



CFD 기반 덕트 프로펠러 단독성능의 스케일 효과 분석

김정재·김지혜[†]

국립창원대학교 스마트조선모빌리티공학과

CFD-based Analysis of Scale Effects on the Open-Water Performance of Ducted Propellers

Jeongjae Kim·Ji-Hye Kim[†]

Department of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University

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 study investigates the scale effects on the open-water performance of a ducted propeller through RANS-based numerical simulations using the commercial CFD software STAR-CCM+. The simulations were conducted for both model- and full-scale conditions to analyze how scale influences hydrodynamic characteristics, particularly in the presence of a duct structure. The numerical results were validated against open-water test data obtained from experiments conducted by the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), ensuring the credibility of the computational setup. To evaluate the effect of local flow interactions between the duct and the propeller blades, two rotational modeling approaches—Multiple Reference Frame (MRF) and Sliding Mesh—were applied and comparatively analyzed. The study also provides detailed comparisons of pressure distribution, wake flow, and performance coefficients between the two scales, identifying the primary contributors to scale-induced variations. The findings offer practical insights for the accurate prediction of full-scale ducted propeller performance based on model-scale analysis.

Keywords : Ducted propeller(덕트 프로펠러), Scale effect(스케일 효과), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Propeller open water performance(프로펠러 단독성능)

1. 서론

1.1 연구 배경 및 필요성

덕트 프로펠러(Ducted Propeller)는 프로펠러 효율 향상, 소음 저감, 프로펠러 날개 보호 등의 목적으로 유·무인 잠수정과 같은 수중 운동체 등에 사용되고 있다(Lee et al., 2007). 덕트 프로펠러는 일반적인 개방형 프로펠러와 다르게 프로펠러 날개 이외의 덕트 자체의 추력을 포함하고 있어 프로펠러와 덕트의 추력을 분리하여 측정하기 위한 프로펠러 단독성능시험이 수조에서 이루어지기 쉽지 않고(Joung et al., 2014), 모형시험과 실선 간의 레이놀즈 수에 의한 프로펠러 성능 특성 차이가 명확히 규정되어 있지 않다(ITTC, 2024). 따라서 덕트 프로펠러의 단독성능을 확인하기 위한 모형시험뿐만 아니라 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)에 의한 모사를 통해 실제 스케일의 성능을 추정할 필요가 있으며, 이를 바탕으로 모형시험과 실선의 레이놀즈 수 차이에 의한 프로펠러 성능 특성 차이를 스케일링하여

상관관계를 규명할 필요가 있다.

덕트 프로펠러의 스케일 효과에 대한 연구로 Abdel-Maksoud and Heinke (2002)는 CFD 모사를 통하여 덕트 프로펠러의 레이놀즈 수 효과에 의한 프로펠러 단독성능을 조사하였다. Bhattacharyya et al. (2016a)은 덕트의 설계에 따라 스케일 효과가 다르게 나타나 기존 개방형 프로펠러 스케일링 방법론으로 보정이 어려움을 지적하였으며, Bhattacharyya et al. (2016b)은 덕트 프로펠러의 스케일 접근 방식과 스케일 효과를 체계적으로 조사하고, CFD를 이용한 새로운 스케일링 방법론을 제안하며 기존 개방형 프로펠러 스케일 기법과 차별화가 필요하다고 주장하였다. 앞선 덕트 프로펠러의 스케일 효과에 관한 연구들은 공통적으로 모형스케일에서는 덕트 내부의 유속이 과소평가 되는 경향이 있으며, 실스케일 조건에서는 덕트 내부의 유속이 증가하여 덕트의 추력이 증가하지만 프로펠러 날개의 추력 및 토크는 감소하는 경향이 관찰된다고 보고되었다.

본 연구에서는 CFD를 활용하여 덕트 프로펠러의 모형 및 실스케일 조건의 레이놀즈 수 차이에 의한 단독성능 비교를 목표로

하였다. 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KRISO)에서 수행한 모형시험 결과와 상용 유동 해석 프로그램인 STAR-CCM+(v13.06.012)를 사용한 CFD 시뮬레이션 결과를 비교하여 CFD 모델의 신뢰성을 검증하였다. 또한 프로펠러 회전을 모사하기 위해 MRF(Moving Reference Frame) 기법과 Sliding Mesh(S.M) 기법을 적용하여 두 가지 기법 간의 유동 모사 정도를 비교하였다. 각 수치해석 결과에서 덕트와 프로펠러 날개에 작용하는 추력 및 토크를 성분별로 분리하여 모형과 실스케일 프로펠러의 차이를 확인하였으며, 반경 별 프로펠러 날개와 덕트 단면의 압력분포를 살펴봄으로써 모형과 실선 스케일 프로펠러의 유동 특성을 면밀히 비교하고자 하였다.

2. 수치해석 기법

2.1 지배방정식

본 연구에서는 해석 영역 내의 난류 유동을 모사하기 위하여 식 (1), (2)와 같이 연속방정식(continuity equation)과 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다.

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

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

여기서 $U_i = (U, V, W)$ 는 속도이고, μ 는 유체의 점성계수, p 는 정압을 의미한다. 또한 $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 는 Reynolds stress 항이며 난류로 인한 운동량 교환 효과를 나타낸다. 이를 해석하기 위한 난류 모델은 SST K- Ω 난류 모델을 적용하였으며 프로펠러와 덕트 주변의 유동을 상세히 모사하기 위하여 $y^+ \approx 1$ 수준의 벽함수를 적용하였다.

Table 1 Principal dimensions of reference propeller

	Full scale	Model scale
Number of Blade (Z)	3	
max. Duct Diameter	0.4055m	0.2534m
Propeller Diameter (D)	0.3049m	0.1906m
Expanded Area Ratio	0.405	
Scale Ratio	1.6	
Hub Ratio	0.367	
Pitch Ratio at 0.7R	1.3573	
Reynolds number	1.5~1.7E+06	6.0~6.5E+05
Material	Aluminum	

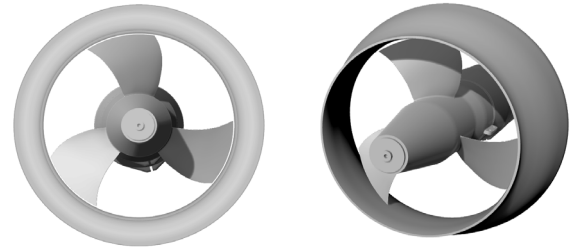


Fig. 1 Geometry of the reference propeller and duct

2.2 대상 프로펠러

본 연구에서 CFD 해석과 모형시험을 수행한 대상 프로펠러는 선진사(Tecnadyne)에서 설계된 덕트 프로펠러이며, 제원과 형상은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 경계 조건 및 격자계

덕트 프로펠러 단독성능 해석을 위한 해석 영역은 Fig. 2와 같이 Cylinder 형태로 구성하였다. 프로펠러 기준으로 상류 방향으로 5D, 하류 방향으로 55D이며, 해석 반경은 5D이다. 여기서 D는 각 스케일의 프로펠러 직경이다. 경계조건은 유입 유동은 Velocity inlet, 유출 유동은 Pressure outlet, 원통 부분의 경계는 Symmetry, 프로펠러 날개 및 덕트 표면은 No-Slip 조건의 Wall로 설정하였다.

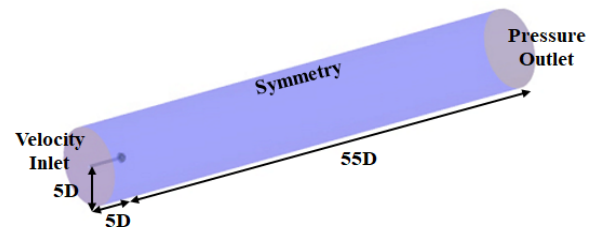


Fig. 2 Numerical domain and boundary condition

격자 생성은 비정렬 Polyhedral 격자계를 사용하였으며 프로펠러와 덕트의 경계층 내부 유동의 모사의 정확도를 높이기 위하여 프로펠러와 덕트, 핀에 10개의 Prism layer를 생성하였다. 프로펠러의 표면과 해석 영역의 격자는 Fig. 3, Fig. 4와 같다.

3. 해석 수행 및 검증

앞서 설정한 해석영역과 경계조건 및 격자계를 바탕으로 정상 상태(steady state)의 회전영역기법(MRF)과 비정상상태(unsteady state)의 Sliding Mesh 기법을 적용하여 유동을 모사하였다. 프로펠러 단독성능을 대표하는 물리량은 프로펠러의 추력(T), 토크(Q)이며, 이를 통해 식 (3)~(6)와 같이 전진비(J), 추력계수(K_T), 토크계수(K_Q), 프로펠러 단독효율(η_p)을 각각 구할 수 있다. 본 연구

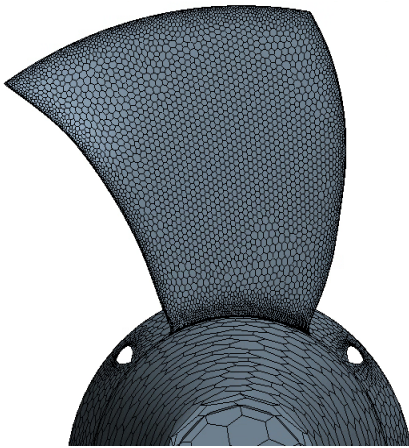


Fig. 3 Grid system of propeller blade and hub

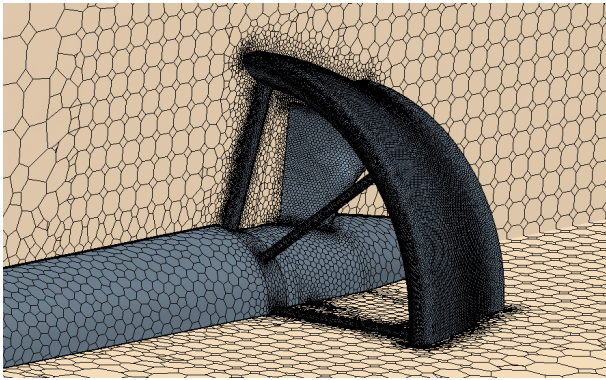


Fig. 4 Grid system around the ducted propeller

에서 덕트 프로펠러의 단독성능은 회전수는 20rps로 고정하고 Bollard Pull Condition에 가장 근접한 전진비 $J=0.028$ 부터 0.9까지 유입 유속을 변화시키며 계산을 수행하였다.

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (3)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (4)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (6)$$

여기서 V_A 는 유입속도(m/s), n 은 프로펠러 회전수(rps), ρ 는 유체의 밀도(kg/m³)이다. 본 연구에서는 프로펠러 날개에 작용하는 추력 성분(T_P) 이외에도 덕트에 작용하는 추력 성분(T_D)이 존재하므로, 프로펠러 날개와 덕트의 추력계수 K_{TP} , K_{TD} 또한 식 (7), (8)과 같이 정리하여 나타내었다.

$$K_{TP} = \frac{T_P}{\rho n^2 D^4} \quad (7)$$

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

3.1 MRF 기법 적용 결과

3.1.1 MRF 기법 해석

MRF 기법은 프로펠러의 회전을 직접 모사하는 대신, 회전영역의 유체를 프로펠러의 회전방향과 반대로 회전시키는 기법으로, Sliding Mesh 기법에 비하여 적은 계산 비용으로 결과를 도출해 낼 수 있다는 장점이 있다.

전진비가 0.028부터 0.9의 조건에서 모형과 실스케일의 덕트 프로펠러에 대해 MRF 기법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 먼저 MRF 기법을 적용한 모형스케일 계산과 모형시험이 잘 일치함을 확인하였으며(Table 2), 이를 바탕으로 CFD 기반 실스케일 계산과 모형스케일 계산을 모형시험 결과와 함께 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 스케일에 따른 단독성능 차이가 크지 않음은 축

Table 2 Comparison of relative error of POW characteristics of MRF method and KRISO experiment

J	K_T (%)	$10K_Q$ (%)	η_0 (%)
0.028	-1.12	0.64	-3.41
0.100	-1.43	1.23	-2.66
0.300	-1.13	1.03	-2.19
0.500	0.63	0.84	-0.22
0.700	0.88	1.92	-1.05
0.900	3.92	4.42	-0.55

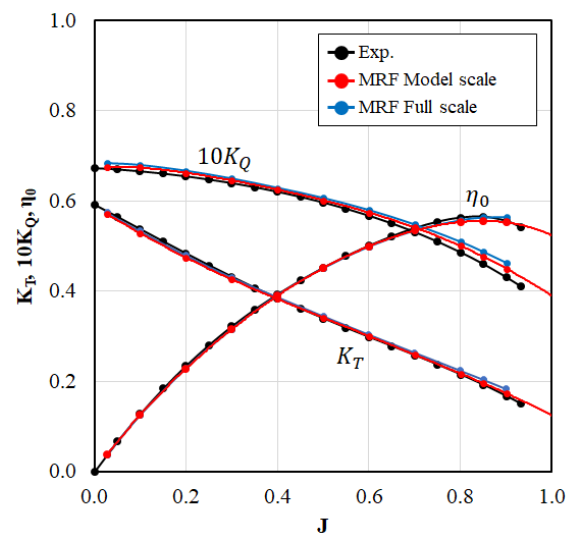


Fig. 5 POW characteristics predicted using MRF method

Table 3 Numerical result of POW using MRF method

J	Full scale			Model scale		
	K_T	$10K_Q$	η_0	K_T	$10K_Q$	η_0
0.028	0.574	0.683	0.037	0.570	0.676	0.038
0.100	0.533	0.679	0.125	0.529	0.674	0.125
0.300	0.430	0.649	0.316	0.426	0.646	0.315
0.500	0.344	0.606	0.452	0.341	0.602	0.451
0.700	0.263	0.547	0.536	0.259	0.541	0.534
0.900	0.183	0.463	0.565	0.174	0.450	0.553

적비 자체가 크지 않기 때문으로 판단되며, 추력의 경우 덕트 핀에 작용하는 추력은 프로펠러 날개와 덕트에 비해 매우 작으므로 포함하지 않았다.

3.1.2 모형-실스케일 비교 분석(토크)

토크의 경우 프로펠러 날개에만 작용하며, Table 3의 결과를 바탕으로 실프로펠러가 모형스케일 프로펠러보다 더 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 모형스케일에서 프로펠러 날개의 토크가 큰 값을 가지는 선행연구와 반대의 경향을 보이고 있으며, 이를 자세히 확인하기 위하여 토크의 압력성분과 마찰성분을 분

리하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 결과를 보았을 때 토크의 압력성분은 실스케일이 모형스케일과 유사하지만 큰 값을 가지고, 토크의 마찰성분은 모형스케일이 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

3.1.3 모형-실스케일 비교 분석(추력)

서론에서 언급된 선행 연구들은 공통적으로 실스케일의 덕트에 작용하는 추력이 큰 값을 가짐을 확인하였다. 이는 실스케일에서 경계층의 두께가 얇기 때문에 덕트 내부의 유동 이탈이 줄어들어 추력이 증가한 것으로 판단된다.

다만 본 연구에서는 축적비가 1.6으로 매우 작기 때문에 덕트에 작용하는 추력 차이는 거의 나타나지 않았으며, 이에 비해 날개에 작용하는 추력 차이는 상대적으로 크게 관찰되었다.

덕트 프로펠러 날개의 경우, 선행연구에서는 모형스케일이 경계층의 두께가 증가하여 프로펠러 날개 끝단과 덕트 사이로 유입되는 유속이 감소하고, 날개 끝단에 작용하는 부하가 증가하면서 추력이 증가한다고 알려져 있다. 하지만 MRF 기법을 적용한 해당 계산 결과에서는 이와 반대의 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 자세한 확인을 위해 토크와 마찬가지로 추력 또한 모형-실스케일의 마찰성분과 압력성분을 분리하여 Fig. 8에 나타내었다.

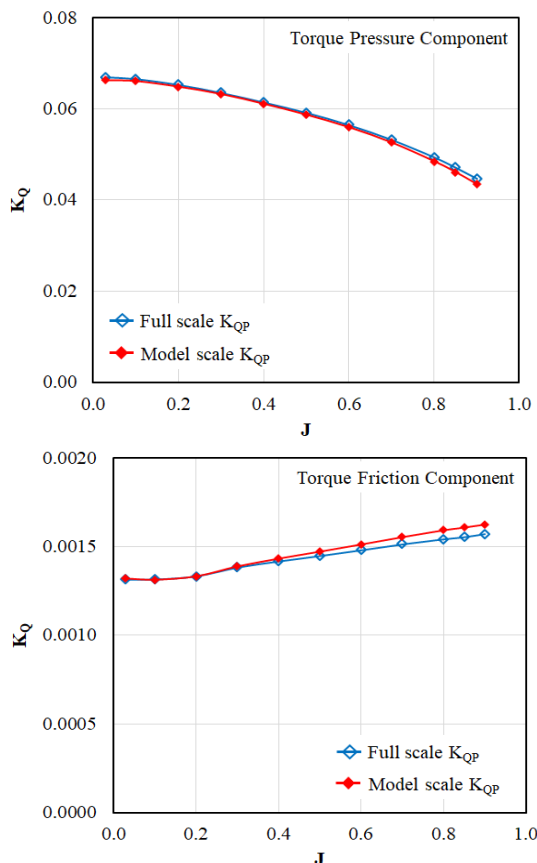


Fig. 6 Pressure and friction component of torque coefficient of propeller blade (MRF)

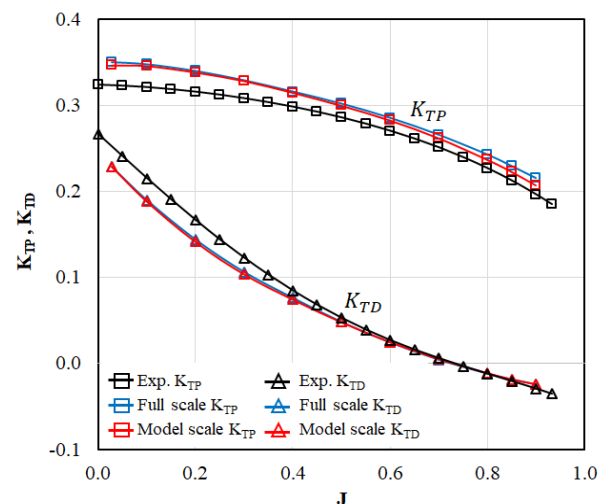


Fig. 7 Thrust coefficient of propeller blade and duct (MRF)

Table 4 Numerical result of thrust coefficient of propeller blade and duct

J	Full scale		Model scale	
	K_{TP}	K_{TD}	K_{TP}	K_{TD}
0.028	0.350	0.229	0.347	0.229
0.100	0.348	0.190	0.346	0.188
0.300	0.329	0.106	0.329	0.104
0.500	0.302	0.048	0.300	0.048
0.700	0.266	0.005	0.262	0.006
0.900	0.215	-0.024	0.208	-0.024

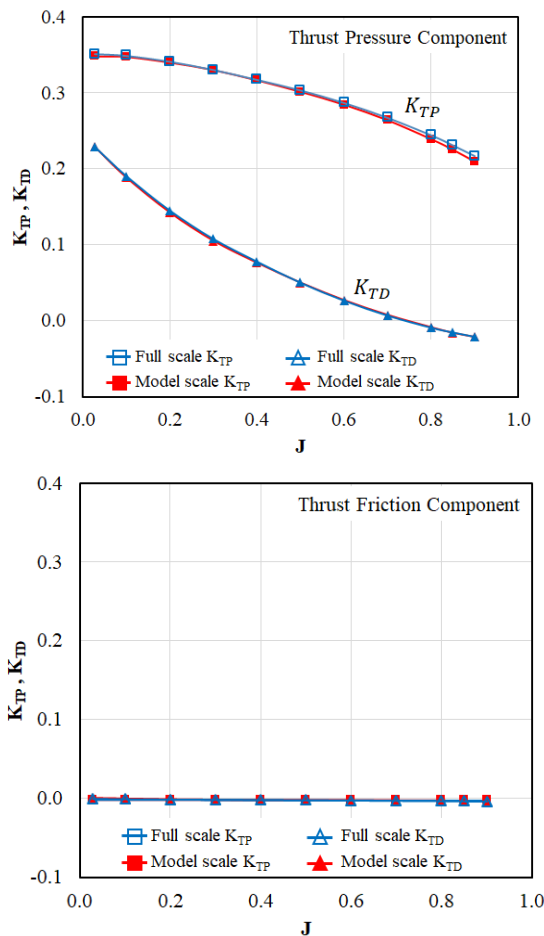


Fig. 8 Pressure and friction component of thrust coefficient of propeller blade (MRF)

추력의 입력성분이 전체 스케일 효과 차이에 지배적인 영향을 가지며, 마찰성분은 전체 추력 관점에서는 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

위와 같은 해석 결과를 바탕으로 MRF 기법이 덕트와 날개 간극 유동을 충분히 모사하지 못하고 있으므로, Sliding Mesh 기법을 적용하는 추가적인 검토가 필요하다고 판단하였다.

3.2 Sliding Mesh 기법 적용 결과

Sliding Mesh 기법은 프로펠러를 이루는 격자를 직접 회전시켜 실제 프로펠러 회전 거동을 모사하는 기법이다. MRF 기법에 비해 많은 계산 비용이 소모되지만, 실제 회전 거동을 모사하기 때문에보다 정확한 모사 결과를 기대할 수 있다. 총 7회전에 대한 해석을 수행하였으며, 수렴된 결과 중 마지막 2회전에 대한 평균값을 대표값으로 사용하였다.

3.2.1 Degree-Time step Test

Sliding Mesh 기법은 한 번의 Time Step 당 회전하는 프로펠러의 각도(deg/time step)에 따라 수치해석의 수렴도가 달라지므

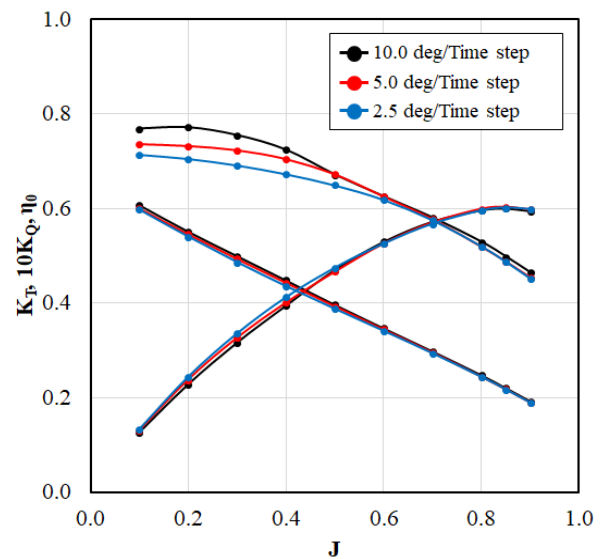


Fig. 9 POW characteristics of time step test result using Sliding mesh method

Table 5 Relative error(%) of thrust coefficient and torque coefficient of time step tests

J	5 deg/time step		10 deg/time step	
	K_T	$10K_Q$	K_T	$10K_Q$
0.028	-0.42	-2.70	-1.26	-8.02
0.100	-0.61	-2.99	-1.75	-7.65
0.300	-1.59	-4.50	-2.83	-9.16
0.500	-1.65	-3.51	-2.47	-3.44
0.700	-1.00	-0.41	-1.85	-0.93
0.900	-0.68	-0.75	-2.24	-2.86

로, Time Step 당 2.5°, 5.0°, 10.0°에 대해 모형스케일 프로펠러의 단독성능 수치해석을 수행하였다(Fig. 9).

Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 deg/Time step이 작아질수록 낮은 전진비 J에서의 추력계수와 토크계수가 작아지며 KRISO 모형시험 및 MRF 해석 결과와 유사한 수준으로 수렴하는 것을 확인하였다. 또한 J=0.6부터 프로펠러의 최대효율이 위치한 J=0.85, 이후 J=0.9까지 5.0°와 2.5°는 약 1% 내의 오차를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 계산 비용의 절감을 위하여 합리적인 수준으로 판단되는 5.0 deg/Time step으로 이후 계산을 수행하였다.

3.2.2 Sliding Mesh 기법 해석

Sliding Mesh 기법 해석은 전진비 J=0.028~0.9 조건에서 유입속도를 변화시키며 계산을 수행하였다. 도출한 단독성능 결과를 모형시험 결과와 비교하여 Fig. 10과 Table 6에 정리하였다.

여기서 MRF 기법에 비해 Sliding mesh 기법을 적용한 수치해석 결과와 모형시험 결과에 차이가 크게 발생하는 것을 확인하였다.

이는 해당 모형시험 조건이 완전한 난류 영역이 아닌 천이 구

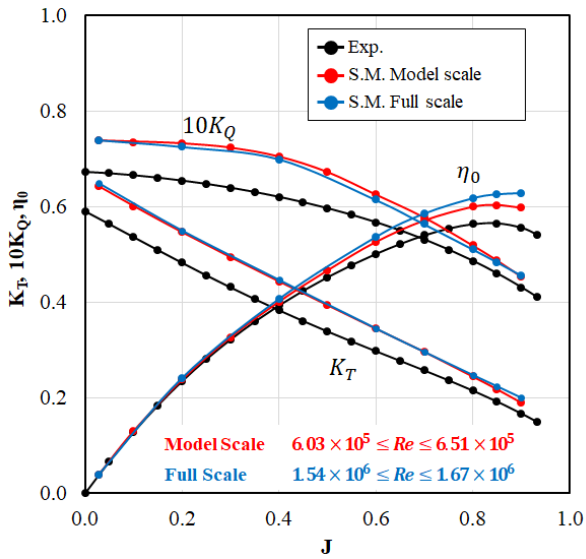


Fig. 10 POW characteristics predicted using sliding mesh method

Table 6 Numerical result of POW predicted using sliding mesh method

J	Full scale			Model scale		
	K_T	$10K_Q$	η_0	K_T	$10K_Q$	η_0
0.028	0.649	0.739	0.039	0.642	0.738	0.039
0.200	0.550	0.725	0.241	0.546	0.732	0.238
0.400	0.446	0.699	0.406	0.443	0.704	0.401
0.600	0.345	0.614	0.536	0.344	0.625	0.526
0.700	0.296	0.563	0.585	0.296	0.577	0.571
0.850	0.224	0.484	0.625	0.218	0.488	0.603
0.900	0.200	0.456	0.628	0.190	0.454	0.598

간에 걸쳐있음에 따른 차이로 보이며, 추후 천이 모델의 적용을 통한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2.3 모형-실스케일 비교 분석(토크)

토크의 압력성분과 마찰성분을 분리하여 Fig. 11에 나타내었다. Table 7의 Sliding Mesh 기법을 적용한 결과는 앞선 MRF 기법을 적용한 결과와 반대로, 일부 전진비 $J=0.028, 0.9$ 를 제외한 구간에서 모형스케일이 실스케일보다 더 큰 값을 가짐을 확인하였다. Fig. 11의 결과를 보았을 때 토크의 압력성분은 일부 전진비를 제외한 대부분의 조건에서 모형스케일이 실스케일보다 큰 값을 가지고, 토크의 마찰성분은 MRF 기법을 적용한 결과와 유사한 경향을 가지며 모형스케일이 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다.

3.2.4 모형-실스케일 비교 분석(추력)

프로펠러 날개와 덕트에 작용하는 추력 성분을 분리하여 Fig. 12과 Table 7에 정리하였다. Fig. 12 및 Table 7의 결과를 살펴

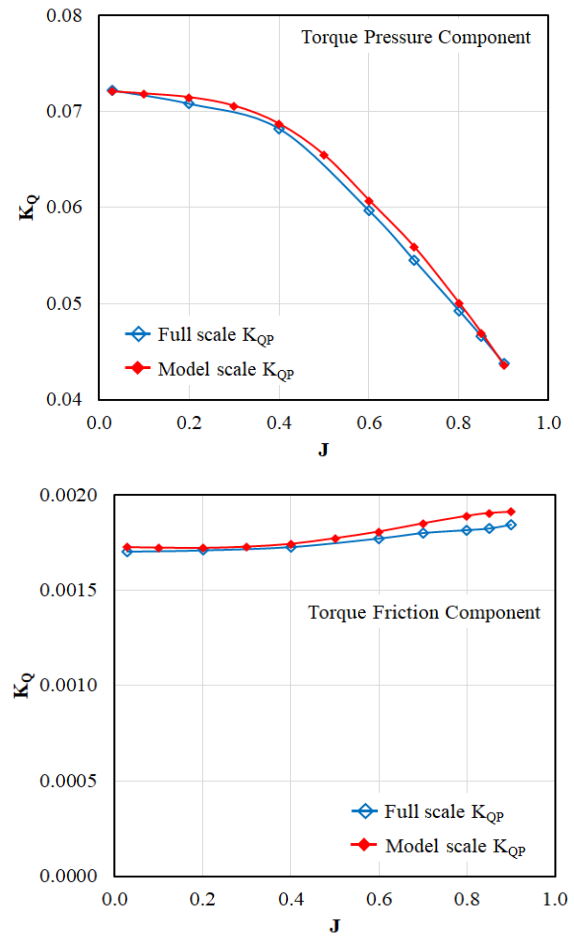


Fig. 11 Pressure and friction component of torque coefficient of propeller blade (Sliding Mesh)

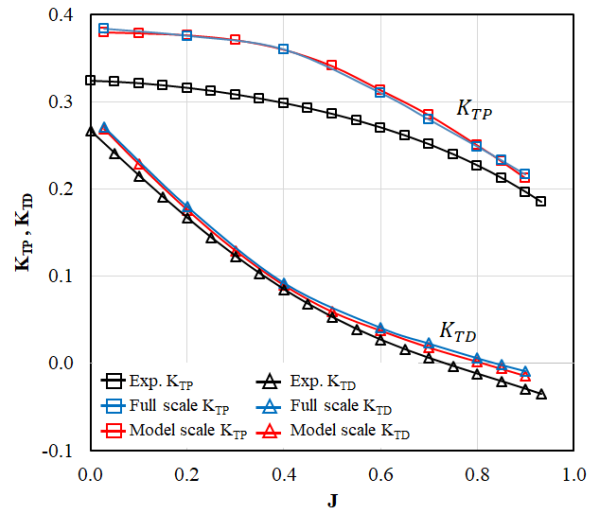


Fig. 12 Thrust coefficient of propeller blade and duct (Sliding Mesh)

보면 덕트에 작용하는 추력은 MRF 기법의 결과보다 실스케일이 모형스케일보다 두드러지는 큰 값을 가진다. 프로펠러 날개의 경우 전진비 $J=0.028, 0.85, 0.9$ 를 제외한 조건에서 실스케일이 모

Table 7 Numerical result of thrust coefficient of propeller blade and duct

J	Full scale		Model scale	
	K_{TP}	K_{TD}	K_{TP}	K_{TD}
0.028	0.384	0.271	0.380	0.269
0.200	0.376	0.180	0.377	0.176
0.400	0.360	0.093	0.360	0.090
0.600	0.310	0.041	0.314	0.038
0.700	0.280	0.023	0.285	0.019
0.850	0.233	-0.001	0.233	-0.006
0.900	0.217	-0.008	0.213	-0.014

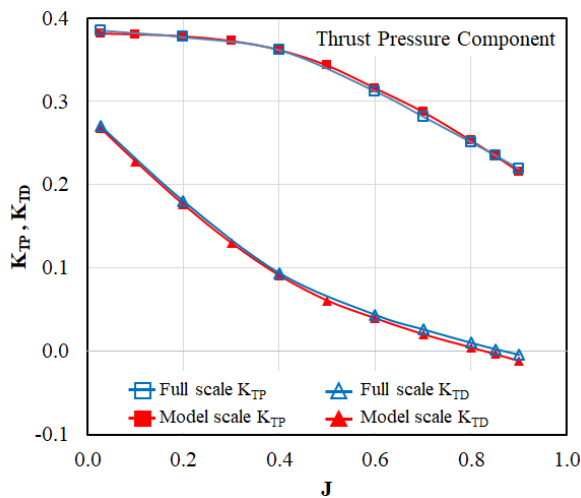


Fig. 13 Pressure component of thrust coefficient of propeller blade (Sliding Mesh)

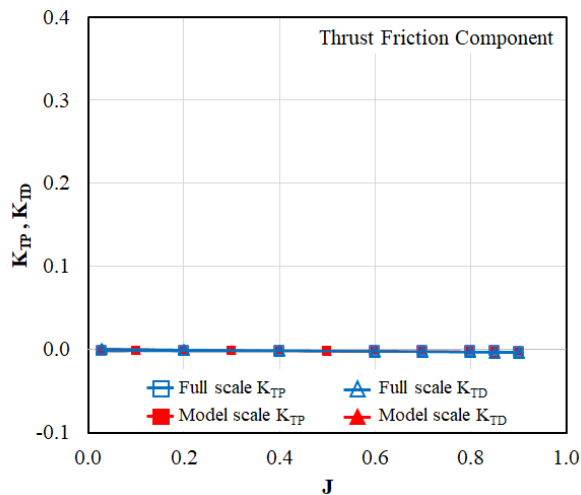


Fig. 14 Friction component of thrust coefficient of propeller blade (Sliding Mesh)

형스케일보다 작거나 같은 값을 가짐을 확인하였으며, 이는 앞선 MRF 기법과 Sliding mesh 기법이 프로펠러 날개와 덕트 사이의

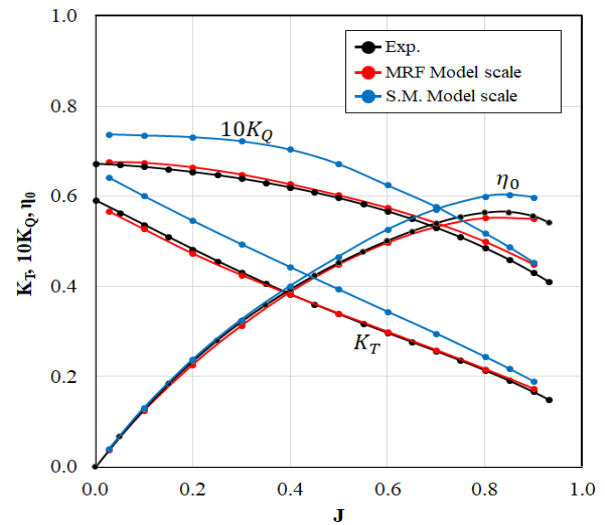


Fig. 15 Comparison of POW characteristics between MRF and sliding mesh method

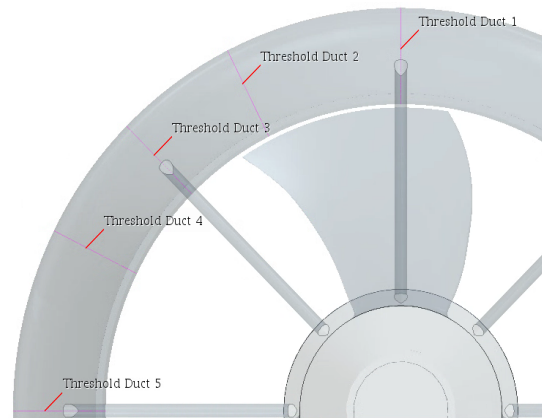


Fig. 16 Duct section position

국부 유동장을 다르게 해석하고 있음을 보여준다. 전체 추력 관점에서 보았을 때 실스케일의 추력이 모형스케일보다 크게 나타나므로, 프로펠러 효율 또한 실스케일이 모형보다 크게 추정됨을 확인할 수 있다.

추력의 압력성분 중, 날개의 추력계수의 값은 실스케일이 모형스케일보다 작거나 일치하는 모습을 보이고 덕트의 추력계수의 값은 실스케일이 모형스케일보다 크며 이는 MRF 기법 결과에 비해 차이가 두드러지게 나타났다. 추력의 마찰성분은 전체 추력 관점에서는 영향이 매우 작음을 확인할 수 있다.

3.3 MRF와 Sliding Mesh 기법의 비교

MRF 기법에 비하여 Sliding Mesh 기법이 낮은 전진비 J에서 KRISO 모형시험 결과와 큰 차이를 보였고 특히 전체 추력 및 토크계수가 MRF 기법에 비해 과도하게 해석되는 경향이 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 15는 MRF 기법과 Sliding mesh 기법의 모형 프로펠러 단독성능을 모형시험 결과와 비교하여 나타내었다.

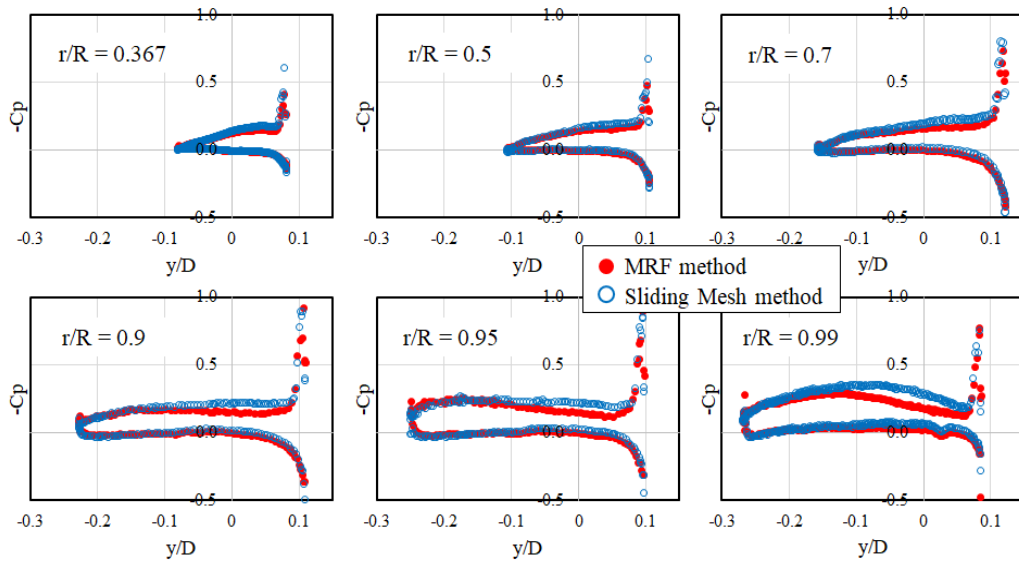


Fig. 17 Pressure coefficient($-C_p$) of various blade section(at $r/R=0.367 \sim r/R=0.99$)

Table 8 Blade & fin present in duct sections

	Blade	Fin
No. 1	O	O
No. 2	O	X
No. 3	X	O
No. 4	X	X
No. 5	X	O

두 기법 간의 해석 방법 차이에서 기인한 과소 및 과대 평가되는 성분을 분석하기 위하여 덕트 및 프로펠러 날개단면 주위 압력 성분을 조사할 필요가 있다.

Fig. 17은 각각 MRF와 Sliding Mesh 방법으로 수행한 전진비 $J=0.7$ 일 때의 Model scale의 날개단면 별 압력계수($-C_p$)를 나타 내었다. 허브에 가까워질수록 두 기법 간의 차이가 크게 보이지 않지만, $r/R=0.7$ 부터 프로펠러 Tip에 가까워질수록 Sliding Mesh 기법을 적용한 경우 흡입면에서의 가속 정도를 더 크게 예측함을 확인할 수 있다. 다음으로 회전 각도별 덕트 날개단면에서의 압력 차이를 확인하기 위하여 Fig. 16와 같이 덕트의 단면을 정의 하고, 각 위치에서의 압력계수와 이에 따른 스칼라 필드를 Fig. 18에 나타내었다. 각 덕트 단면의 날개 및 핀의 포함 여부 특징은 Table 8에 나타내었다.

덕트와 핀의 결합부에 의하여 압력계수 분포가 끊어지는 양상은 Position No. 1, 3, 5에 의하여 두 기법이 일치하게 해석하고 있고, Position No. 1과 2에서 확인할 수 있듯이 프로펠러 날개와 덕트 사이의 유동의 가속 정도가 MRF 기법에 비해 Sliding Mesh 기법이 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 덕트 프로펠러의 단독성능 특성을 좌우하는 날개 끝단과 덕트 사이 간극에서의 유동 해석을 MRF 기법을 적용한 경우 충분히 모사하지 못하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 모형시험 결과를 통해 검증된 수치 해석을 기반으로 MRF 기법과 Sliding Mesh 기법을 이용하여 모형-실스케일 간의 덕트 프로펠러 단독 특성을 파악하고자 하였다. 대상 프로펠러는 선진사(Tecnadyne)에서 제작된 덕트 프로펠러를 사용하여 추력과 토크의 압력 및 마찰성분의 면밀한 분석을 통하여 프로펠러 회전 기법에 기인한 차이를 다음과 같이 비교하였다.

(1) MRF 기법을 적용한 경우, 실제 모형시험과 단독성능 약 4% 이내의 오차로 잘 일치함을 확인하였다. 다만, 프로펠러 날개와 덕트에서 발생하는 추력의 경우, 모형-실스케일 간 해석 결과가 기존 선행 연구의 결과와 반대로 나타났고, 이는 MRF 기법이 날개와 덕트 사이 간극에서 발생하는 유동 특성을 잘 해석하지 못한다고 판단하여 Sliding Mesh 기법을 적용하고 이를 재검토하였다.

(2) Sliding Mesh 기법을 적용한 경우, 덕트 프로펠러의 스케일에 따른 해석 결과가 기존 선행 연구와 유사한 경향을 보임을 확인하였으나, 본 연구의 대상 프로펠러의 축적비가 1.6으로 매우 작아 스케일 효과가 정량적으로 크게 나타나지 않았다.

(3) MRF 기법에 비하여 Sliding Mesh 기법을 사용한 경우, 덕트 내부 국부적인 유동을 상대적으로 잘 모사함을 확인하였다. 다만 모형시험 결과와는 큰 차이를 보이는데, 이는 해당 계산 및 시험 모델의 운용 레이놀즈 범위가 천이 구간을 포함하여 점성과 마찰의 영향을 정도 높게 해석하기에 어려움이 있는 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위해 추후 전이 난류 모델(Transition turbulence model)의 적용을 검토할 필요가 있다.

향후 덕트 단면 형상에 따라 위와 같은 국부 유동 특성이 달라질 수 있음을 감안하여, 선행 연구를 통해 개발된 단면 형상이 다른 설계 프로펠러 (Kim and Kim, 2025)에 대한 수치해석을 수행

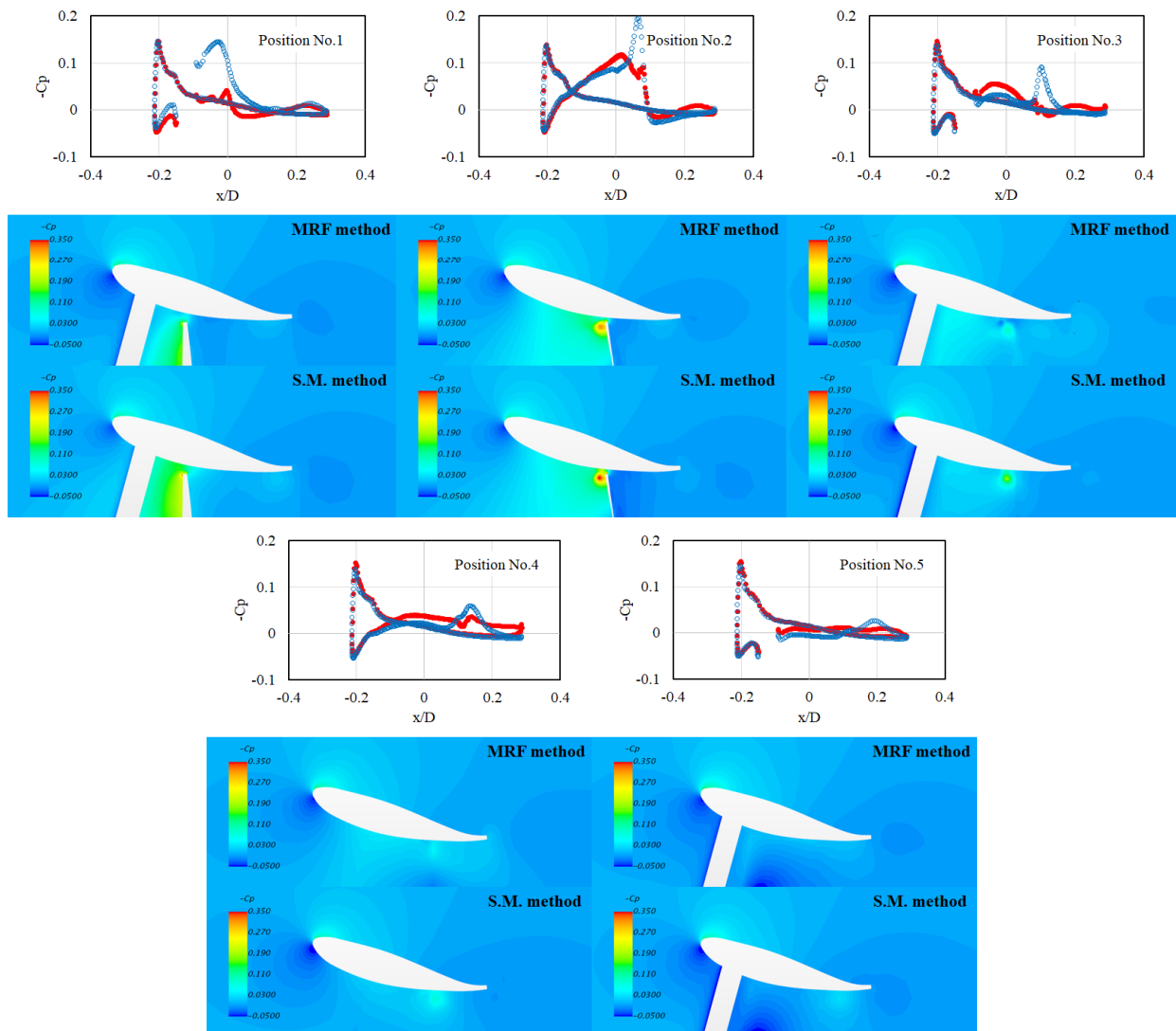


Fig. 18 Pressure coefficient($-C_p$) of duct sections

하고, 본 연구의 결과와 비교를 통해 덕트 프로펠러의 특성을 보다 면밀히 파악하고자 한다.

후 기

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청)의 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업(23-CM-DU-06)과 2025~2026년도 국립창원대학교 자율연구과제에서 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Abdel-Maksoud, M. and Heinke, H. J., 2002. Scale effects on ducted propellers. *In Proceedings of the 24th symposium on naval hydrodynamics*, pp.744–759.
- Bhattacharyya, A., Krasilnikov, V. and Steen, S., 2016a. Scale effects on open water characteristics of a controllable pitch propeller working within different duct designs. *Ocean Engineering*, 112, pp.226–242.
- Bhattacharyya, A., Krasilnikov, V. and Steen, S., 2016b. A CFD-based scaling approach for ducted propellers. *Ocean Engineering*, 123, pp.116–130.
- Grij, C. G., Degiuli, N., Farkas, A. and Martić, I., 2022. Numerical study of scale effects on open water propeller performance. *Journal of marine science and engineering*, 10(8), 1132.
- ITTC, 2024, Report of the Resistance & Propulsion Committee. *30th International Towing Tank Conference*, Hobart, Tasmania, Australia, 22–27 September 2024.
- Joung, T.H., Jeong, S.J. and Lee, S.K., 2014. CFD Simulations and Experimental Tests for Three Different Ducted Propellers.

- llers, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(3), pp.199–208.
- Kim, S.H. and Kim, J.H., 2025. Design and Performance Analysis of Ducted Propeller for 10kW-class Autonomous Underwater Vehicle. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 28(1), pp.81–91.
- Lee, C.S., Seo, J.C., Hyun., B.S., Kim, M.C., Moon, I.S., 2007. *Ship Propulsion and Propeller Design*. 2nd Ed. Moon-won Dang: Seoul
- Oosterveld, M. W. C., 1970. *Wake adapted ducted propellers*. Ph.D. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Stierman, E. J., 1984. Extrapolation Methods for ships fitted with a Ducted Propeller. *International shipbuilding progress*, 31(356), pp.80–87.
- Sun, S., Wang, C., Guo, C., Zhang, Y., Sun, C. and Liu, P., 2020. Numerical study of scale effect on the wake dynamics of a propeller. *Ocean Engineering*, 196, 106810.



김 정 재



김 지 혜