한국마린엔지니어링학회지 제34권 제5호, pp. 718~724, 2010. 7 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

중형 공동수조에서의 프로펠러 단독특성에 대한 위벽효과 보정 연구

서성부† · 김기섭[1]

(원고접수일 : 2010년 7월 12일, 원고수정일 : 2010년 7월 26일, 심사완료일 : 2010년 7월 26일)

Study on the Wall Effect Correction for Propeller Open Water Characteristics in the Medium Size Cavitation Tunnel

Sung-Bu Suh† · Ki-Sup Kim[1]

요 약 : 공동수조와 예인수조에서의 프로펠러 단독특성 차이를 보정할 수 있는 위벽효과 연구를 수행하였다. 우선 공동수조의 실험에서 프로펠러의 상류가 아닌 작동 평면 위치에서 계측된 유속을 프로펠러 전진속도로 정의할 경우, 위벽효과의 수정 량 및 단독특성차이가 현저히 줄어드는 것을 확인하였다. 다음으로 양력판 이론에 의한 단독특성 계산을 통해, 프로펠러 평면에서의 위벽효과를 구하고 앞의 결과에 추가적인 보정을 수행하였다. 그 결과, 예인수조에서의 단독특성과 더욱 더 좋은 일치를 보여 주는 것을 확인하였다.

주제어 : 공동수조, 예인수조, 프로펠러 단독특성, 위벽효과, 전진속도, 양력판 이론

Abstract: This paper studies the differences due to the wall effect in propeller open water(POW) characteristics tested in a towing tank and in a medium size cavitation tunnel(CT). When the advanced velocity of the propeller is defined as the flow velocity measured in the plane of propeller, POW characteristics resulting from CT has a better relationship with them of towing tank. To obtain the wall effect in the propeller plane, numerical computation using the lifting panel theory is performed with and without the wall around a propeller. Then, POW results in CT are corrected based on the wall effect from numerical results. The POW results obtained from this procedure show a better agreement with the experimental results in the towing tank.

Key words: Cavitation tunnel(CT), Towing tank, Propeller open water(POW) characteristics, Wall effect, Advanced velocity, Lifting panel theory

1. 서 론

공동수조(Cavitation Tunnel)는 선박용 프로펠러의 공동현상과 관련된 모형시험을 주로 수행하는 시설이다. 이러한 공동현상과 관련된 시험에서는 예인수조(Towing Tank)에서의 프로펠러 단독특성 결과를 기본으로 하기 때문에, 공동수조에서 계측되는 단독특성과의 정확한 차이를 찾아내는 것은 매우 중요한 일이 된다. 대표적 차이점으로 밀폐된 제한수조인 공동수조에서는 위벽효과가 존재하는 것이다. 또한 공동수조에서는 프로펠러 고속회전과 전진이 가능하고, 계측장비의 설치 위치에 따른 차이점으로 인해 프로펠러 축 주위 등에서의 국부유동이 달라질 수 있다는 것이다.

이러한 차이점들을 해결하기 위한 방법으로써, 풍동시험에서 운동량 이론의 적용을 통해 위벽효과를 고려하는 Wood & Harris[1] 방법을 들 수

† 교신저자(동의대학교 조선해양공학과, E-mail:sbsuh@deu.ac.kr, Tel: 051-890-2591)
1 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양운송연구부

있다. 그러나 풍동에서 모형 시험은 주로 날개 스팬(Span)의 길이가 선박용 프로펠러보다 큰 항공기용 프로펠러를 대상으로 하고 있다. 따라서 프로펠러 축 주위에서의 국부유동의 영향이 적어서 위벽효과만을 고려하여도 좋으나, 공동수조에서는 국부유동의 변화에 따른 영향도 무시할 수 없게 되므로 예인수조 시험 결과와는 많은 차이가 있었다[2]. 김기섭 등[3-4]은 공동수조와 예인수조에서의 상호관계를 프로펠러 날개면적비, 피치비 및 부하계수 변화에 따른 상관계수 k로 도출하였다. 이 과정에서 프로펠러 상류에 계측용 축이 있는 경우, 축 주위에 형성된 경계층 유동이 추력발생에 미치는 영향이 작지 않음을 보였다. Hoshino[5]는 공동수조의 시험에서 위벽효과를 줄이기 위하여, 프로펠러 작동 평면 위치에서의 유속을 계측하고 이 값을 위벽효과의 수정 없이 사용하였다. 이 방법은 프로펠러 상류에서 계측된 유속을 사용하는 경우보다도 위벽효과가 적기 때문에, 하중도가 낮은 프로펠러의 경우는 비교적 예인수조 시험 결과와 비슷하였으나, 하중도가 높은 프로펠러의 경우에는 아직도 많은 차이가 있었다. 서성부 등[6]은 계측장비의 설치 위치에 따른 차이점과 국부유동을 충분히 고려할 수 있는 안정된 레이놀즈수 범위에서, Hoshino의 방법을 이용하여 프로펠러 단독특성 시험을 수행하였다. 또한 운동량 이론이 너무나 단순한 가정을 기초로 하고 있기 때문에 정확한 위벽효과를 기대하기는 어려운 점을 들고, 향후 더욱더 정확한 위벽효과 계산을 위해서는 운동량 이론보다 정도 높은 유체역학적 모델링의 개발이 필요하다는 제안을 하였다.

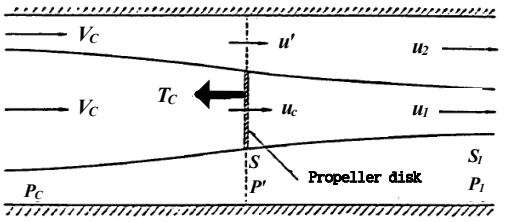
본 논문에서는 이러한 공동수조와 예인수조에서의 프로펠러 단독특성 차이에 중요한 영향을 끼치는 위벽효과에 대한 연구 결과를 보이고자 한다. 따라서 공동수조에 설치된 프로펠러의 상류가 아닌 작동 평면 위치에서 계측된 유속을 프로펠러 전진속도로 정의하였을 경우, 위벽효과의 수정량 및 단독특성 차이가 현저히 줄어드는 결과를 새로이 정리·고찰하고자 한다. 또한 기존의 양력판 이론에 의한 프로펠러 성능해석 프로그램[7]을 위벽효과에 대한 계산이 가능할 수 있도록 일부 수정·보완한 내용을 설명할 예정이다. 마지막으로 양력판 이론에 의한 계산 결과로부터 구한, 프로펠러 평면에서의 위벽효과를 앞의 결과에 추가 보정해 주는 새로운 보정기법을 제시하고자 한다. 그 결과, 예인수조에서의 단독특성 실험 결과와 좋은 일치를 보임을 설명하고자 한다.

2. 프로펠러 단독특성 실험

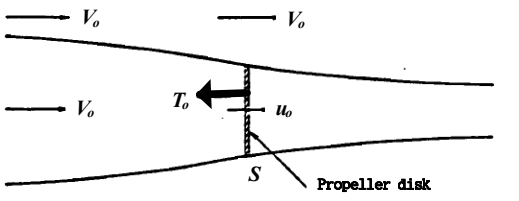
2.1 프로펠러 주위에서의 유동 정의

운동량 이론을 통해 위벽효과를 고려한 Wood & Harris[1] 방법에서 사용한 프로펠러 주위에서의 유동 정의를, 본 논문에서는 **Figure 1**과 같이 공동수조와 예인수조로 구분하여 유속과 압력을 나타내었다. 여기서 프로펠러가 작동하는 면적(원판, disk)은 S, 공동수조의 밀폐된 계측 부 단면적은 C로 정의하였다. 또한 프로펠러의 추력은 T로 정의하고, 아래첨자 C 와 O를 사용하여 공동수조와 예인수조를 구분하였다.

운동량 보존법칙의 적용은 프로펠러의 충분한 전방과 후방에서 검사 평면을 취하고, 프로펠러 원판을 지나는 유선을 경계로 해서 그 내측과 외측에서의 유속 및 압력이 각각 균일하다고 가정하였다.



cavitation tunnel



towing tank

Figure 1: Flow field around the propeller disk.

여기서 공동수조 내와 예인수조 중에서의 추력 및 프로펠러 원판을 통과하는 유속이 같을 때(즉 $T_c = T_{o\,,\,u=uo}$), T를 매개변수로 하여 정해지는 V_o/V_c 또는 V_o/u' 의 변화가 공동수조에서의 위벽효과임을 알 수 있다. 서성부 등[6]의 자료에 의하면, 프로펠러 작동 평면에서의 유속 u'을 계측한 경우 쪽이 수정의 크기가 작게 나타나고 있다. 따라서 본 논문에서는 유속 u'를 계측하고 이에 대한 위벽효과와의 관계를 고찰하고자 한다.

2.2 실험 장치 및 실험법

프로펠러 단독특성 실험은 한국해양연구원 해양안전시스템 연구소가 보유하고 있는 중형 공동수조에서 수행하였으며, 예인수조에서의 실험은 같은 연구소에서 기 수행한 결과 자료를 활용하는 것으로 대체하였다. 중형 공동수조는 **Figure 2**에 나타낸 것과 같이, 제1계측부와 제2계측부로 나뉘어져 있으며 시험목적에 따라 교환이 가능하도록 되어 있다. 본 실험은 제1계측부에서 수행하였으며, 600mm×600mm 의 정사각형 단면으로 벽면이 특수 아크릴 소재로 되어 있어 LDV 실험이 가능하다.

공동수조의 프로펠러 단독특성시험에서의 회전수(rps) n 변화, 추력(Thrust) T 및 토크(Torque) Q 계측 등을 위해 J25동력계와 H41동력계가 사용되었다. H41동력계는 예인수조에서의 동력계와 유사한 조건이지만, J25동력계는 프로펠러축이 상류를 향하고 있어 축 주위의 국부유동에 대한 차이점을 고려할 필요가 있다. 모형시험용 프로펠러는 김기섭 등[4]이 k 상관계수 도출에 사용한 프로펠러 중의 하나로써, 주요제원을 **Table 1**에 나타내었다. 직경 D는 250mm로 계측부의 크기와 벽면에서의 경계층 등을 고려한 크기이고, 날개 수 4개, 프로펠러 설계 전진계수 $J(= V/nD)$ 0.875 및 평균 피치비 $(P/D)_{mean}$ 가 1.098로, 하중도가 커서 위벽효과의 영향이 작지 않을 것으로 예상된다.

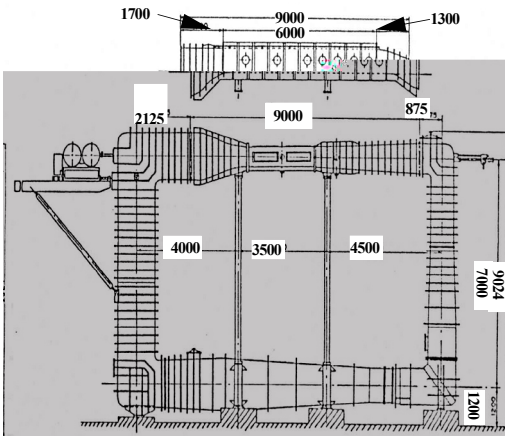


Figure 2: The profile of the medium cavitation tunnel in MOERI.

Table 1: Principle dimensions for the model propeller (KP215)

Propeller No.	KP215	No. of Blades	4
Diam.(Model)	250.000 mm	Scale Ratio(λ)	31.200
A_E/A_O	.600	$(P/D)_{mean}$	1.098
Skew(°)	24.860	Design J	0.875

예인수조와 공동수조에서의 프로펠러 단독특성 차이에 대한 비교가 중요하므로, 우선 레이놀즈수 R_N 과 동력계 축방향 변화에 따른 추력 및 토오크 변화를 조사하였다.

다음으로 프로펠러 단독특성 실험은 공동수조의 프로펠러 상류 및 작동평면 위치에서의 유속을 동시에 계측하면서 수행하였다. 유속계측을 위한 장치는 E08 Manometer와 압력변환기를 사용하였다. 공동수조의 계측부 벽면에서의 경계층을 안종우[8]가 LDV로 측정하였는데, 프로펠러 작동 위치의 상류 0.91m에서 평균속도 4.0055 m/s일 때 경계층의 두께가 16~17mm이고, 하류 2.35m에서 각각 4.03 m/s, 34~35 mm 이었다. 따라서 프로펠러 작동 평면에서의 유속 u' 계측을 위한 피토관 설치 위치는 계측부의 벽면 경계층을 고려하여, 벽면과의 거리를 25mm로 설정하였다. **Figure 3**에 피토관을 계측부의 관측 창에 장치한 모습을 나타내었다.

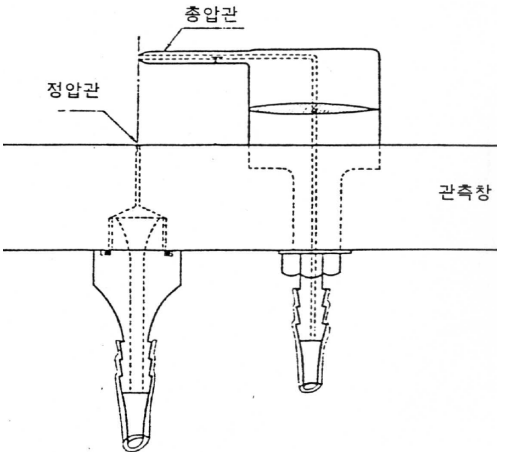


Figure 3: Device for measurement of the total pressure and the static pressure.

3. 양력판 이론에 의한 위벽효과 계산

3.1 문제의 정식화 및 이산화

이상유체(비점성, 비압축성 유체 가정 및 비회전 유동 가정) 중에 위치하는 임의의 3차원 물체 주위 교란 유속, $\underline{V}$는 교란속도 포텐셜, ϕ로 표시할 수 있다. 즉,

$$\underline{V} = \nabla\phi \tag{1}$$

한편, Green 정리에 의하면 임의점에서의 교란속도 포텐셜은 물체표면, S_B 및 후류 보오텍스 표면, S_W에 적절한 세기의 쏘오스 및 다이폴을 분포함으로써 표시할 수 있다.

$$\phi(\underline{X}) = \iint_{S_B}[-\phi(\xi)\frac{\partial}{\partial n_\xi}G(\underline{X};\xi)+\frac{\partial\phi(\xi)}{\partial n_\xi}G(\underline{X};\xi)]ds + \iint_{S_W}-\triangle\phi(\xi)\frac{\partial}{\partial n_\xi}G(\underline{X};\xi)]ds \tag{2}$$

식 (2)의 계산점 $\underline{X}$(x,y,z)이 프로펠러 날개 표면에 위치할 경우 프로펠러 표면에서의 교란속도 포텐셜은

$$\frac{1}{2}\phi^P(\underline{X}) = \iint_{S_B^P}[-\phi\frac{\partial}{\partial n}G+\frac{\partial\phi}{\partial n}G]ds\ \frac{\partial}{\partial n}G\,ds + \iint_{S_W^P}-\triangle\phi + \iint_{S^T}[-\phi\frac{\partial}{\partial n}G+\frac{\partial\phi}{\partial n}G]ds \tag{3}$$

여기서 윗첨자 P 와 T 는 각각 프로펠러와 계측부의 벽면을 나타내고, 아랫첨자 B 와 W 는 물체와 후류 보오텍스 면을 각각 의미한다. 벽면에 의한 프로펠러 표면에서의 유기 포텐셜의 값을 $\phi^{T,p(\underline{X})}$로 표시하고 식 (3)을 정리하면

$$\frac{1}{2}\phi^P(\underline{X}) + \iint_{S^{P_B}}\phi\frac{\partial G}{\partial n}ds + \iint_{S^{P_W}}\triangle\phi\frac{\partial G}{\partial n}ds = \iint_{S_B^P}\frac{\partial\phi}{\partial n}G\,ds + \phi^{P,T}(\underline{X}), \tag{4}$$

프로펠러 표면을 분할하여 N^P개의 4면을 갖는 양력판 요소로 치환하고 특이점의 세기를 각 양력판에서 일정세기를 갖도록 선택하면, 식 (4)의 적분방정식은 각 표면 양력판에서의 값을 미지수로 하는 선형 행열 방정식으로 치환된다.

$$\sum_{j=1}^{N^P}D_{ij}^P\phi_j^P + \sum_{m=1}^{M^P}W_{im}^P(\triangle\phi)_M^P = \sum_{j=1}^{N^P}S_{ij}^P(\frac{\partial\phi}{\partial n})_j^P + \phi^{P,T}(\underline{X_i}) \tag{5}$$

$$where,\ D_{ij}^P = \frac{-1}{4\pi}\iint_{S_j}\frac{\partial}{\partial n_\xi}\frac{1}{R(\underline{X_i};\xi)}ds,$$

$$S_{ij}^P = \frac{-1}{4\pi}\iint_{S_j}\frac{\partial}{\partial n_\xi}\frac{1}{R(\underline{X_i};\xi)}ds,$$

$$W_{im}^P = \frac{-1}{4\pi}\iint_{(S_W)_m}\frac{\partial}{\partial n_\xi}\frac{1}{R(\underline{X_i};\xi)}ds,$$

따라서 계측부의 벽면에 의한 유기 포텐셜의 항을 제외한 모든 수식은 단독 프로펠러의 성능해석 과정과 동일하게 되었으므로, 이진태[7]의 논문에서 보인 바와 같은 수치해석 방법을 통하여 프로펠러 해석을 수행할 수 있다.

3.2 수치 계산

양력판 이론에 의한 단독특성 수치 계산에 사용된 프로펠러는 KP069로써, 직경 250mm, 날개수 5개, 프로펠러 설계 전진계수 0.889 및 평균 피치비가 1.178이다. 프로펠러의 계산 범위는 작동평면 위치 기준으로, $J = 0.2,\ 0.6,\ 0.889,\ 0.989$로 하였다. 격자 분할 개수는 프로펠러 날개 단면의 코오드방향 40개, 반경방향 10개 이고, 허브 길

이방향 10개, 원주방향 5개를 사용하였다.

공동수조의 위벽효과에 대한 계산은 계측부 벽면 형상을 원통으로 대체하고, 원통의 단면적 C를 변화시키면서 수행하였다. 프로펠러 작동 원판 면적 S 대비 무차원화 $\alpha(=S/C)$값 기준으로, α = 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25의 변화를 주었다. 원통의 반경 대비 프로펠러 반경의 무차원화 값은 $R_{wall}=\sqrt{1/\alpha}$이 되고, 실험에 사용된 공동수조의 경우 α = 0.136, R_{wall} = 2.708 이다. 원통 벽면의 길이는 상류방향으로 반경의 1.5배, 하류 방향으로 2.0배로 하였으며, 격자 분할 개수는 원통의 길이 방향 50개, 원주방향 16개를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

예인수조와 공동수조에서의 정확한 프로펠러 단독특성 차이를 비교하기 위해서는 우선 레이놀즈수의 변화에 대하여 안정적인 실험값을 얻는 것이 중요하다. 본 논문의 경우 공동수조의 동력계 2종류와 대상 프로펠러 전진속도 3가지에 대한 레이놀즈수의 변화를 관측한 결과, 레이놀즈수 R_N 0.8~1.0 x 10^6 범위가 가장 적절하였다. 이러한 레이놀즈수 범위에서 수행한 실험 결과를 예인수조에서의 결과와 비교하여 **Figure 4**와 **Figure 5**에 나타내었다.

Figure 4와 **Figure 5**는 각각 공동수조의 H41 동력계와 J25 동력계를 사용한 비교 결과를 보이고 있고, 프로펠러 전진속도의 무차원화 계수 J 대비 추력 및 토크도 각각 무차원화 값 $K_T=T/\rho n^2D^4$, $K_Q=Q/\rho n^2D^5$로 표시하였다. 프로펠러 전진계수 J 는 공동수조에서의 유속이므로, 유속 V_c 또는 u' 계측 위치에 따라 J_W 및 J_P로 표시하고 각각 프로펠러 상류 및 작동 평면 위치에서의 값을 나타낸다. 예인수조에서의 추력과 토크는 각각 실선과 점선으로, 공동수조의 유속 J_W 및 J_P 에서는 각각 사각형과 삼각형 기호로 구분하여 표시하였다.

Figure 4에서 J_W 대신 J_P 를 적용한 결과, 예인수조에서의 추력과 토크와의 차이가 현저히 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 추력 및 토크 기준에서 유속 u'이 V_c 보다 줄어들면서 예인수조 유속 V_o 에 더 가까워지는 것으로써, 위벽효과의 수정 량을 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

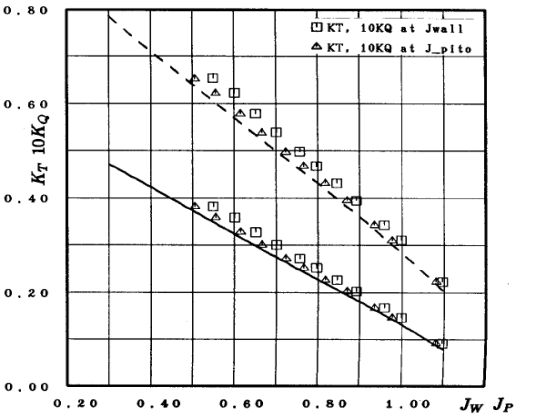


Figure 4: Results of POW test for the KP215 propeller(H41 dynamometer setting).

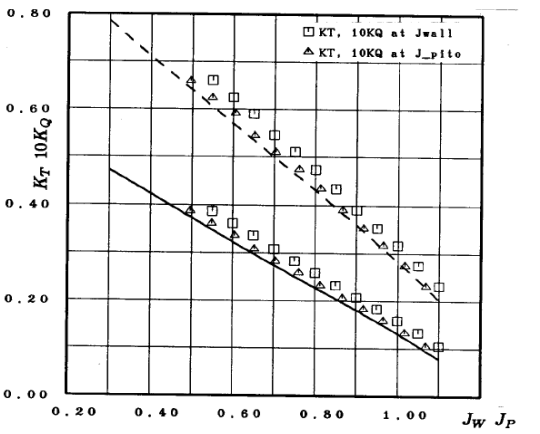


Figure 5: Results of POW test for the KP215 propeller(J25 dynamometer setting).

이러한 결과는 프로펠러축이 상류에 위치한 J25 동력계에 대한 **Figure 5**에서도 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 **Figure 4**와 **Figure 5**를 상대적으로 비교해 보면 사용하는 동력계에 따라서도 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 J25 동력계 축 주위의 국부유동으로 인한 것으로 추정할 수 있으나, J_W 대신 J_P 를 적용한 경우에는 그런 차이조차도 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 J_P 의 u' 이 위벽효과뿐만 아니라 이와 같은 대부분의 다른 특성들도 포함하고 있기 때문

이라고 판단할 수 있다.

이제 양력판 이론에 의한 KP069 프로펠러 평면에서의 위벽효과 계산 결과를 정리하면, **Table 2**와 같다. 설계속도 J_P =0.889 중심으로 보이고 있으며, 임의의 프로펠러에 대해서도 적용할 수 있도록 추력일치법에 의한 부하계수 K_T/J_P^2를 나타내었다. 또한 수치계산 결과를 이용하여, J_P 에 대응하는 무한유체 중의 전진계수 J_O 를 찾아내고 본 논문의 중형 공동수조에 해당하는 위벽효과 J_O/J_P 를 나타내었다.

따라서 양력판 이론에 의한 수치계산으로부터 구한 위벽효과를, **Table 3**과 같이 추력일치법을 이용하여 **Figure 4**의 결과에 설계속도를 중심으로 적용하였다.

Table 2: Wall effects calculated by lifting panel theory for the KP069 propeller in the medium size cavitation tunnel.

J_P	K_T(cal.)	K_T/J_P^2	J_O	J_O/J_P
0.889	0.218	0.2758	0.879	0.988
0.989	0.154	0.1574	0.984	0.995

Table 3: The wall effect correction for the KP215 propeller by the method of the thrust identity.

J_P	K_T(exp.)	K_T/J_P^2	J_P'/J_P	J_P'
0.875	0.205	0.2678	0.989	0.865
0.987	0.150	0.1540	0.995	0.982

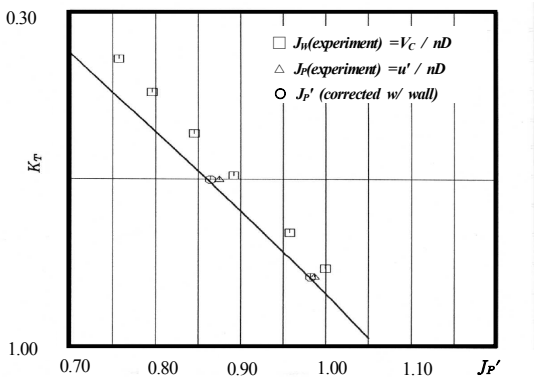


Figure 6: Results of wall effect correction by J_p'

Table 3에서 J_P'/J_P 은 K_T/J_P^2 대비 J_O/J_P 관계로부터 구하였으며, J_P'은 **Figure 4**의 결과에 프로펠러 평면에서의 위벽효과를 보정한 값을 나타내고 있다. 이러한 결과는 **Figure 6**에 나타낸 바와 같이, 실선으로 표시된 예인수조에서의 추력과 더욱 더 좋은 일치를 보임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 공동수조와 예인수조에서의 프로펠러 단독특성 차이를 보정할 수 있는 위벽효과 연구를 수행하였으며, 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 공동수조의 실험에서 프로펠러 작동 평면 위치에서 계측된 유속을 프로펠러 전진속도로 정의하면, 위벽효과수정 량 및 단독특성차이를 현저히 줄일 수 있다.

2. 양력판 이론에 의한 공동수조에서의 단독특성 계산을 통하여 위벽효과를 구하고, 앞의 결과에 추가적인 보정을 수행할 경우 예인수조에서의 단독특성과 더욱 더 좋은 일치를 보여 주는 것을 확인하였다.

3. 따라서 향후 여러 가지 제원의 프로펠러에 대한 추가 계산을 수행하면, 본 연구에서 사용한 중형 공동수조와 예인수조의 단독특성 차이를 정확하게 보정할 수 있는 위벽효과 상관관계식 정립이 기대된다.

참고문헌

[1] R. M. Wood and R. G. Harris, "Some note on the theory of an airscrew working in a wind channel", ABC R and M, No. 662, 1920.

[2] 이창섭, 김기섭, 이진태, "캐비테이션 터널에서의 모형시험을 위한 예비조사에 관한 연구", 한국기계연구소 보고서, UCE73-126 ·D, 1982.

[3] 김기섭, 이창섭, "프로펠러 단독특성에 미치는 Reynolds 수의 영향(I)", 한국기계연구소보, 제14집, 1985.

[4] K.-S. Kim, K.-Y. Kim and J.-W. Ahn, "Experimental correlation analysis of propeller open water characteristics at

towing tank and cavitation tunnel", J. of the SNAK, vol. 37, no. 1, pp. 26-39, 2000(in Korean).
[5] Hoshino, "Steady on tunnel wall effects in testing model propellers in a cavitation tunnel", 三菱重工技報 vol. 13, 1976.
[6] S. -B. Suh, K.-S. Kim and J.-C. Suh, "A study on tunnel wall effects in propeller open water test in a cavitation tunnel", J. of Ships & Ocean Eng., vol. 14-15, pp. 48-57, 1993(in Korean).
[7] J.-T. Lee, A Potential based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow, Ph.D. Thesis, Dept. of Ocean Engineering, M.I.T, 1987.
[8] 안종우, "LDV를 이용한 Tunnel 평균 유속측정 및 Uniformity 측정", KRISO, Propulsor Lab. Reports KQTN12, 1985.

저 자 소 개

서성부(徐晟釜)

1984년 부산대 조선공학과 (공학사), 1986년 부산대 조선공학과(공학석사), 2002년 부산대 조선해양공학과(공학박사), 1989년 - 1995년 한국기계연구원(선임연구원), 2005년 -현재 동의대 조선해양공학과(교수). 관심분야: 선박유체, 추진장치, 해양레저장비

김기섭(金基燮)

1977년 부산대 조선공학과 (공학사), 1979년 부산대 조선공학과(공학석사), 1995년 한국과학원 기계공학과(공학박사), 1979년 - 현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(책임연구원) 관심분야: 기계공학, CFD, 추진장치,