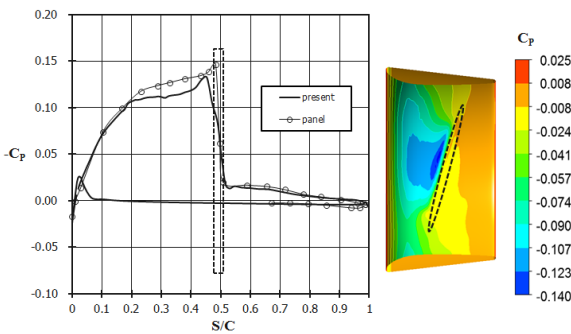


Fig. 12 Comparison of pressure distribution on the inner surface of duct between CFD and panel method(J=0.5)

를 볼 수 있으며, 전체적으로 표면 패널법 결과와 유사한 결과를 보였다.

3.2 프로펠러 추진 성능 해석

Fig. 13에서는 본 연구에서 적용한 덕트 프로펠러의 추진

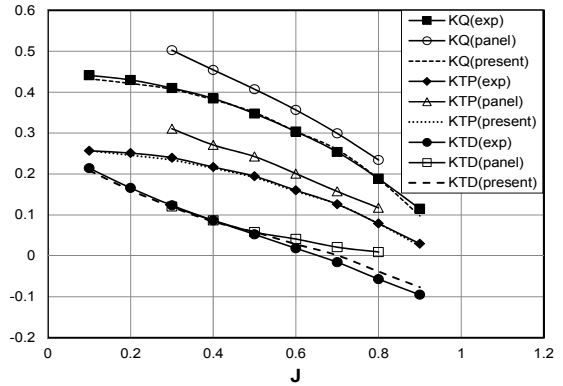


Fig. 13 Performance curves of the ducted propeller

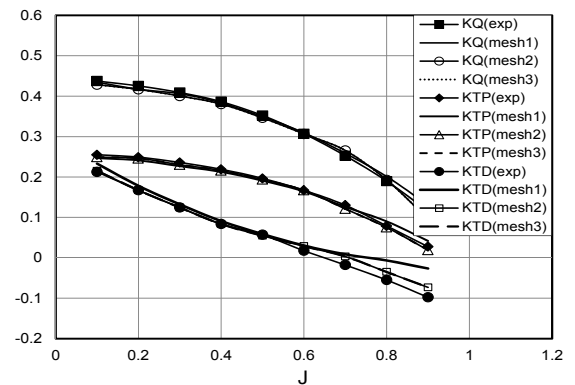


Fig. 14 Effect of mesh density within clearance between blade tip and duct on propulsion performance

성능 해석 결과를 보면 패널법 및 실험값[2]과 비교하였다. 덕트 프로펠러의 경우, 덕트에 의한 경계층 유동이 프로펠러 추진 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 표면 패널법의 경우는 비점성 유동을 가정하였기 때문에 덕트에 의한 경계층 유동 상호 작용의 영향이 고려되지 못하여 추진 성능의 정확한 예측이 어려우며, 특히 전진비가 높을 때 표면 패널법에 의한 덕트 추력 계수가 실험값과 큰 차이를 보이나, 본 CFD 해석 결과는 실험값과 상대적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14은 Table 4에 보여진 바와 같이 추진성능 예측 값에 대한 날개끝과 덕트 사이 간극에서의 격자수의 영향을 조사하였다. 낮은 전진비(J = 0.1 ~ 0.3) 영역에서는 간극 격자수와

Table 4 Various number of mesh between blade tip and duct

Mesh type	Number of element layer	Average y^+
Mesh1	8	103.4
Mesh2	25	1.4
Mesh3	40	0.7

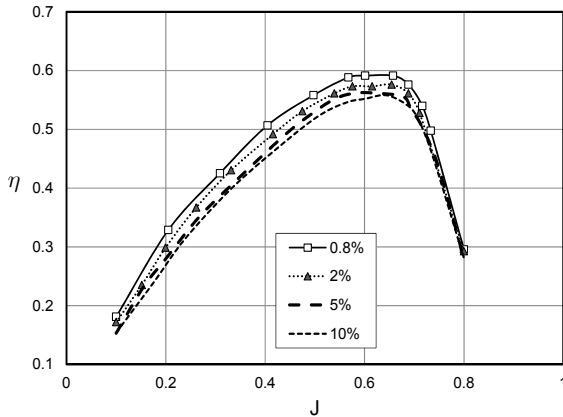


Fig. 15 Comparisons of thrust efficiency at different gap sizes

관계없이 실험값[2]과 잘 일치하였으나, 상대적으로 높은 전진비에서는 mesh1과 같은 coarse 격자 구성의 경우 추력 계수가 실험값과 차이를 보였다. 이 경우 덕트 표면에서의 y^+ 값이 Table 4에 보인 것과 같이 각각 $y^+ = 103, 1.4, 0.7$ ($J = 1.0$ 기준)을 가지며, 덕트 간극 주위에서의 유동장 해석에 있어 y^+ 값이 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 덕트 간극 크기에 따른 추진 성능 해석

Fig. 15은 날개끝과 덕트 사이의 간극의 크기에 따른 덕트 프로펠러의 추진 효율 곡선을 보여준다. 수치 격자는 Mesh2 type으로 고정하고, 프로펠러 반경의 $t/R = 0.8\%$, 2% , 5% 및 10% 의 덕트 간극의 크기를 갖는 모델에 대한 해석을 수행하였으며, 간극 크기의 증가에 따라 추진 효율이 감소하는 것을 볼 수 있다. $t/R = 0.8\%$ 와 10% 간극을 고려한 경우, 최대 효율값이 약 4% 정도 차이를 보였다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 상용 CFD S/W인 ANSYS-CFX를 이용한 덕트 프로펠러의 추진 성능 예측 결과가 실험값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 특히 비설계점(off-design condition)에서도 표면 패널법에 비해 상대적으로 우수한 결과

를 얻을 수 있었다.

또한 덕트 경계층 영향으로 인하여 덕트와 프로펠러 날개 끝 사이 간극에서의 수치격자 구성이 추진 성능 예측 결과에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었으며, 정확도 향상을 위하여 덕트 경계층 영역에 충분히 높은 밀도($y^+ < 1$)의 격자시스템 구성이 중요함을 알 수 있었다.

References

- [1] 2007, Lee, C.S., Seo, J.C., Hyun, B.S., Kim, M.C. and Moon, I.S., "Ship Propulsion and Propeller Design," *Moon-Woon Dang*, pp.264-267.
- [2] 2009, Baltazar, J. and Falcao de Campos, J.A.C., "On the Modeling of the Flow in Ducted Propellers with a Panel Method," *International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- [3] 2012, Baltazar, J., Falcao de Campos, J.A.C. and Bosschers, J., "Open-Water Thrust and Torque Predictions of a Ducted Propeller System a Panel Method," *International Journal of Rotating Machinery*, Vol.2012, ID474785.
- [4] 2009, Stefano, G., Luca, S. and Stefano, B., "Comparison of Experimental Measurements and Numerical Calculations for a Propeller in Axial Cylinder," *International Symposium on Marine Propulsors*, Trondheim, Norway.
- [5] 2004, Yoo, H.R., Jeong, Y.L. and Park, W.K., "Numerical Flow Analysis of Ducted Marine Propeller with Pre-Swirl Guidevane," (*in Korean*)*Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.9, No.2, pp.62-69.
- [6] 2014, Joung, T.H., Jeong, S.J. and Lee, S.K., "CFD Simulations and Experimental Tests for Three Different Ducted Propellers," (*in Korean*)*Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol.28, No.3, pp.199-208.
- [7] 2012, Carlton, J., "Marine Propellers and Propulsion," *3rd Edition*, Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- [8] 1994, Menter, F.R., "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," *AIAA Journal*, Vol.32, No.8, pp.1598-1605.