



대형공동수조를 활용한 프로펠러 단독성능시험에서 레이놀즈 수 영향에 대한 실험적 연구

한지수^{1,2,†} · 정재권¹ · 문자훈¹
한화오션(주) 제품전략기술원¹
인하대학교 조선해양공학과²

Experimental Study on Reynolds Number Effects in Propeller Open-water Test Using a Large Cavitation Tunnel

Jisoo Han^{1,2,†} · Jaekwon Jung¹ · Jahoon Moon¹
Product Strategy and Technology Institute, Hanwha Ocean Co., Ltd¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University²

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 investigated the effects of Reynolds number (Rn) on Propeller Open-Water (POW) test results for the KP458 propeller (P/D = 0.7) using the Hanwha Ocean Cavitation Tunnel (HOCT). Tests were conducted under five Reynolds number conditions ranging from 0.35×10^6 to 1.25×10^6 while maintaining turbulence intensity at 0.8~1.1%. For selected Reynolds numbers (0.35×10^6 , 0.51×10^6 , and 0.77×10^6), the results were cross-validated with measurements obtained in the Hanwha Ocean Towing Tank (HOTT). The results showed that propeller efficiency increased with Reynolds number up to 1.00×10^6 , with maximum efficiency occurring at an advance ratio of $J = 0.60 \sim 0.65$. The thrust coefficient (K_T) approached a saturation region at $Rn = 0.51 \times 10^6 \sim 0.77 \times 10^6$, while the torque coefficient (K_Q) exhibited reduced Reynolds number sensitivity beyond $Rn = 0.51 \times 10^6$. At the highest Reynolds number (1.25×10^6), sheet and face cavitation developed over the entire advance ratio range, causing a reduction in efficiency due to thrust loss. The results at $Rn = 1.00 \times 10^6$ were extrapolated to full-scale conditions using the ITTC-78 method. The trends of K_T , K_Q , efficiency, and the optimum advance ratio were preserved, indicating that sufficiently high-Reynolds-number cavitation tunnel tests can provide reliable full-scale performance predictions.

Keywords : Propeller open-water test(프로펠러 단독성능시험), Reynolds number(레이놀즈 수), Propeller Pitch ratio(프로펠러 피치비), Large cavitation tunnel(LCT, 대형공동수조)

1. 서론

프로펠러 단독성능시험(Propeller open-water, POW test)은 추력과 토크를 계측하여 추진 성능을 평가하고, 실선 성능 예측을 위한 기초 데이터를 제공하는 핵심 시험이다. 이러한 POW 데이터는 해양 및 선박 유체역학 분야에서 다양한 해석과 설계에 필수적으로 활용된다. 그러나 실선 조건에서의 프로펠러 주위 유동은 대부분 난류 상태인 반면, 모형 시험에서는 축척 효과와 시험 장비의 한계로 인해 동일한 난류 경계층 구조를 재현하기 어렵다. 특히 레이놀즈 수 변화에 따른 성능 계수의 차이는 기존 연구들에서도 보고된 바 있으며(Heinke et al., 2019), 가능한 한

높은 레이놀즈 수 영역에서의 시험이 중요하게 고려된다. 전통적으로 예인수조(towing tank)는 모형 프로펠러 단독성능시험에 널리 사용되어왔으나, 낮은 레이놀즈 수 조건의 한계로 인해 실선과 유사한 점성 및 천이 유동 특성을 재현하는 데 어려움이 있다(Kim et al., 2000b). 반면 공동수조(cavitation tunnel)는 상대적으로 높은 레이놀즈 수 조건에서 시험이 가능하며, 이에 따라 다양한 유동 조건에서의 성능 평가에 활용되고 있다(Ahn et al., 2014). 다만 공동수조에서의 시험은 저속 운전 시 유속 안정성 확보의 어려움, 동력계 계측 범위, 그리고 공동 발생 등의 영향으로 인해 계측 결과 해석에 주의가 필요한 것으로 알려져 있다(Ahn et al., 2019). 따라서 신뢰성 있는 결과 확보를 위해서는

계측 시스템의 특성에 대한 이해와 함께 불확도 분석이 병행되어야 한다(Choi et al., 1994). 또한 레이놀즈 수 효과는 시험 조건뿐만 아니라 프로펠러 형상에도 크게 의존하는 것으로 알려져 있다. 기존 연구에 따르면, 피치비(P/D)가 큰 프로펠러일수록 레이놀즈 수 변화에 더욱 민감하게 반응하는 경향이 보고된 바 있다(Kim et al., 2000a). 이러한 결과는 피치비가 점성 효과 및 경계층 천이 특성에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 이러한 배경에도 불구하고, 모형 스케일에서 레이놀즈 수 변화가 프로펠러 성능 및 공동 특성에 미치는 영향을 체계적으로 규명한 연구는 아직 충분하지 않다. 기존 연구들은 주로 수치해석 또는 제한된 레이놀즈 수 조건에서의 시험 결과에 의존하는 경향이 있으며, 실제 시험 장비에서 구현 가능한 전체 레이놀즈 수 범위를 대상으로 추력계수, 토크계수 및 효율을 종합적으로 분석한 사례는 많지 않다. 따라서 고·중·저 레이놀즈 수 조건을 모두 포함하는 일관된 시험 시스템 내에서 프로펠러 단독성능시험의 특성을 검증하는 것은 실선 스케일 확장 과정의 불확실성을 줄이고 물리적 해석의 정밀도를 향상시키는 데 중요한 의미를 갖는다. 특히 프로펠러 피치비(P/D)에 따른 레이놀즈 수 민감도 차이는 아직 명확히 규명되지 않은 영역으로, 동일한 유입 유속 조건에서도 피치비에 따라 레이놀즈 수 효과의 크기와 경향이 달라질 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 피치비를 갖는 프로펠러를 대상으로 다양한 레이놀즈 수 조건에서의 단독성능 변화를 비교·분석하는 데 있다.

2. 시험 설비 및 시험 조건

본 연구는 한화오션 공동수조(HOCT)에서 수행되었으며, 모든 시험은 시험부 내부에서 진행하였다. 시험부의 유효 크기는 폭 2.8m × 높이 2.4m × 길이 13m 이며, 최대 유속은 15m/s, 내부 압력은 0.3~4.0bar 범위에서 제어 가능하다. 시험부 전방에는 유동 균일화를 위해 허니콤(honeycomb)과 유동 정렬 교정기가 설치되어 있으며, Fig. 1은 한화오션 공동수조(HOCT)의 전체 형상과 주요 구성 요소를 나타낸다.

본 연구에 사용된 단독성능시험 장비는 정격 추력 3,000N, 정격 토크 200N·m의 용량을 가지며, 최대 4,000rpm까지 구동이 가능하다. 장비의 용량은 본 연구의 대상 프로펠러(KP458) 시험 범위를 충분히 충족한다. Table 1은 단독성능시험 장비의 주요 사양을 정리한 것이며, Fig. 2는 시험부 내 장비 설치 모습을 나타낸다.

시험부 유동의 품질을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 난류강도(turbulent intensity)를 계측하였다. 계측 위치는 프로펠러 회전면 기준 상류 방향으로 5D(약 1,250mm), 반경 방향은 프로펠러 반지름의 1.1R 위치에서 단일지점으로 설정하였다.

이러한 위치는 프로펠러 영향권 외부에 해당하여 대표적인 유입 유동 특성을 확인하기에 적합하다. 난류강도는 모든 시험 조건($Rn=0.35 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$)의 특정 전진비 구간($J=0.5/0.6$)

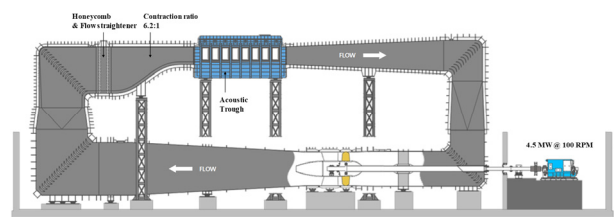


Fig. 1 Schematic drawing of the Hanwha Ocean cavitation

Table 1 POW test equipment specifications

Type	Underwater
Rated capacity	Thrust: $\pm 3,000N$
	Torque: $\pm 200N$
Maximum rpm	4,000



Fig. 2 POW installation photograph

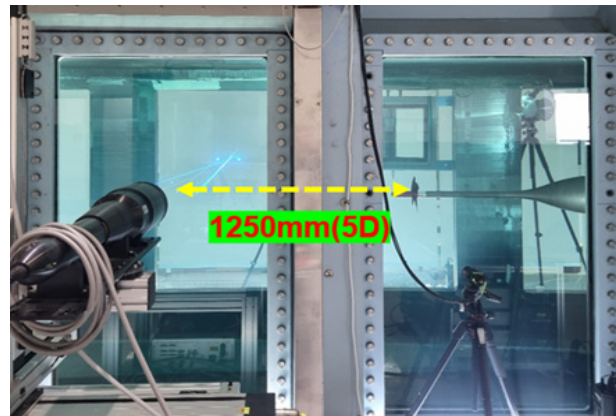


Fig. 3 Measurement of turbulence intensity using LDV

에서 계측하였으며, 결과는 약 0.8~1.1% 범위로 나타나 시험부 유동이 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 세부 계측 결과는 Table 2에 정리하였다.

본 연구의 프로펠러 단독성능시험은 프로펠러 회전수를 고정한 상태에서 유입 유속을 변화시키는 방식으로 수행되었다. 레이놀즈 수는 설계 전진비($J=0.5$) 근방의 조건을 포함하는 범위에서 형성되었으며, 독립적으로 설정된 시험 조건이 아니라 유입 유속에 의해 결정되는 값이다. 이에 따라 시험 범위 내에서 레이

Table 2 Turbulent intensity result

J	Rn($\times 10^6$)	V_T (m/s)	T.I.(%)
0.5	0.35	1.32	1.06
	0.51	1.89	1.11
	0.77	2.82	0.86
	1.00	3.64	0.87
	1.25	4.54	0.83
0.6	0.35	1.57	1.06
	0.51	2.26	0.95
	0.77	3.37	0.91
	1.00	4.36	0.84
	1.25	5.45	0.93

놀즈 수는 약 $0.35 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$ 범위로 변화하였다. 각 조건에 대해 전진비(J)는 0~0.80 범위의 데이터를 확보하였으며, 상세 시험 조건은 Table 3에 제시하였다.

블레이드 반경 0.7R 위치에서의 레이놀즈 수($Rn(0.7R)$)는 식 (1)과 같이 산정하였으며, 전진비(J), 추력계수(K_T), 토크계수(K_Q), 효율(η_0)은 아래와 같이 정의된다.

$$Rn(0.7R) = \frac{(c/D)_{0.7R} n D^2 \sqrt{J^2 + (0.7\pi)^2}}{\nu} \quad (1)$$

$$J = \frac{V_T}{nD} \quad (2)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (3)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (4)$$

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (5)$$

여기서 T 와 Q 는 각각 계측된 추력과 토크, n 은 회전수, D 는 프로펠러 직경이며, V_T 는 유속이다.

시험에 사용된 KP458 프로펠러의 주요 제원은 Table 4에 정리하였다. 모든 레이놀즈 수 조건에서 동일한 프로펠러 형상을 적용하였기 때문에, 이후 제시하는 시험 결과는 레이놀즈 수 변화에 따른 성능 차이를 직접적으로 비교할 수 있는 조건을 갖춘다.

3. KP458 단독성능시험

공동수조에서 수행된 KP458 프로펠러 단독성능시험 결과는 전진비 증가에 따른 추력·토크계수의 변화와 레이놀즈 수 변화에 따른 효율 차이를 중심으로 분석하였다. Fig. 4, 5, 6과 같이 각

Table 3 KP458 CT-POW test conditions

Prop. rpm	V_T (m/s)	J	Rn(at J = 0.5)
620	0 ~ 2.08	0 ~ 0.80	0.35×10^6
900	0 ~ 2.81	0 ~ 0.80	0.51×10^6
1350	0 ~ 4.50	0 ~ 0.80	0.77×10^6
1750	0 ~ 5.83	0 ~ 0.80	1.00×10^6
2180	0 ~ 7.27	0 ~ 0.80	1.25×10^6

Table 4 Main specifications of the KP458 propeller

Item	Value
Diameter, D (mm)	250.0
No. of blades, Z	4
(P/D)mean	0.690
(P/D)0.7R	0.721
Expanded Area Ratio (EAR)	0.431
Hub Ratio	0.155

레이놀즈 수 조건(0.35×10^6 , 0.51×10^6 , 0.77×10^6)은 설계 전진비(J = 0.5)에서의 값을 기준으로 설정되었으며, 해당 조건에서 공동수조(CT)와 예인수조(TT)의 시험 결과는 전반적으로 잘 일치하는 경향을 보였다. 특히 $Rn = 0.51 \times 10^6$ 과 0.77×10^6 에서는 두 시험의 K_T , K_Q , η_0 변화가 거의 유사한 형태를 나타냈다. 또한 공동수조와 예인수조 시험은 기본적으로 동일한 시험 조건에서 수행되었으며, 수온 차이에 따른 유체 점성 변화로 인해 목표 레이놀즈 수를 만족시키기 위하여 회전수(n)를 일부 조정하였다. 아울러 예인수조 시험은 동력계 용량 한계로 인해 저전진비 영역(J < 0.3)에 대한 시험 수행이 제한되었으며, 따라서 $J \geq 0.3$ 범위의 결과를 제시하였다.

Fig. 7, 8, 9는 레이놀즈 수 $0.35 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^6$ 조건에서 수행된 KP458 단독성능시험 결과를 나타낸다. 레이놀즈 수가 증가함에 따라 전반적인 효율은 향상되는 경향을 보인다. 또한 최대 효율이 나타나는 전진비는 레이놀즈 수에 따라 달라지는데, 레이놀즈 수 0.35×10^6 조건에서는 전진비 0.50~0.55 부근에서 최대 효율이 나타난 반면, 레이놀즈 수 0.51×10^6 이상에서는 전진비 0.60~0.65 범위에서 최대 효율이 형성된다. 이러한 경향은

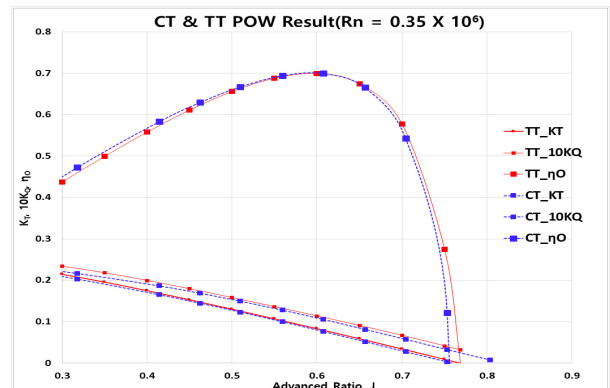
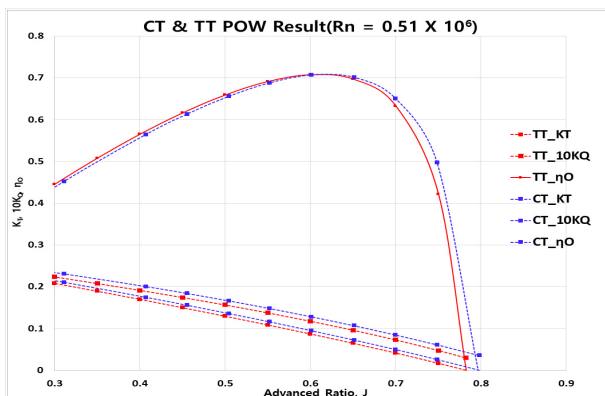
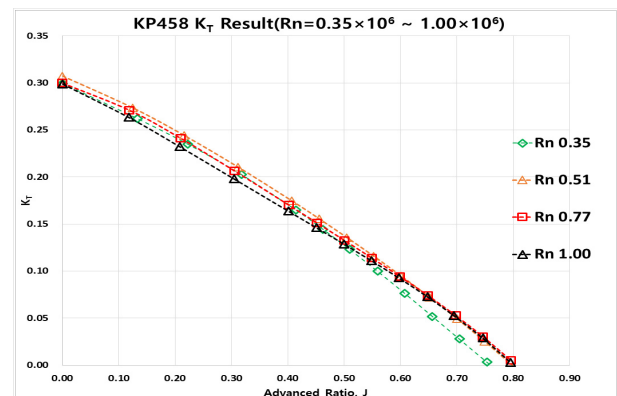
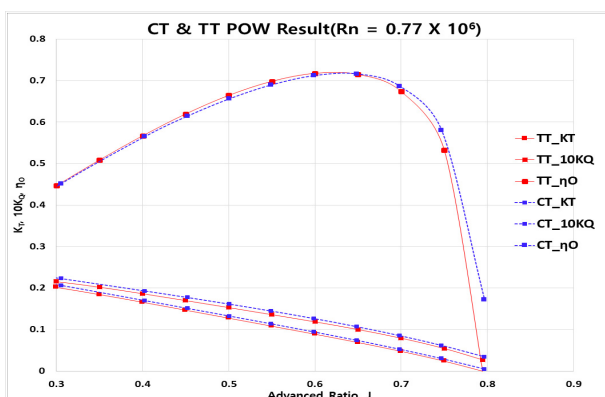
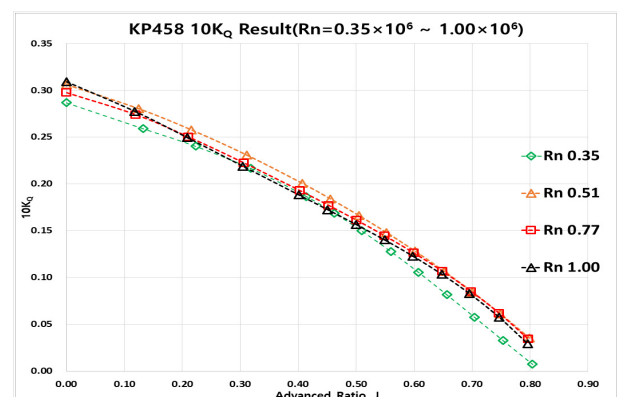
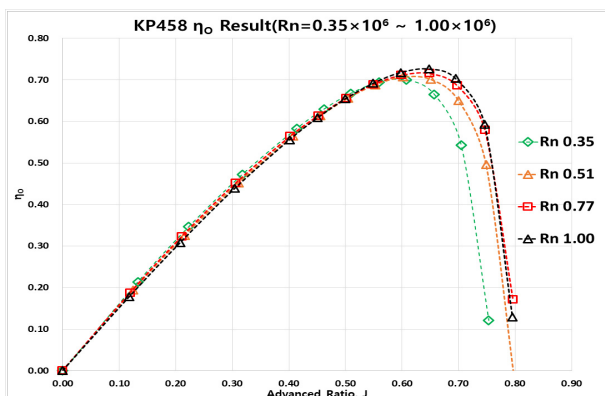
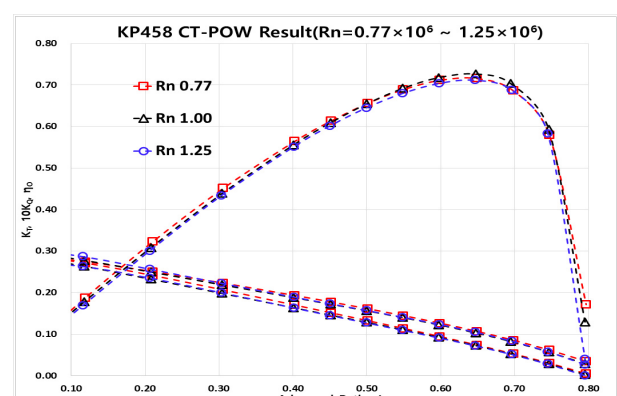


Fig. 4 CT&TT POW test result ($Rn=0.35 \times 10^6$)

Fig. 5 CT&TT POW test result ($Rn=0.51 \times 10^6$)Fig. 8 KP458 K_T Test Result ($Rn=0.35 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^6$)Fig. 6 CT&TT POW test result ($Rn=0.77 \times 10^6$)Fig. 9 KP458 $10K_Q$ test result ($Rn=0.35 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^6$)Fig. 7 KP458 η_O test result ($Rn=0.35 \times 10^6 \sim 1.00 \times 10^6$)Fig. 10 KP458 CT-POW result ($Rn=0.77 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$)

낮은 레이놀즈 수 조건에서 점성 영향이 증가하고 경계층 천이가 지연됨에 따라, 고전진비 영역에서 경계층 분리 및 성능 저하가 초기에 발생하기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 레이놀즈 수 조건($0.77 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$)에서 수행된 KP458 단독성능시험 결과를, Fig. 11은 전체 레이놀즈 수 조건($0.35 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$)에 대한 결과를 나타낸다. 최고 레이놀즈 수 조건(1.25×10^6)에서는 전진비 전 구간에서 시트 및 페이스 캐비테이션이 관찰되었다. 특히 저전진비 영역에서는 K_T 가 레이놀즈 수 0.77×10^6 및 1.00×10^6 조건 대비 감소하는 경향을 보였다. K_Q 는 비교적 일정하게 유지됨에 따라 전체 효율은 크게 감

소하였으며, 최대 효율 역시 하위 레이놀즈 수 조건보다 낮게 나타났다.

Fig. 12, 13, 14는 각각 레이놀즈 수 0.50×10^6 , 0.75×10^6 및 1.00×10^6 조건에서 수행된 KP458 프로펠러의 공동수조 POW 시험 결과와 ITTC-78 실선 확장 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실선 확장 결과를 보면, 전진비 증가에 따른 추력계수(K_T)와 토크 계수(K_Q)의 전반적인 변화 경향은 모델 스케일 결과와 유사하게 나타났으며, 최대 효율이 형성되는 전진비 위치 또한 모델 스케일 결과와 유사하게 유지됨을 확인할 수 있다. 한편, 추력계수의 변화는 모델 스케일 결과와 비교하여 제한적인 수준으로 나타났

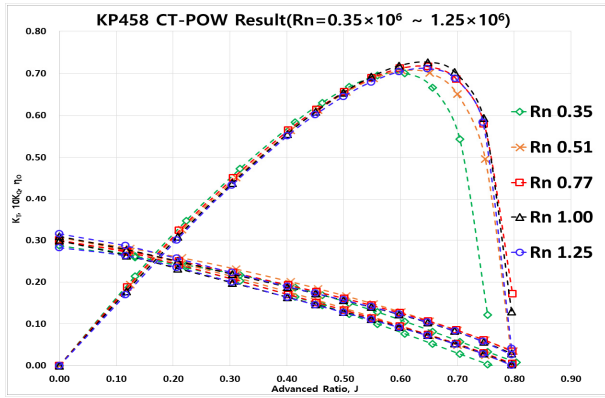


Fig. 11 KP458 CT-POW result ($Rn=0.35 \times 10^6 \sim 1.25 \times 10^6$)

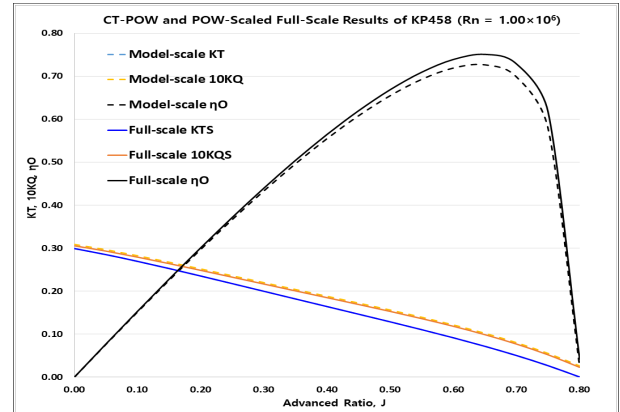


Fig. 14 CT-POW vs. Full-scale results ($Rn = 1.00 \times 10^6$)

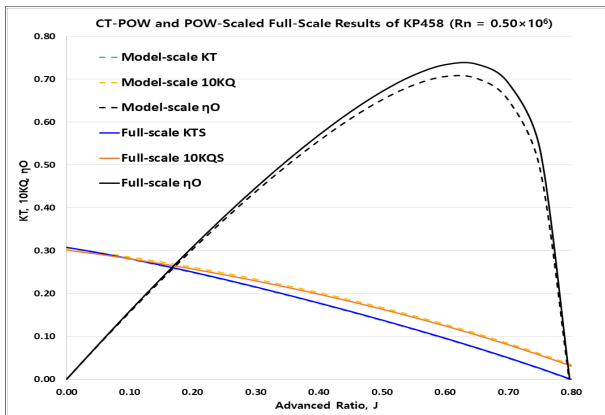


Fig. 12 CT-POW vs. full-scale results ($Rn = 0.51 \times 10^6$)

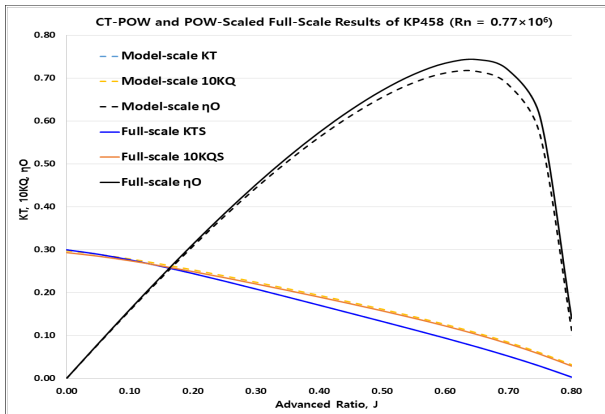


Fig. 13 CT-POW vs. full-scale results ($Rn = 0.77 \times 10^6$)

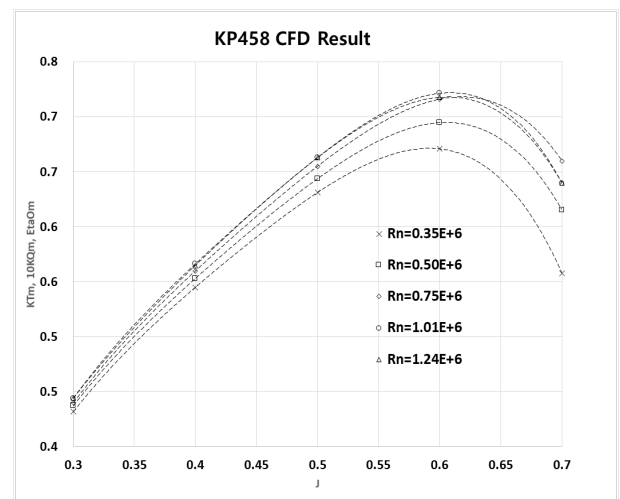


Fig. 15 CFD results ($Rn = 0.35 \times 10^6 \sim 1.24 \times 10^6$)

으며, 효율은 전반적으로 소폭 향상되는 경향을 보였다.

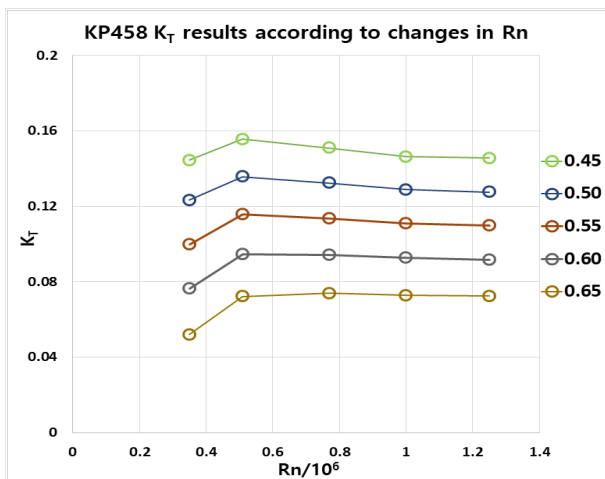
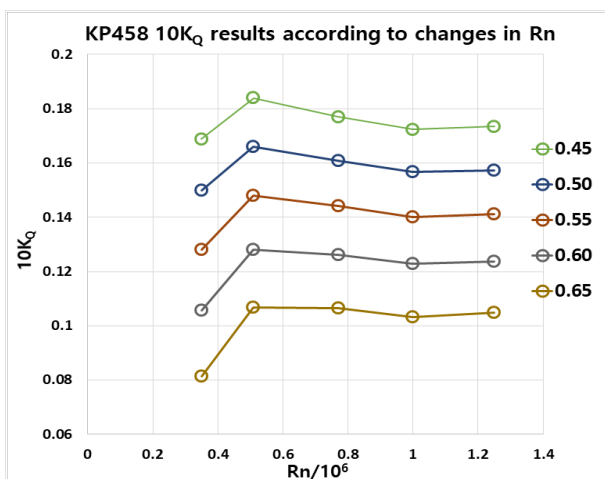
CFD 해석에서는 지배 방정식으로 연속 방정식과 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다. 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였고, 메시는 정지 영역에는 trimmed mesh를, 회전 영역에는 polyhedral mesh를 각각 사용하여 생성하였다.

CFD 해석에서도 레이놀즈 수 증가에 따라 전반적인 효율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 최대 효율은 모든 조건에서 전진비 0.60~0.65 부근에서 형성되었다. Fig. 15에서 보듯이

레이놀즈 수 1.24×10^6 조건에서는 효율이 1.01×10^6 조건 대비 소폭 감소하였으며, 이는 시험에서 관찰된 효율 저하 경향과 유사하다. 다만 시험 결과에서는 낮은 레이놀즈 수 조건에서 최대 효율이 형성되는 전진비 위치가 변화하는 경향이 나타난 반면, CFD 결과에서는 모든 레이놀즈 수 조건에서 최대 효율이 유사한 전진비 범위에서 형성되었다. 또한 낮은 레이놀즈 수 영역에서의 효율 수준 역시 시험 결과와 일부 차이를 보였다.

본 연구에서 CFD 결과는 레이놀즈 수 증가에 따른 성능 변화의 전반적인 경향을 검토하기 위한 참고 자료로 활용하였으며, 이러한 결과는 공동수조 단독성능시험에서 도출된 레이놀즈 수 영향 해석을 수치적으로 뒷받침한다.

동일 전진비 조건에서의 비교 결과, Fig. 16, 17에서 확인할 수 있듯 레이놀즈 수 1.25×10^6 조건에서는 모든 J 에서 K_T 가 감소한 반면 $10K_Q$ 는 큰 변화가 없어, 고 레이놀즈 수 조건에서 발생한 캐비테이션이 추력계수 변화에 지배적으로 작용함을 확인할 수 있었다. 한편 가장 낮은 레이놀즈 수 0.35×10^6 조건에서는 K_T 와 $10K_Q$ 가 다른 조건에 비해 변동이 크고 경향이 일관되지 않는 모습을 보였다. 이는 저 레이놀즈 수 영역에서 점성 영향이 크게 작용하고 유동의 난류화가 충분히 이루어지지 않아 무차원

Fig. 16 K_T vs Rn at fixed J Fig. 17 $10K_Q$ vs Rn at fixed J

계수가 안정된 형태를 형성하지 못하는 특성이 반영된 결과로 해석된다.

4. A Propeller 단독성능시험

고 피치비($P/D > 1.1$)를 갖는 A 프로펠러에 대한 단독성능시험은 KP458 시험에 앞서 동일 공동수조(HOCT)에서 수행되었으며, 시험 설비와 계측 장비는 동일하다. 피치비 증가로 동일 회전수에서 추력과 토크가 증가하였고, 고 레이놀즈 수 조건에서는 동력계 용량 제한으로 계측 가능한 전진비(J) 범위가 제한되었다. 중간 레이놀즈 수 조건($Rn \leq 0.75 \times 10^6$)까지는 전진비 0~1.10 전 구간에서 계측이 가능하였으나, 높은 레이놀즈 수 조건($Rn \geq 1.00 \times 10^6$)에서는 전진비 0.45 이상의 구간에서만 시험이 수행되었다. 본 연구에서 적용된 시험 조건은 Table 5에 제시하였다.

Fig. 16은 A 프로펠러의 단독성능시험 결과이다. 전체적인 경향을 보면, 가장 낮은 레이놀즈 수 조건($Rn = 0.30 \times 10^6$)에서 효

Table 5 A Propeller CT-POW test conditions

Prop. rpm	V_T (m/s)	J	$Rn(J \approx 0.8)$
420	0 ~ 2.29	0 ~ 1.10	0.30×10^6
700	0 ~ 3.81	0 ~ 1.10	0.50×10^6
1050	0 ~ 5.72	0 ~ 1.10	0.75×10^6
1400	2.86 ~ 7.63	0.45 ~ 1.10	1.00×10^6
2100	4.29 ~ 10.97	0.45 ~ 1.10	1.50×10^6

율이 가장 높게 나타났으며 레이놀즈 수가 증가할수록 효율은 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이러한 효율 저하는 전진비(J) 전 영역에서 K_Q 가 레이놀즈 수 0.30×10^6 조건에서 일관되게 더 작은 값을 보이는 반면, K_T 는 저·중전진비 영역에서는 레이놀즈 수 영향이 거의 없고 고전진비 영역에서만 레이놀즈 수 0.30×10^6 조건이 상대적으로 낮게 형성되는 특성에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 레이놀즈 수 변화에 따른 효율 차이는 K_Q 감소의 상대적 영향이 지배적으로 작용한 결과로 해석된다. 이러한 A 프로펠러의 특성은 본 연구에서 분석한 저피치비 프로펠러 KP458($P/D = 0.7$)이 레이놀즈 수 증가에 따라 효율이 향상되는 경향을 보인 결과와 뚜렷하게 대비된다.

가장 높은 레이놀즈 수 조건(1.50×10^6)에서는 시험이 가능했던 전진비 구간($J \geq 0.45$) 전 영역에서 강한 캐비테이션이 발생하였다. 이 조건에서 K_T 는 다른 레이놀즈 수 조건에 비해 전반적으로 더 낮게 형성되었으며, 효율 역시 가장 낮은 값을 나타냈다. 본 연구에서는 A 프로펠러 단독성능시험을 참고자료(reference)로 활용하였기 때문에 캐비테이션의 정량적 분포를 추가적으로 분석하지는 않았지만, 고 레이놀즈 수 조건에서 관찰된 강한 캐비테이션과 동일 조건에서의 K_T 및 효율 저하는 서로 일관된 경향을 보였다. 종합하면, A 프로펠러는 레이놀즈 수 증가가 효율 향상으로 이어지지 않았으며, 특히 가장 높은 레이놀즈 수 조건에서 효율 저하가 명확하게 나타났다. 이는 A 프로펠러와 KP458 프로펠러 사이에서 레이놀즈 수 변화에 따른 K_T - K_Q - η_p 의 경향이 서로 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

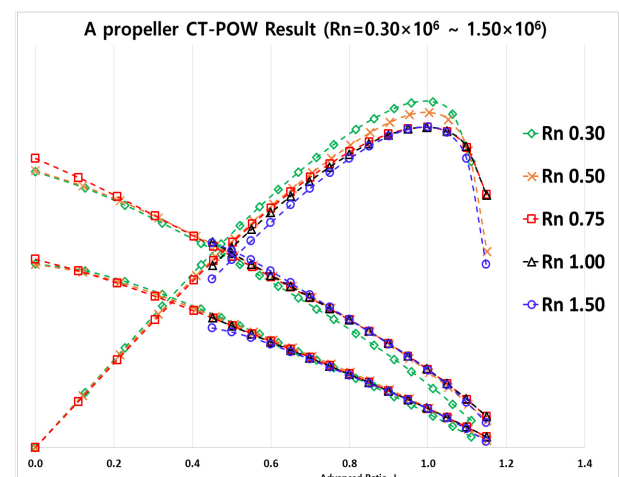


Fig. 18 A propeller CT-POW result

5. 결 론

본 연구에서는 한화오션 공동수조(HOCT)에서 피치비가 다른 두 프로펠러 KP458($P/D = 0.7$)과 A 프로펠러($P/D > 1.1$)를 대상으로 레이놀즈 수(Rn) 변화에 따른 단독성능시험을 수행하였다. 시험 신뢰성 확보를 위해 모든 레이놀즈 수 조건에서 특정 전진비 구간($J = 0.5/0.6$)의 시험부 난류강도(Turbulent Intensity)를 계측하여 유동 품질을 검증하였으며, 이 중 KP458에 대해서는 레이놀즈 수 0.35×10^6 , 0.51×10^6 , 0.77×10^6 조건에서 예인수조(TT) 결과와 비교를 통해 공동수조 시험 체계의 신뢰성을 추가로 확인하였다.

KP458 프로펠러는 레이놀즈 수 0.35×10^6 에서 1.00×10^6 구간까지 레이놀즈 수 증가에 따라 효율이 점진적으로 향상되었다. 최대 효율이 나타나는 전진비는 레이놀즈 수에 따라 달라지며, 0.35×10^6 조건에서는 전진비 0.50~0.55 부근에서 형성된 반면, 그 이상의 레이놀즈 수 조건에서는 전진비 0.60~0.65 범위에서 나타났다. 한편, 최고 레이놀즈 수 조건인 1.25×10^6 에서는 전진비($J = 0 \sim 0.80$) 전 영역에서 시트 및 페이스 캐비테이션이 발생하여 K_T 가 하위 레이놀즈 수 조건 대비 감소하였고, 이에 따라 효율 역시 저하되었다.

A 프로펠러는 가장 낮은 레이놀즈 수 조건(0.30×10^6)에서 효율이 가장 높게 나타났으며, 레이놀즈 수 증가가 효율 향상으로 이어지지 않았다. 특히 레이놀즈 수 1.50×10^6 에서는 시험 가능한 전진비 범위(0.45~1.10) 전 영역에서 강한 캐비테이션이 관찰되었고, 중간 전진비 구간에서 K_T 는 다른 레이놀즈 수 조건보다 낮은 수준을 보였으며 효율 역시 감소하였다. K_Q 의 변화는 상대적으로 제한적이었다.

두 프로펠러의 비교 결과, 피치비가 다른 경우 레이놀즈 수 변화에 따라 K_T , K_Q , η_0 의 경향이 서로 다르게 나타날 수 있음이 확인되었다. 즉, 저피치비 프로펠러(KP458)는 일정 범위까지 레이놀즈 수 증가에 따라 효율이 증가한 반면, 고피치비 A 프로펠러는 레이놀즈 수 증가 시 효율 감소와 캐비테이션 발생이 더 두드러졌다. 이는 프로펠러 피치비 차이에 따라 레이놀즈 수 변화 시 성능 변화 패턴이 달라질 수 있음을 보여주는 결과이다. 다만 본 연구에서 비교한 두 프로펠러는 피치비 외에도 형상 차이를 포함하고 있으므로, 관찰된 차이를 피치비 영향만으로 완전히 분리하여 평가하기에는 한계가 있다.

본 연구에서 확보된 KP458 및 A 프로펠러 단독성능시험 자료는 레이놀즈 수 변화에 따른 영향을 시험적으로 검토할 수 있는 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 피치비 범위 확대 등을 통해 레이놀즈 수 변화에 따른 영향을 보다 폭넓게 연구할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- Ahn, J.W., Kim, K.S. and Seol, H.S. 2014. Manufacturing method for propeller open-water test device useable in large cavitation tunnel.
- Ahn, J.W., Kim, K.S. and Park, Y.H. 2019. Experimental study of the POW characteristics using high-capacity inclined-shaft dynamometer. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(2), pp.168–174.
- Choi, G.I., Chun, H.H., Kim, J.S. and Lee, C.M. 1994. Uncertainty analysis for the propeller open water test. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 31(1), pp.71–83.
- Heinke, H.J., Hellwig-Rieck, K., and Lübke, L. 2019. Influence of the Reynolds number on the open water characteristics of propellers with short chord lengths. *In Proceedings of the Sixth International Symposium on Marine Propulsors*, Rome, Italy, pp.26–30.
- Kim, K.S., Kim, K.Y., and Ahn, J.W., 2000a. Experimental correlation analysis of propeller open-water characteristics at towing tank and cavitation tunnel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), pp.26–39.
- Kim, K.S., Kim, K.Y., Ahn, J.W. and Lee, J.T. 2000b. Effect of Reynolds number, leading edge roughness and air content on the cavitation performance of model propellers. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 37(1), pp.10–25.

Authorship Contribution Statement

Jisoo Han: Conceptualization, Investigation, Methodology, Validation; **Jaekwon Jung**: Supervision, Writing – review & editing; **Jahoon Moon**: Data curation, Formal analysis, Methodology.



한 지 수



정 재 권



문 자 훈