大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 37 卷 第 1 號 2000年 2月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 37, No. 1, February 2000

Reynolds수, 표면거칠기 및 공기함유량이 모형프로펠러 캐비테이션 성능에 미치는 영향

김기섭*, 김경열*, 안종우*, 이진태*

Effect of Reynolds Number, Leading Edge Roughness and Air Content on the Cavitation Performance of Model Propellers

by

Ki-Sup Kim*, Kyung-Youl Kim*, Jong-Woo Ahn* and Jin-Tae Lee*

요 약

모형 프로펠러 날개의 레이놀즈 수와 날개 앞날 표면거칠기 그리고 터널용수의 공기함유량이 모형 프로펠러의 캐비테이션 초기발생, 캐비테이션 발생량 및 변동압력에 미치는 영향을 캐비테이션 터널에서 실험적으로 조사하였다.

'Sydney Express' 컨테이너선의 모형 프로펠러 캐비테이션 관찰과 변동압력 계측결과를 타 연구기관의 모형실험 결과와 실선 프로펠러의 캐비테이션 관찰 및 변동압력 계측치와 함께 비교하였다. 그 결과 매우 타당한 결과를 보여주었다.

Abstract

The effects of Reynolds number of model propeller leading edge roughness and air content resolved in tunnel water on cavitation inception, cavitation extent and pressure fluctuation were investigated experimentally by using two model propellers in a cavitation tunnel.

Cavitation observation and propeller induced fluctuating pressure measured in the present model test were compared with the model test results of other research institutes and the full-scale data of a German container ship (Sydney Express). The comparison shows a reasonable agreement.

접수일자 : 1998년 12월 15일, 재접수일자 : 1999년 8월 23일
* 정회원, 한국해양연구소 선박해양공학분소 해양운송시스템연구센터

1. 서언

선박이 고속화, 대형화됨에 따라 선박성능 고도화를 위하여 실선 프로펠러의 캐비테이션 및 선미 변동압력에 대한 정확한 추정이 더욱 중요해지고 있다. 실선 프로펠러와 모형 프로펠러의 상관관계를 분명히 하기 위해서는 모형시험을 통하여 반류재현의 정확도, 캐비테이션 종류, 발생범위 및 이로 인한 선미 변동압력 등에 대하여 보다 정확하게 정성적 및 정량적인 파악이 요구된다. 캐비테이션 터널에서 모형 프로펠러 캐비테이션 실험을 할 때 실선 프로펠러의 주위유동과 특성이 같도록 여러가지 역학적 상사법칙들을 만족시켜야 하지만 모형시험에서 이를 모두 만족시키는 것은 불가능하다[1]. 따라서 실선과 모형 프로펠러의 상관관계 정립에 많은 어려움이 있다. 특히, 실선 프로펠러의 캐비테이션은 안정된 거동을 보이나 모형 프로펠러 캐비테이션은 불안정한 거동을 보이는 경우가 많다[2, 3].

이러한 문제점 해결을 위하여 캐비테이션 발생 관련 많은 실험적 연구가 되어왔다. Noodzij[4]는 캐비테이션 거동이 안정되게 하기 위해서 전기분해로 물속에 nuclei를 증가시켰고, Kuiper[5, 14]는 모형프로펠러 날개표면의 경계층과 캐비테이션 발생과의 관계를 살펴보고자 날개의 앞날 근처에 부착한 표면 거칠기와 nuclei양에 대한 영향을 조사하였다. Kato[6]는 역시 캐비테이션을 안정되게 하기 위해서 공기함유량 증가를 제안하였다. Silverleaf 등[7]은 공기함유량의 변화에 따른 프로펠러 추력 및 토오크의 변화를 조사하였고 Ishii 등[2]은 날개 표면 거칠기의 정도와 물속의 공기함유량이 캐비테이션에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 바 있다. Kim[8, 9]은 레이놀즈 수가 프로펠러 특성에 미치는 영향과 심수 대형수조(towing tank)와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 단독특성의 상호관계[10]를 조사하였다. ITTC 캐비테이션 분과위원회[11]에서는 'Sydney Express' 컨테이너선의 실선 프로펠러와 각 기관별 모형 프로펠러의 캐비테이션 관찰과 변동압력계측 시험결과를 비교한 바 있다. 본 연구에서도 해당하는 모형프로펠러의 캐비테이션을 관찰하고 변동압력을 계측하여 상호 비교하였으며 균일류와 불균일류중에서 프로펠러 날개의 레이놀즈 수, 표면거칠기 및 공기함유량의 변화가 캐비테이션 초기발생, 캐비테이션 발생 정도 및 선미 변동압력에 미치는 영향을 체계적인 실험을 통하여 조사하였다. 그리고 캐비테이션 터널에서 모형 프로펠러에 의한 변동압력 계측을 위하여 사용되는 변동압력판 존재로 인한 프로펠러 상 효과(Image effect)에 따른 캐비테이션 형상변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

모형 프로펠러 실험은 당 연구소의 심수 대형예인수조와 캐비테이션 터널[단면적:60cm×60cm, 최대유속:12m/sec, 압력조절:0.2atm ~ 1.9atm]에서 수행되었다[12]. 캐비테이션 터널용수의 공기함유량 조절은 캐비테이션 터널에 설치된 degassing chamber와 compressor로 조절된다[13]. 프로펠러 날개의 레이놀즈 수는 유입속도와 프로펠러 회전수를 변화시켜 선택한다.

날개표면 거칠기는 19차 ITTC[11]에서 추천한 날개 앞날의 압력면과 흡입면에 코오드 길이의 5% 범위(약 2mm정도)에 63㎛ 크기의carborundum 을 부착시켰다. Ishii[2]에 의하면 모래알의 크기가 40㎛ 이상이면 모래알의 크기 변화에 따라서 추력 과 토오크에 영향이 적은 것을 실험적으로 보여주고 있어서 63㎛는 타당한 것 같다.

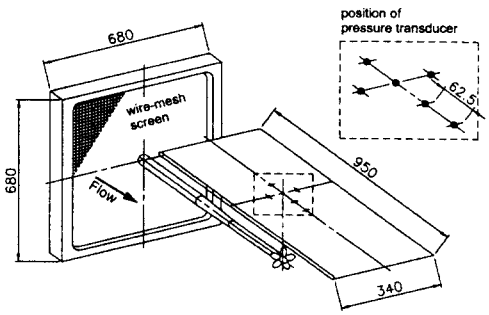


Fig.1 Arrangement of wire-mesh screen and flat plate for measurement of fluctuating pressure.

Table 1 Principal particulars of model propellers

Items \ Propeller No.	KP256	KP272
Dia.(mm)	250.0	250.0
Pitch ratio(P/D)	0.820	0.935
Expended area ratio(A_E/A_O)	0.623	0.780
Boss ratio	0.180	0.167
No. of blades	5	5
Blade section	NACA66	Modified Elliptic

예인수조에서는 H29 프로펠러 동력계(down stream shaft형), 캐비테이션 터널에서는 J25 (upstream shaft형)를 사용하였다. 선체반류는 반류스크린으로 재현하고, 변동 압력계측은 Fig.1에서 보는 바와 같이 변동압력 계측용 수평판을 터널 관측부에 설치하여 수행된다.

실험대상 모형 프로펠러는 2개인데 첫 번째는 Sydney express선의 모형 프로펠러(KP272)이며 이 프로펠러는 modified elliptic형의 날개 단면을 갖는다. 두 번째 프로펠러는 KP272와 날개수가 동일하고 전개면적비와 피치비가 유사한 모형 프로펠러(KP256)로 일반적으로 선박용 프로펠러에 많이 사용하는 NACA 단면을 갖는다. 모형 프로펠러들의 제원은 Table 1에서 보인다.

$J_W(=V_W/(n\cdot D))$는 캐비테이션 터널 벽에서의 압력으로부터 계산[1,12]된 터널 유속인 V_W을 사용한 프로펠러 전진계수이고, J_A는 수조에서 전차속도 V_A를 사용한 전진계수 또는 수조의 프로펠러 단독특성실험 결과로부터 추력일치법에 의해 환산된 전진계수를 표시한다. n은 축 회전수(rps)이고 D는 프로펠러 직경이다. 레이놀즈수, R_n $(=(C_{0.7R}\cdot n\cdot D\cdot\sqrt{J^2+(0.7\pi)^2})/\nu)$은 날개의 0.7R에서 코오드 길이($C_{0.7R}$)로 계산된다. ν는 동점성계수이고, σ_n $(=(P_\infty-P_v)/(\frac{1}{2}\rho n^2D^2$))은 날개의 0.7R에서 캐비테이션 수, σ_i는 캐비테이션 초기발생시 캐비테이션 수를 나타낸다.

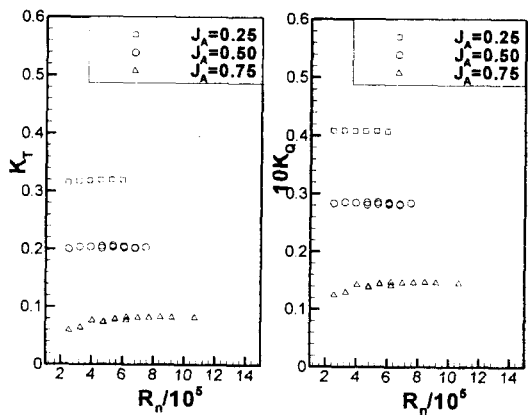


Fig.2 Effect of Reynolds No. on thrust and torque of KP256 propeller with smooth leading edge at towing tank.

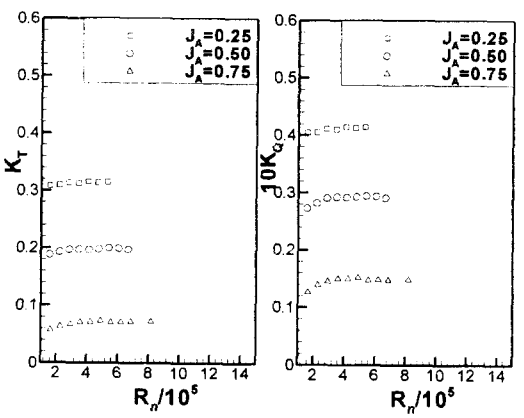


Fig.3 Effect of Reynolds No. on thrust and torque of KP256 propeller with roughened leading edge at towing tank.

3. 모형프로펠러 단독특성

프로펠러 단독특성 시험시의 축 회전수 선정은 각각의 전진계수에서 레이놀즈 수가 증가해도 추력계수와 토오크 계수가 변하지 않는 레이놀즈 수에 해당하는 회전수를 선택해야 한다[8, 9, 10]. 따라서 이러한 회전수를 얻기 위하여 레이놀즈 수에 대한 추력과 토오크 계수의 변화를 실험적 방

법으로 조사한다. 본 논문에서는 수조에서 행하는 이런 실험을 'Rey-T', 터널에서는 'Rey-Q'라 칭한다. KP256에 대해 수조와 터널에서 표면 거칠기유무에 따른 안정된 계측치를 보여주는 R_n의 범위는 다음과 같다. Fig.2(수조, 매끈한 앞날)에서는 $R_n \geq 5.0\times 10^5$, Fig.3(수조, 앞날 거칠기 존재)에서는 $R_n \geq 3.5\times 10^5$, Fig.4(터널, 매끈한 앞날)에서는 $R_n \geq 5.0\times 10^5$ 그리고 Fig.5(터널, 앞날 거칠기 존재)에서는 $R_n \geq 4.0\times 10^5$이다. Fig.6에서 KP272는 수조와 터널에서 거칠기 유무에 따라 계측치의 안정도를 보여준다. 일반적으로 표면이 거칠 경우가 매끄런 표면보다 더 낮은 R_n에서 수렴성을 보이며 표면거칠기는 추력 계수는 보다 적게, 토오크 계수는 보다 크게 작용한다.

Fig.7과 Fig.8은 KP256 및 KP272에 대하여 수조와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 날개 표면 거칠기의 유무에 따른 단독특성을 보여주며, 실험조건은 Rey-T 및 Rey-Q 실험결과로부터 수조에서는 $R_n \geq 5.3\times 10^5$, 터널에서는 $R_n \geq 14\times 10^5$으로 충분히 높은 R_n범위에서 선정하였다. 터널에서의 프로펠러 단독특성은 Kim등[10]이 제안한 수조와 터널에서 프로펠러 단독특성의 상관계수(k)를 적용하여 비교하였다. 수조와 터널에서의 프로펠러 단독특성 결과는 비교적 잘 일치하고 있으며, 앞날에 거칠기가 있는 경우에는 거칠기가 날개 단면의 점성저항을 증가시키므로 표면이 매끈한 경우에 비하여 추력의 감소와 토오크의 증가를 나타낸다. 표면거칠기가 있을 때와 없을 때 단독특성의 차이를 보면 KP256이 KP272보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 KP256 날개에 표면거칠기의 부착량이 KP272보다도 조금 많았던 탓으로 생각된다.

4. 캐비테이션 초기발생

캐비티 발생후에는 그 내부압력은 증기압(vapor pressure)에 가깝지만 캐비티가 없는 상

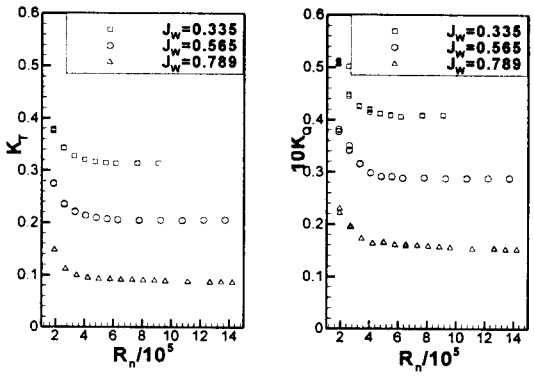


Fig.4 Effect of Reynolds No. on thrust and torque of KP256 propeller with smooth leading edge at cavitation tunnel.

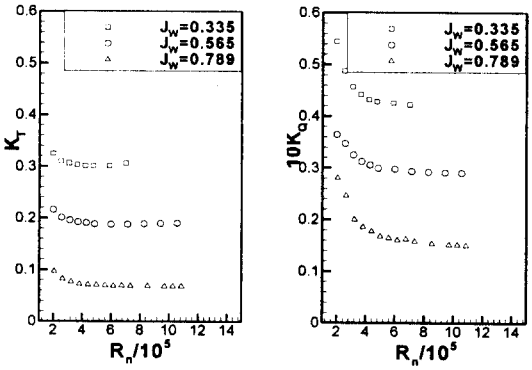
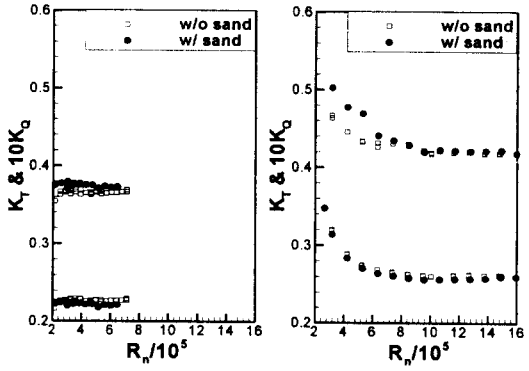


Fig.5 Effect of Reynolds No. on thrust and torque of KP256 propeller with roughened leading edge at cavitation tunnel



a)towing tank b)tunnel

Fig.6 Effect of Reynolds No. on thrust and torque of KP272 propeller.

태에서 처음으로 발생하기 위해서는 주위 유체 압력이 증기압 보다 더 낮아져야 한다. 이러한 캐비테이션 초기발생은 물속에 함유되어 있는 고체입자, 공기함유량 및 날개표면의 거칠기 정도 등에 따라 발생점이 달라지는데 수치해석으로는 어렵기 때문에 실험적으로 그 성능을 검증하게 된다[5]. 대상 모형프로펠러는 KP256이고, 균일류중에서 초기발생 특성을 비교한다. 초기발생 실험에서 선정한 실험조건은 Rey-Q 실험으로부터 레이놀즈 수 증가에 따라 프로펠러 하중이 거의 변화가 없는 영역에서 레이놀즈 수 변화(7.3×10^5~7.6×10^5, 9.1×10^5~9.6×10^5, 11.0×10^5~11.6×10^5), 공기함유량 변화(α/α_s=80%, 50%, 30%) 및 표면거칠기 유무에 따른 특성을 관찰하였다. 여기서 α_s는 표준상태에서 포화 공기함유량이고, α는 현재 공기함유량을 나타낸다.

Fig.9는 날개표면이 매끈할때 공기함유량과 레이놀즈 수 변화에 따른 캐비테이션 초기발생의 특성을 보인다. 공기함유량이 클때(α/α_s=80%)는 흡입면 캐비테이션 초기발생이 레이놀즈 수 변화에 따라서 σ_i가 약 1.0정도 차이를 보이지만, 압력면 캐비테이션 초기발생점에는 거의 영향을 주지 않는다. 공기함유량이 비교적 낮은 α/α_s=50%, 30%일 때는 전반적으로 레이놀즈 수 변화가 초기발생에 미치는 영향이 점점 적어짐을 알 수 있다. 그러나 이 경우에도 흡입면 캐비테이션 초기발생 영역에서 레이놀즈 수가 클수록 σ_i는 약간 큰 값을 나타내는 경향이 있다. 본 실험결과에서 레이놀즈 수가 초기발생에 미치는 영향이 비교적 적고 안정된 실험치를 보여주는 이유는 Rey-Q실험을 통해서 알 수 있듯이, 초기발생 실험시 선정한 실험조건이 프로펠러 전체 하중 관점에서 이미 레이놀즈 수의 영향이 거의 없는 범위에서 선정되었기 때문이다. 따라서 이와 같이 레이놀즈 수가 충분히 큰 경우에는 초기발생에 미치는 영향이 비교적 적으며 레이놀즈 수가 작은 경우에는 큰 차이를 보인다. 따라서 캐비테이션 초기 발생실험도 충분히 큰 레이놀즈 수에서 수행되어야 함을 알 수 있다.

Fig.10은 캐비테이션 터널의 물 속에 포함된 공기함유량 변화에 대해서 프로펠러 날개표면이 매끈하고 균일류 상태에서 캐비테이션 초기발생 특성을 보인다. 물론 Rey-Q를 통하여 충분히 큰 레이놀즈 수에서 수행되었다. 프로펠러 회전수 20rps에서 공기함유량이 클 때(α/α_s=80%)는 작을 때(α/α_s=50%, 30%)에 비하여 초기발생 곡선이 높은 전진계수 방향으로 평행 이동된 것처럼 보인다. 따라서 흡입면 캐비테이션의 초기발생

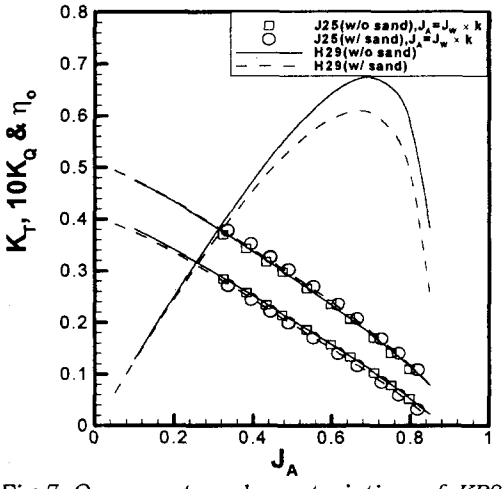


Fig.7 Open water characteristics of KP256 propeller

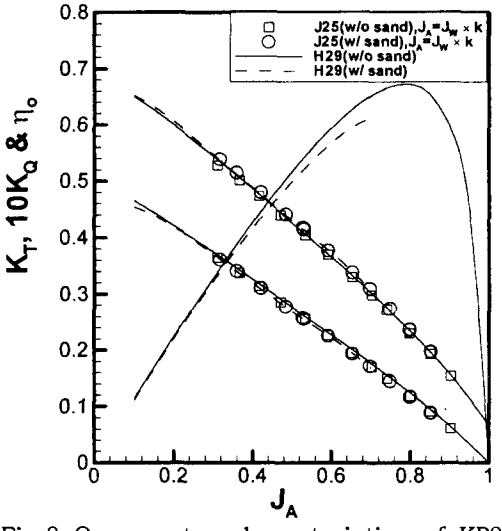
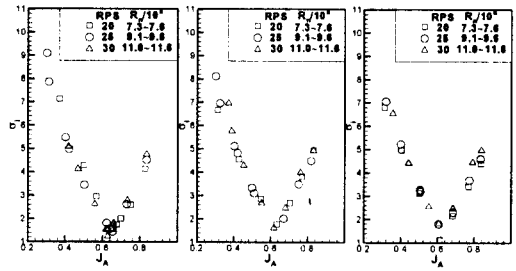
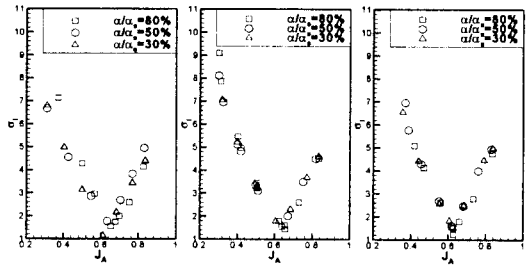


Fig.8 Open water characteristics of KP272 propeller



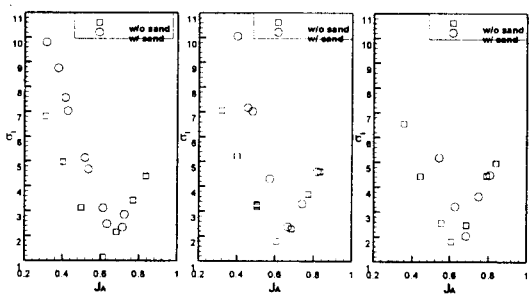
a) α/α_s=80% b) α/α_s=50% c) α/α_s=30%

Fig.9 Effect of Reynolds No. on cavitation inception of KP256 propeller with smooth leading edge in uniform flow.



a)20rps b)25rps c)30rps

Fig.10 Effect of air contents on cavitation inception of KP256 propeller with smooth leading edge in uniform flow.



a)20rps b)25rps c)30rps

Fig.11 Effect of leading edge roughness on cavitation inception of KP256 prop-eller in uniform flow.(α/α_s=30%)

은 공기함유량이 높을때 더 빨리 발생하고, 압력면 캐비테이션의 초기발생은 공기함유량이 높을 때 오히려 지연된다. 프로펠러 회전수가 30rps, 즉 높은 레이놀즈 수 영역에서는 공기함유량의 변화가 캐비테이션 초기발생에 미치는 영향이 매우 적은 것을 보인다.

Fig.11은 공기함유량이 30%일때 표면거칠기 존재유무에 따라서 초기발생의 특성차이를 보여준다. 표면거칠기가 있는 경우에는 흡입면 캐비테이션 초기발생은 캐비테이션 수가 약 2.0만큼 큰값에서 일어나며, 압력면 캐비테이션 초기발생은 거칠기 존재 여부에 무관하게 서로 비슷하게 나타난다. 이것은 흡입면에서는 거칠기 자체에 의해 캐비테이션 초기발생이 빨라지고 압력면에서는 음의 입사각을 받을 때 유체 흐름 방향으로 단면 형상 변화가 급격하기 때문에 거칠기의 영향이 적은 것으로 생각된다.

5. 캐비테이션 관찰

모형프로펠러의 캐비테이션 발생량 및 유형은 캐비테이션 발생에 의한 변동압력, 수중 방사소음, 추력감소 및 날개침식 등 프로펠러 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 모형실험으로부터 실선 프로펠러의 캐비테이션 특성 예측의 신뢰성을 향상시키고, 모형실험법의 개선을 위해서 캐비테이션 발생에 영향을 주는 변수들에 대한 연구가 요구된다. 이러한 목적으로 공기함유량, 표면거칠기 및 레이놀즈 수 변화에 대하여 균일류 및 반류중에서 캐비테이션 발생에 미치는 영향을 실험적으로 조사한다. 모형프로펠러는 그 특성이 다른 KP256과 KP272를 선택하였다. 그리고 변동압력판의 존재에 따른 상 효과가 캐비테이션 발생에 미치는 영향을 살펴본다.

5.1 균일류중에서 캐비테이션

Fig.12는 KP256에 대해서 레이놀즈 수, 표면거칠기 유무 및 공기함유량 변화에 대한 캐비테이션 발생량 변화를 보인다. 선정한 프로펠러 회전수는 Rey-Q로부터 추력계수가 수렴한 레이놀즈 수 범위에서 선택하였다. 공기함유량은 30%, 50

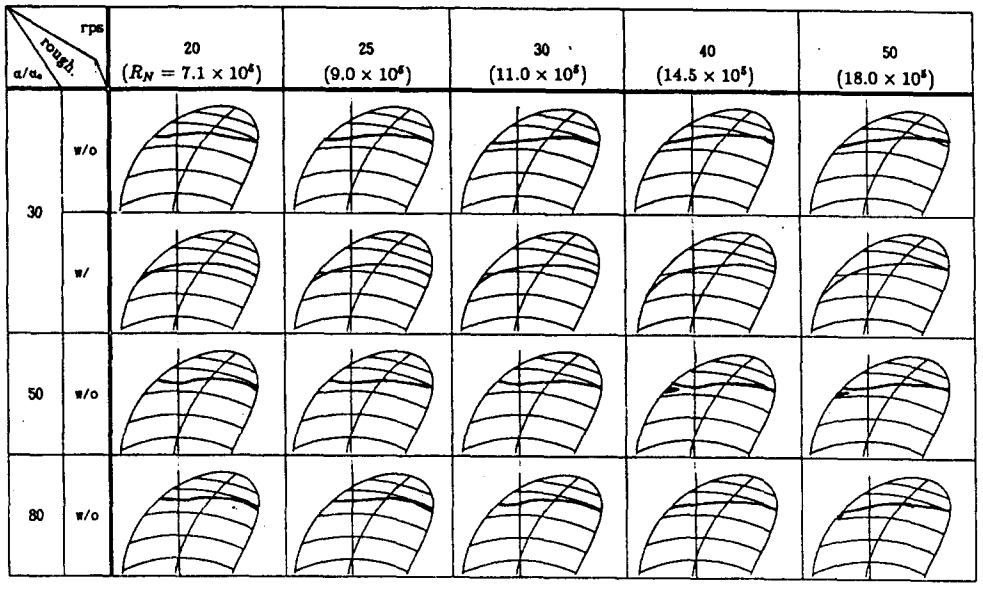


Fig.12 Effect of experimental parameters on cavitation patterns of KP256 propeller in uniform flow (J_W=0.5, σ_n=1.5, θ=0°).

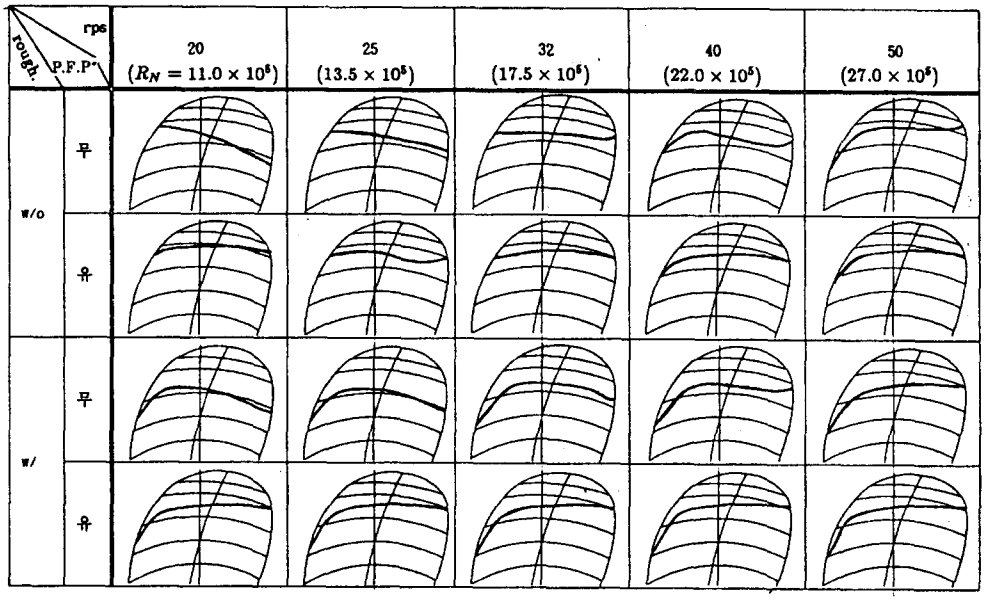


Fig.13 Effect of experimental parameters on cavitation patterns of KP272 propeller in uniform flow (J_W=0.6, σ_n=1.4, α/α_s=30%, θ=0°).

% 및 80%로 변화시켰으며, 공기함유량이 30%인 경우에는 표면거칠기가 있을 때에도 캐비테이션 발생량을 비교하였다.

공기함유량이 30%이고 표면거칠기가 없는 경우에는 캐비테이션 발생의 경계선에서 약간의 불안정한 거동이 관찰되었으나 육안으로 평균하여 캐비티 형상을 스케치하였다. 날개 표면이 매끈할 때 레이놀즈 수가 증가함에 따라서 코오드 중앙(mid-chord)에서부터 후부영역에서는 그 양은 적으나 캐비테이션 발생선이 날개끝(tip) 쪽으로 이동하고, 날개의 앞날 근처에서는 허브(hub) 방향으로 캐비티 발생점이 이동하게 된다. 공기함유량이 다른 경우에도 유사한 경향을 보이며, 표면거칠기가 있는 경우에도 유사한 경향을 나타낸다. 이것은 낮은 레이놀즈 수에서는 점성유동의 영향으로 인하여 날개의 앞날 근처에서 압력 피크(pressure peak)가 적게되고 또한 코오드 후반부에서는 표면압력이 포텐셜 유동에 가까울 때 압력보다 낮게 되어, 코오드 후반부에서는 캐비테이션 발생면적이 상대적으로 커진다.

표면거칠기가 있을 때는 표면이 매끈할 때보다 캐비테이션 발생량이 비교적 많은 편이다. 이것은 표면거칠기가 날개주위 유동을 난류로 촉진하며 캐비테이션 발생에 핵으로 역할을 하기 때문이다[2]. 그리고 캐비테이션 발생 유형은 표면이 매끈할 때와 마찬가지로 날개단면 끝날 근처에서는 캐비티 발생선이 날개끝 쪽으로, 그리고 앞날 근처에서는 허브쪽으로 이동하게 된다.

Fig.13은 KP272 모형프로펠러에 대해서 공기함유량 30%인 상태에서 레이놀즈 수, 표면거칠기 유무 및 변동압력판(P.F.P.) 존재유무에 따른 캐비테이션 발생량에 미치는 영향을 보인다. 표면이 매끈하고 변동압력판을 사용하지 않을 때에는 앞날과 뒷날 근처에서 캐비테이션 발생선 위치이동과 발생량의 변화가 KP256보다 훨씬 크다. 높은 레이놀즈 수에서는 포텐셜 유동과 유사하게 되어 앞날 근처의 압력 피크가 매우 커지고, 코오드 후방에서는 상대적으로 압력이 높아져서, KP256의 경우와 같이, 앞날의 캐비테이션 발생점은 허브쪽으로 내려오고, 뒷날쪽은 날개끝 쪽으로 이동하게 된다. KP256과 유사한 경향은 보이나 캐비티 발생점 위치이동의 차이가 크다. 따라서, 날개 단면의 하중분포특성을 조사하기 위해서 실험조건과 같은 하중상태에서 프로펠러 성능해석용 포텐셜 코드인 KPD2[15]로 프로펠러 하중분포를 수치계산 하였다. Fig.14에서 보는 바와 같이 날개끝 근처에서 날개 앞날쪽 순환값(Γ)이 매우 커져서 KP272가 KP256보다 레이놀즈 수 변화에 대하여 캐비테이션 양상이 더욱 심하게 변화함을 유추할 수 있다.

표면거칠기가 있는 경우를 살펴보면 앞날 근처에서는 캐비테이션의 발생범위가 반경 방향으로 증가하며 코오드 후방은 표면거칠기가 없을 때와 거의 비슷한 캐비테이션 형상을 나타낸다. 이것은 앞날 근처 표면거칠기가 코오드 전반부의 캐비테이션에 주로 영향을 주고 후반부에는 거의 영향이 없는 것을 보여준다. 즉, 표면거칠기는 날개 앞날 근처의 압력 피크가 성장하도록 함으로써 전반적으로 캐비테이션 발생이 안정(stable)되도록 촉진시킨다. 그러나 KP256의 경우에 표면거칠기가 있을 때 코오드의 후반부에도 영향을 주는 것은 KP272보다 거칠기 부착량이 상대적으로 조금 더 많았기 때문으로 생각된다. 이것은 3장에서 설명된 바와 같이 표면거칠기 유무에 따른 단독특성 실험결과 차이에서도 그 차이를 볼 수 있다. 표면거칠기가 없는 경우와 같은 경향을 갖는다.

변동압력판의 존재유무가 캐비테이션 발생량에 미치는 영향을 살펴본다. Fig.13에서 변동압력판이 있을 때는 변동압력판이 없을 때보다 캐비테이션 발생량이 매우 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 변동압력판에 의해서 프로펠러 상 효과 때문에 날개끝 근처의 국부유동의 유속이 가속됨으로써 날개끝 근처(outer radius)의 날개 단면에서 유효 입사각(effective angle of attack)의 감소로 부하가 감소되어 캐비테이션 발생량이 줄어들게 된다. 물론 변동압력판이 있을때의 추력이 변동압력판이 없을때와 같도록 하기 때문에 판이 있을때는 허브쪽 날개(inner radius)쪽의 부하가 증가하게 된다. 거칠기와 변동압력판이 동시에 있을 때는 레이놀즈 수 변화에 따라 캐비테이션 거

동에는 특별한 차이 없이 매우 안정된 캐비테이션 패턴을 주고 있다. 그 패턴은 거칠기는 있으면서 변동압력판이 없을 때 50rps 경우와 매우 유사하다. 이것은 변동압력판의 상 효과로 인하여 날개 끝 주위 유동이 매우 가속되어 국부적으로 매우 높은 R_n에 이른 것으로 생각된다.

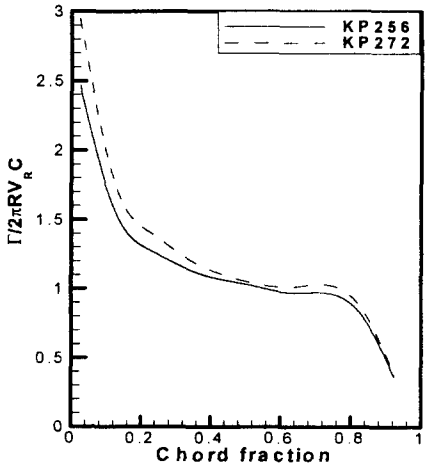


Fig.14 Comparison of calculated chord-wise circulation distributions of KP 256 and KP272 propeller(r/R=0.85).

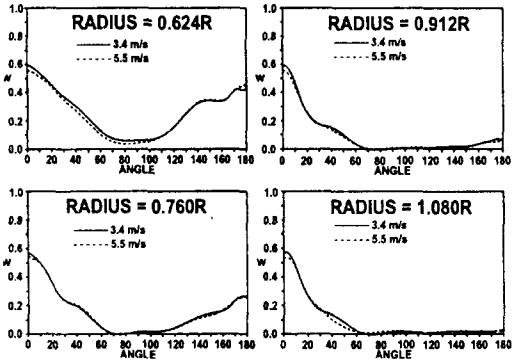


Fig.15 Comparison of circumferential wake distribution at V_W=3.4m/s and 5.5m/s.

5.2 반류중에서 캐비테이션

프로펠러 캐비테이션 실험은 주로 반류중에서 행하므로, 반류중에서 터널수의 공기함유량, 표면 거칠기, 변동압력판 존재유무 및 프로펠러 회전수 변화가 캐비테이션 발생에 미치는 영향을 실험으로 조사한다. 반류중에서는 프로펠러 부하계수 (K_T)를 맞추기 때문에 프로펠러 회전수 변화에 대응해서 터널 유속이 변화하여 프로펠러에 유입되는 반류 분포에 영향을 줄 수 있으므로 정확하게 레이놀즈 수의 영향이라고 하기에는 약간의 어려운 점이 있을 수 있다. 캐비테이션 실험시는 추력일치법을 이용하여 평균유입속도는 알 수있으나, 터널에 반류스크린만 설치된 상태에서는 평균유입속도를 알기는 용이하지 않다. 그러나 터널유속 변화에 대한 반류분포의 차이를 파악하기 위해서 Sydney express선 반류 재현용 스크린에 유속변화에 따른 반류분포의 차이를 Fig. 15에서 본다. 여기서 속도 3.4m/sec, 5.6 m/sec는 반류스크린 바로 하류에서 계측한 V_W 에 해당한다. 이 속도를 정량적으로 평균유입 속도로 환산은 어려우나 터널에서 실제 사용되는 속도범위에 해당한다. 속도가 약 1.6배 증가한 경우 즉, 레이놀즈 수가 1.6배 증가에도 반류 분포에는 큰 차이가 없으므로 이 속도범위에서는 일반적으로 프로펠러 회전수 변화를 변화시켜서 레이놀즈 수 변화로 볼 수있다. 이때 KP256 및 KP272 모형 프로펠러에 사용된 반류는 Fig.16에서 보는 바와 같으며, 캐비테이션 관찰실험 결과는 Fig. 17, Fig. 18과 Fig. 19에서 보인다.

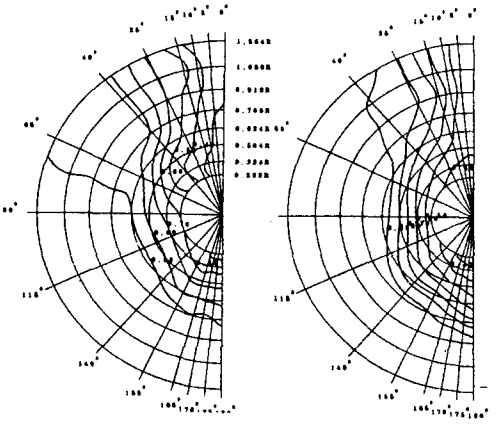


Fig.16 Wake contours for KP256(Left) and KP272(Right).

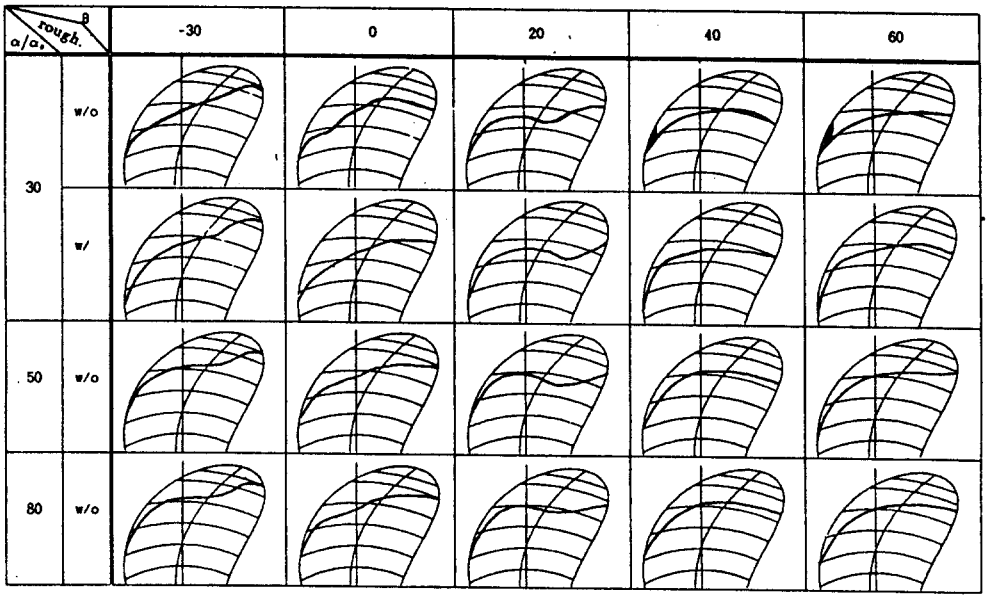


Fig.17 Effect of experimental parameters on cavitation pattern of KP256 in non-uniform flow without P.F.P. ($K_T=0.2510, \sigma_n=3.0, n=20$rps).

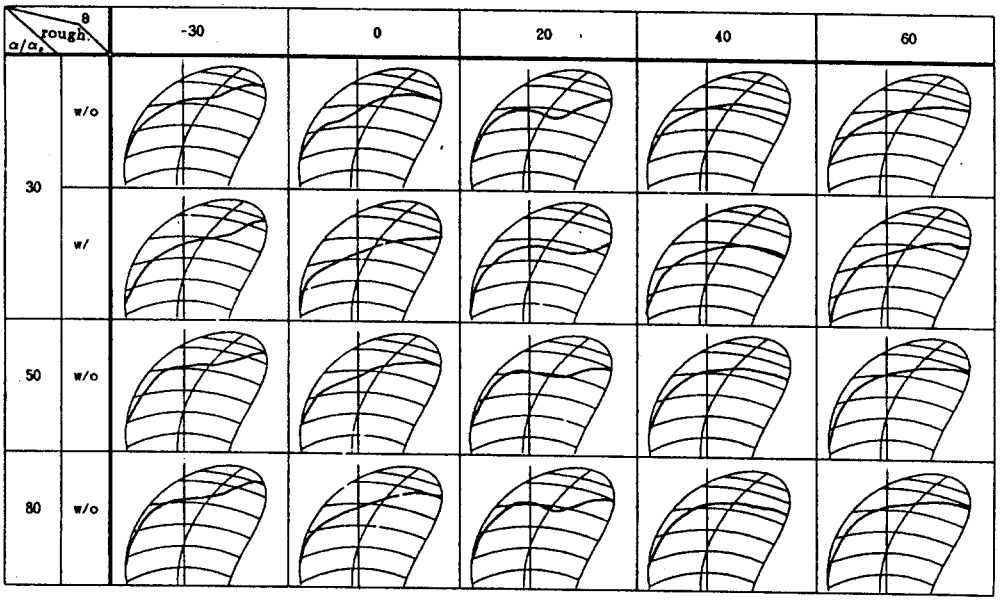


Fig.18 Effect of experimental parameters on cavitation pattern of KP256 in non-uniform flow without P.F.P. ($K_T=0.2510, \sigma_n=3.0, n=30$rps).

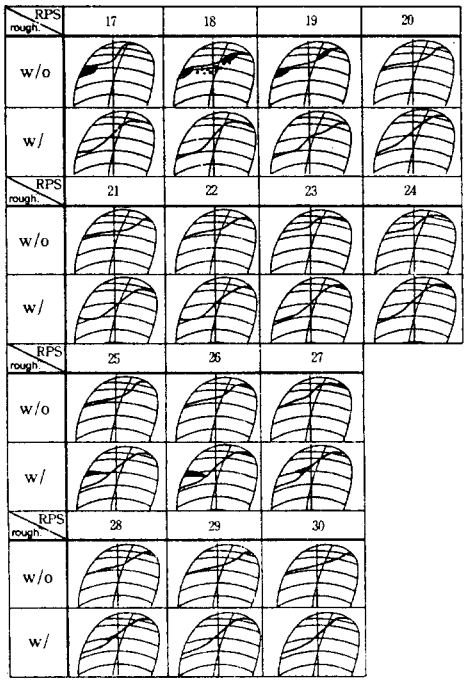


Fig.19 Effect of experimental parameters on cavitation pattern of KP272 in non-uniform flow with P.F.P.(K_T= 0.1840, σ_n=1.826, α/α_s=30%, θ= 0°).

5.2.1 프로펠러 회전수 영향

공기함유량과 표면 거칠기의 변화에 대한 캐비테이션 발생량과 유형 변화는 30rps 보다 20rps의 경우에 다소 크다. 반류중에서도 회전수가 증가함에 따라 즉, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 캐비테이션 발생점이 날개 앞날에서는 허브 쪽으로 이동하나 균일류 중에서만큼 발생점 이동의 변화는 크지 않다. 뒷날에서는 날개끝 쪽으로 이동하며 균일류 중에서와 마찬가지로 표면거칠기가 있을 때는 없을 때에 비해 캐비테이션 발생량이 커지고, 회전수의 증가에따라 앞날의 캐비테이션 발생점이 허브쪽으로 더 내려온다. 이것은 안쪽 반경에 있는 날개단면별 레이놀즈 수가 적으므로 표면거칠기에 의한 영향이 더 민감하기 때문이다.

KP272 프로펠러 경우에는 반류중에서 표면거칠기가 없으며 낮은 회전수 즉, 17~19rps에서는 캐비테이션 발생이 매우 불안정하며 20rps이상이면 발생특성이 안정되고 R_n이 커질수록 발생량도 일정해짐을 알 수 있다.

5.2.2 날개 표면거칠기 영향

KP256과 KP272에 대해서 공기함유량이 30%일 때 표면거칠기 유무에 따라 캐비테이션 발생 정도를 살펴본다(Fig.17 ~ Fig.19). 2개 프로펠러 모두 표면거칠기가 있을 때가 없을 때보다 캐비테이션 발생량이 많고, 날개 앞날과 뒷날 근처에서 캐비티 발생점이 허브쪽으로 내려온다. 표면거칠기가 있는 경우에도 없는 경우와 마찬가지로 레이놀즈 수가 커질수록 날개 앞날에서 캐비테이션 발생은 허브쪽으로 이동하고, 뒷날 쪽의 캐비테이션 발생은 날개끝 쪽으로 이동한다. 따라서 날개표면이 거친 경우에도 프로펠러 회전수에 대한 영향이 있음을 알 수 있다. 이것은 표면거칠기가 캐비테이션 발생의 핵(seed) 역할이 크고 날개 코오드 후반부의 유동조절에는 크게 영향을 주지 못하는 것으로 생각된다.

KP272의 경우에는 코오드의 후반부 영역에서 표면거칠기가 있을 때와 없을 때 공히 캐비테이션 발생 유형과 양이 거의 같다. 그러나 KP256의 경우는 그러하지 않다. 그 이유는 표면거칠기의 밀도가 상대적으로 KP256의 경우가 KP272보다 컸기 때문으로 생각된다.

5.2.3 공기함유량 영향

Fig.17 ~ Fig.19에서 보듯이 반류중에서는 공기 함유량의 변화에 대한 캐비테이션 유형 변화보다도 레이놀즈 수의 변화가 캐비테이션 발생에 미치는 영향이 더욱 큰 것을 알 수 있다.

5.2.4 변동압력 계측판에 의한 상 효과

본 연구에서는 관측부 단면이 적은 터널에서 일반적으로 널리 적용되는 변동압력판(Fig.1)을 사

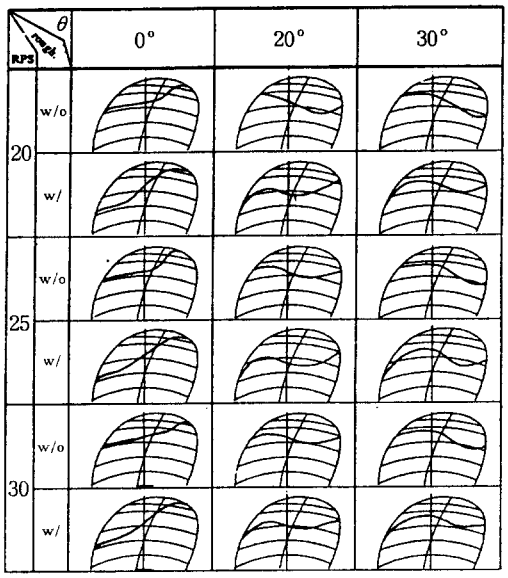


Fig.20 Effect of experimental parameters on cavitation patterns of KP272 in non-uniform flow with P.F.P.(K_T =0.1840, σ_n=1.826, α/α_s=30%).

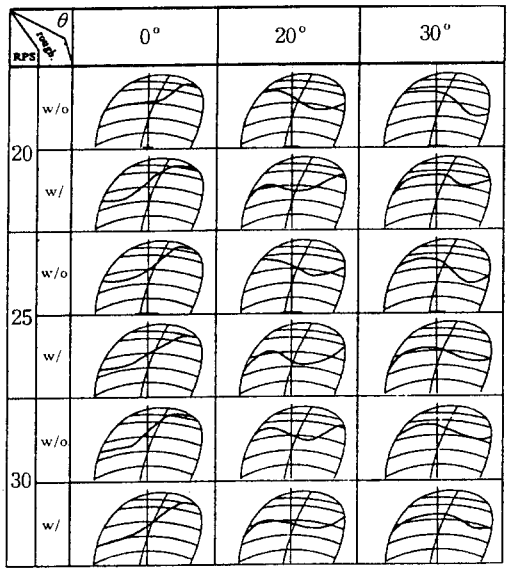


Fig.21 Effect of experimental parameters on cavitation patterns of KP272 in non-uniform flow without P.F.P. (K_T=0.1840, σ_n=1.826, α/α_s=30%).

용한다. 일반적으로 캐비테이션 터널에서 프로펠러 캐비테이션 관찰은 변동압력판이 없는 상태에서 이루어지며 실험조건은 추력일치법을 사용한다. 따라서 변동압력판을 사용하면 프로펠러 캐비테이션 발생량에 차이가 있게 된다. Fig.20과 Fig.21은 각각 변동압력판이 있을 때와 없을 때에 대하여 반류중에서 프로펠러 회전수변화, 표면거칠기 유무에 따른 캐비테이션 발생정도를 날개위치별로 관찰을 보여준다.

균일류에서와 마찬가지로 표면거칠기가 있을 때가 없을 때보다 캐비테이션 발생량이 많고, 캐비테이션도 안정되어 있다. 반류중에서 표면거칠기가 없는 경우에 프로펠러 회전수 변화에 따른 캐비테이션 변화는 5.1절의 균일류중에서 레이놀즈수 변화에 의한 영향처럼, 캐비티 발생이 앞날 근처에서는 허브쪽으로 확장되고, 뒷날 근처에서는 날개끝 쪽으로 발생점이 이동한다. 이것은 5.2절에서 언급된 바와 같이 반류중에서 터널 유속 변화에 따라 반류분포의 차이는 줄 수 있으나, 균일류에서와 마찬가지로 어느 정도 날개의 국부 레이놀즈 수의 증가로 인한 영향이 있는 것으로 생각된다.

표면거칠기가 있는 경우는 프로펠러 회전수 변화에 따라 캐비테이션 발생량 변화는 적고, 앞날과 뒷날 근처에서 캐비테이션 발생범위는 매끈한 날개인 경우와 유사한 경향을 보인다. 균일류보다 반류중에서 레이놀즈 수 영향이 적은 것은 반류중에서는 유동의 난류강도가 훨씬 높기 때문인것으로 생각된다.

변동압력판이 있는 경우가 판이 없는 경우보다 캐비테이션 발생량이 감소하는 것은 5.1절의 균일류중에서 설명한 바와 같이 변동압력판에 의한 프로펠러 상 효과로 국부적으로 유속이 가속됨으로 인한 것으로 추론된다.

6. 선미 변동압력

ITTC 캐비테이션 분과위원회(17차,18차,19차)에서는 Sydney express 컨테이너선의 실선 및 모형프로펠러의 캐비테이션 관찰 및 변동압력

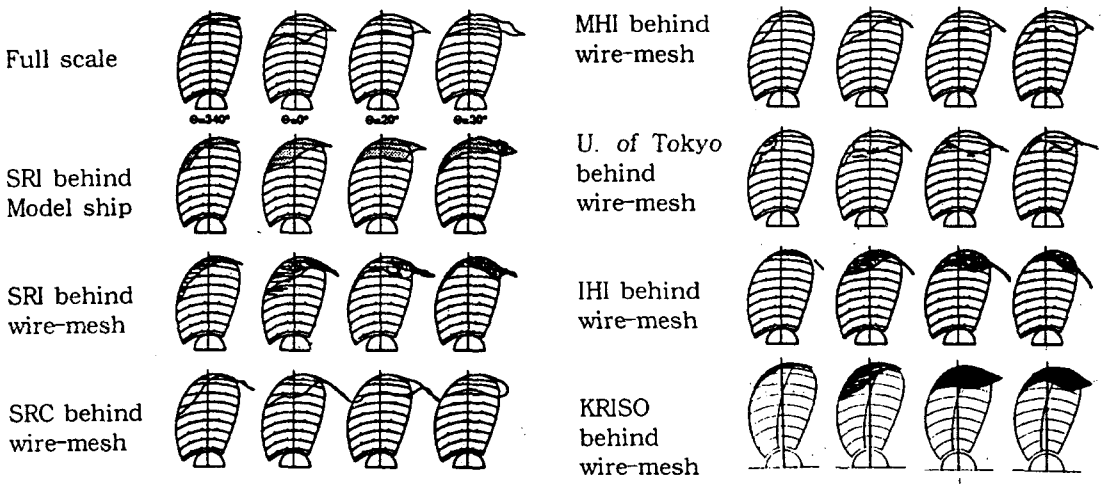


Fig.22 Cavitation patterns of KP272 on the roughened blade surface in non-uniform flow at respective facilities(K_T=0.1840, σ_n=1.826, α/α_s=30%).

계측치를 비교한 바 있다. 캐비테이션 터널에서 모형프로펠러의 변동압력 계측치가 실험시 프로펠러 회전수에 따라서 달라지는 것에 대하여 'Hydrodynamic or vibratory tunnel effect로 기인한다 할지라도 아직 잘 이해되고 있지않다' 고 언급하고 있다. 따라서 이런 문제점들을 검토하기위해서 전술한 바와 같이 KRISO 캐비테이션 터널에서 프로펠러 캐비테이션 발생에 영향을 주는 파라메타들에 대한 연구로부터 모형 프로펠러의 캐비테이션 발생이 안정되고 재현성이 우수한 실험조건 및 방법을 조사 연구하였다.

Sydney express선을 대상선박으로 실선반류는 Sasajima 방법[16]으로 추정하여 ITTC에서 발표한 자료를 사용하였으며 반류스크린으로 Fig.16에서 보는바와 같이 재현하였다. 5.2장에서 반류중에서 KP272(Sydney Express선의 모형프로펠러)에 대한 실험은 실선캐비테이션 관찰과 기관별로 모형시험결과를 비교하기 위하여 실험조건 K_T=0.1840 , σ_n=1.826에 대하여 프로펠러 회전수 변화, 표면거칠기 유무 및 변동압력판 존재유무에 따른 캐비테이션 발생량을 관찰하고 변동압력을 계측하였다.

Fig.22는 각 기관별 모형 프로펠러 캐비테이션 관찰과 실선 캐비테이션 관찰결과를 보여준다. KRISO의 관찰은 프로펠러 회전수가 30rps이며, 변동압력판이 존재하고 날개 표면거칠기가 있는 상태의 관찰결과이다. 비교적 실선 결과와 좋은 일치를 나타내고 있다. 각 기관별로 프로펠러 회전수, 재현된 반류분포 및 표면거칠기 등에 약간의 차이로 인하여 실험결과에 차이가 있으리라 생각된다.

Fig.23은 프로펠러 회전수 변화에 따른 변동압력의 1차 날개 조화성분(1st blade rate harmonic component, K_{P_5})을 각 기관별 모형실험치와 실선 계측치를 비교하였다. 비교적 타 연구기관의 결과와 비교하여 매우 타당하고 실선계측치와 좋은 일치를 보여준다. 여기서 변동압력 계측치와 캐비테이션 발생량과의 관계를 살펴보면, 높은 회전수 21, 22rps에서는 캐비테이션 발생량과 변동압력이 크게 나타나고, 발생량이 적은 경우에는 변동압력도 적게 나타난다. 특히 25, 26, 27 및 28rps에서는 캐비테이션 특성이 불안정한 부분이 있기 때문에 30rps와 비슷한 캐비테이션 발생량을 보였음에도 불구하고 변동압력 계측치는 조금 크게 나타난다.

Fig.24와 Fig.25는 반류중에서 표면거칠기가

있을 때와 없을 때에 rps 변화에 따라 변동압력 날개 조화성분 차수별로 변동압력 계측치를 보여준다.(K_{P_5}, $K_{P_{10}}$, $K_{P_{15}}$, $K_{P_{20}}$은 각각 1차, 2차, 3차, 4차를 의미) 2가지 경우 모두 rps의 변화에 대해 변동압력이 진동하고 있음을 알 수 있고, 특히, 거칠기가 있는 경우에는 고차성분보다 1차 날개조화성분이 균일류중에서보다 매우 크며, 높은 rps에서의 고차성분은 표면거칠기 존재유무에 관계없이 서로 유사하게 나타났다. 이것은 표면거칠기가 주로 변동압력의 1차 날개조화성분에 주로 영향을 주며 고차성분에는 영향이 적음을 보인다.

Fig.26은 반류중에서 변동압력 계측치중에 2차 및 3차 날개진동수의 변동압력을 타 연구기관 계측치와 비교하였다. 동경대의 계측치는 매우 큰 값을 보여주며, KRISO 계측치는 타 기관과 조금 차이를 보이나 비교적 타당한 것으로 판단된다.

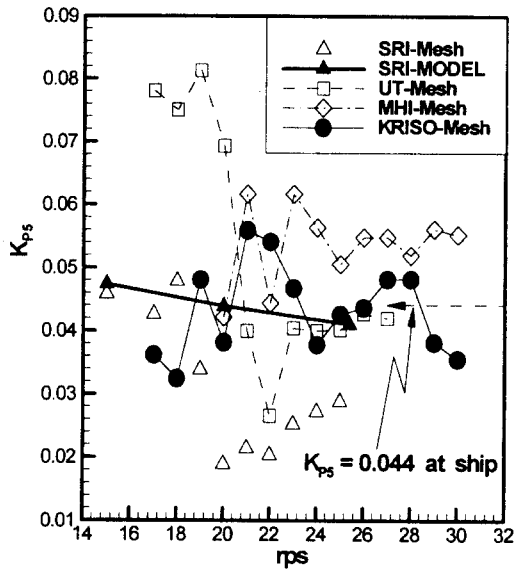


Fig.23 Influence of propeller rps on pressure fluctuation amplitude at first blade rate harmonic(α/α_s=30%, KP 272 with leading edge roughness).

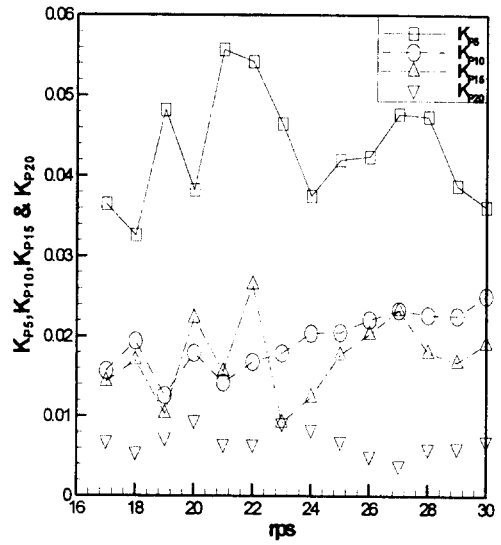


Fig.24 Influence of propeller rps on pressure fluctuation amplitude at various blade rate harmonic(KP272 with roughness leading edge)

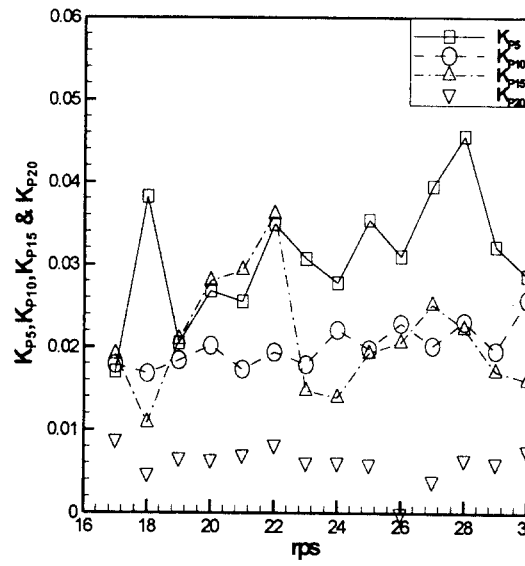


Fig.25 Influence of propeller rps on pressure fluctuation amplitude at various blade rate harmonic (KP272 with smooth leading edge)

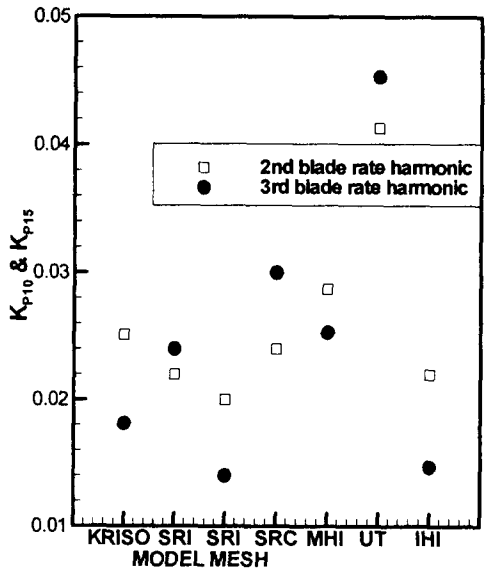


Fig.26 Comparisons of pressure fluctuation amplitued at 2nd and 3rd blade harmonic measured in wake flow.

7. 결언

(1) 날개표면 거칠기는 Rey-T 및 Rey-Q 실험에서 보다 낮은 레이놀즈 수에서 프로펠러 추력 및 토오크 계수의 수렴치를 주며, 추력계수는 감소, 토오크 계수는 증가시킨다.

(2) 균일류중에서 레이놀즈 수가 충분히 큰 값에서는 캐비테이션 초기발생에 미치는 영향은 미미하다. 작은 회전수에서 공기함유량이 높을 때는 흡입면 캐비테이션 초기발생은 높은 σ_i에서 발생하고, 압력면 캐비테이션에서는 낮은 σ_i에서 발생한다. 그러나 높은 회전수에서는 공기함유량이 캐비테이션 초기발생에 미치는 영향은 적은 편이다. 표면거칠기는 흡입면 캐비테이션 초기발생은 높은 σ_i에서 발생하고, 압력면 캐비테이션 초기발생에는 별 영향이 없다.

(3) 균일류중에서 레이놀즈 수가 증가하면, 앞날 근처에서는 캐비티 발생이 허브쪽으로 확장되고, 뒷날 근처에서는 날개끝 쪽으로 이동한다. 이런 현상은 공기함유량 변화, 표면거칠기 유무 및 변동압력판 존재유무에 무관하게 나타나는 공통된 현상이며, 날개끝 근처 앞날 근처에서 하중이 클 때 더욱 강한 특성을 보인다.

(4) 균일류중에서 표면거칠기는 날개 앞날 근처에서는 캐비티 발생을 촉진시켜서 발생범위를 확장하며, 코오드 중앙부 후류에는 별 영향을 주지 않는다. 그리고 표면거칠기는 안정된 캐비테이션 발생을 준다.

(5) 캐비테이션 초기 발생과 캐비테이션 발생량은 공기함유량 변화보다 레이놀즈 수 영향이 더 크다..

(6) 변동압력판이 있을 때는 프로펠러의 상 효과로 인하여 동일한 K_T를 맞추더라도 캐비테이션 발생이 감소하는 역할을 한다. 이 경우에 표면거칠기가 있으면 실선 캐비테이션처럼 캐비테이션이 쉽게 안정된 모습을 보인다.

(7) 반류중에서는 균일류에서와 같이 여러가지 파라메타 변화에 대해서 유사한 경향을 보이나, 주위 유동의 난류 강도가 매우 높기 때문에, 균일류에서 보다는 그 차이가 적다. 특히 표면거칠기가 있을 때는 매우 안정된 캐비테이션이 발생하며 회전수 변화에 따라 캐비테이션 발생량의 변화는 비교적 적다.

(8) 표면거칠기는 변동압력에 1차 날개 조화성분에 주로 기여하고 고차성분에는 별 영향을 주지 않는다.

(9) 반류중에서 높은 회전수, 즉 큰 레이놀즈 수에서 날개표면이 거칠면서 변동압력판이 있을 때 캐비테이션의 발생량, 유형 및 변동압력 계측치는 실선 프로펠러의 경우와 좋은 일치를 보여준다.

(10) 본 연구에서는 프로펠러의 캐비테이션 발생에 영향을 미치는 파라메타에 대해서 조사하였으나, 캐비테이션 발생 현상 자체를 파악하기 위해서 더욱 세밀한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 이창섭, 김기섭外, "캐비테이션 터널에서의 모형시험을 위한 예비조사에 관한 연구", 한국기계

연구소, 1981. 1. UCE73-126-D.
[2] Norio Ishii, Hikaru Yagi and Hajime Yuasa, "Model testing of propeller cavitation by roughening the leading edge of blades", J. of the Society of Naval Architects of Japan, 1983.
[3 Ukon Y., "Study on experimental prediction on ship hull vibration induced by propeller and cavitation", Report of Ship Research Centre of Japan, No.28, 1991.
[4] Noordzij, L., "Some experiments on cavitation inception with propellers in NSMB Depressurized Towing Tank", Int. Shipb. Progress, Vol.23, 1976.
[5] Kuiper G., "Cavitation inception on ship propeller model", Report of N.S.M.B., NO.699, 1983.
[6] Kato, H., et. al., "New Marine Propeller Cavitation Tunnel at The University of Tokyo, Its Design Concept and Special Features-On the Criterion of Air Content in Water", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.150, (1981), In Japanese.
[7] Silverleaf A. and Berry L. W., "Propeller cavitation as influenced by the air content of the water", National Physical Laboratory, 1962.
[8] 김기섭, 이창섭, "프로펠러 단독특성에 미치는 Reynolds 수의 영향(I)", 한국기계연구소 소보 제 14집, 1985.
[9] 김경열, 김기섭, "레이놀드수가 모형프로펠러 단독 특성에 미치는 영향(II)", 선박해양기술, 제 4호, 1990. 12.
[10] 김기섭, 김경열, 안종우, "예인수조와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 단독특성의 실험적 상호관계",1991, Nov. 대한조선학회 추계발표회.
[11] 19th International Towing Tank Conference 16-2, "Reprot of the cavitation committee", September, 1990, Madrid, Spain, Vol.1.
[12] 이창섭, 김기섭外, "캐비테이션 터널의 시운전 시험 및 캐비테이션 실험법 개발에 관한 연구", 1982. 12. 한국기계연구소, UCN131A-27 6 · D.
[13] 김경열, 김기섭, 안종우, "캐비테이션 모형시험 기법 향상 및 유선가시화 시험법 개발", 해사기술연구소, 1992. 12, UCE523-1678 · D.
[14] Kuiper. G., "Cavitation inception on ship propeller models", Report of N.S.M.B., No.655, 1981.
[15] Kerwin, J.E and Lee, C.S., "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance of Numerical Lifting Surface Theory", Trans. SNAME, Vol.86, 1978.
[16] H. Sasajima & I. Tanaka, "On the estimation of wake of ships", Proceedings of the 11th ITTC, Tokyo, 1966