

## 論 文

大韓造船學會論文集  
第31卷 第1號 1994年 2月  
Transactions of the Society of  
Naval Architects of Korea  
Vol. 31, No. 1, February 1994

### 30만톤 초대형 유조선을 위한 전류고정날개 추진 시스템 개발

이진태\*, 김문찬\*, 반석호\*, 김기섭\*, 김호충\*\*

#### Development of a Preswirl Stator Propulsion System for a 300K VLCC

by

Jin-Tae Lee\*, Moon-Chan Kim\*, Suak-Ho Van\*,  
Ki-Sup Kim\* and Ho-Chung Kim\*\*

#### 요 약

30만톤 초대형 유조선을 대상으로 하여 전류고정날개 추진시스템을 개발하기 위한 일련의 과정을 서술하였다. 전류고정날개 추진시스템은 프로펠러 후류 유동에서의 회전 운동에너지의 손실을 회수하여 추진 효율향상을 도모하기 위한 복합추진 장치이다. 에너지 절약형 복합추진 장치중 전류고정날개 추진시스템은 명확한 유체역학적 원리에 의하여 작동될뿐 아니라 기계적 구조가 간단하여 초기 설치비가 저렴하고 신뢰성이 높은 추진 장치이다.

선체와 기존 프로펠러를 고려하여 5개의 고정날개를 설계하였으며, 모형시험에 의하여 성능을 검증하였다. 공동수조의 모형시험 결과 전류고정날개 추진시스템의 단독 추진효율이 단독 프로펠러에 비하여 4~6% 증가됨을 확인하였다. 또한 예인수조에서의 자항추진 시험결과 설계속도(15.5 Knots)에서 전달마력이 최대 6.5% 감소되었다. 일련의 설계 및 모형시험에 의한 검증 과정을 통하여 전류고정날개는 선체후류에 맞추어 설계되어야 큰 마력 절감효과를 낼 수 있음을 밝혔다.

#### Abstract

Procedures for the development of a preswirl stator-propulsion system for a VLCC 300K are described in this paper. The preswirl stator-propulsion system is one of the compound propulsor systems, which is used for the purpose of recovering propeller slipstream rotational energy by locating a stator in front of the propeller. The preswirl stator-propulsion system can be considered as a most reliable energy saving device because of its simple mechanism.

발 표 : 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('94.4.17)

접수일자 : 1993년 5월10일, 재접수일자:1993년 12월16일

· 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

\*\* 정회원, 대우조선공업(주)

Five stators are designed for the existing hull form and propeller, and their effects are verified by model tests. Open-water test result of the preswirl stator-propulsion system at the cavitation tunnel show 4~6% increase of open-water efficiency compared to that of a propeller without stator. Maximum 6.5% decrease of delivered power at the design speed (15.5knots) is expected with the designed stator based on the analysis results of resistance and self-propulsion test at the towing tank.

### Nomenclature

$D_S$	Stator diameter
$D_P$	Propeller diameter
$R_P$	Propeller radius
CPS	Controllable pitch stator
FPS	Fixed pitch stator
$J_W$	Propeller advanced coefficient based on the flow speed of cavitation tunnel
$(K_T)_P$	Propeller thrust coefficient
$(K_Q)_P$	Propeller torque coefficient
$(K_T)_T$	Total(propeller+stator)thrust coefficient
$(K_T)_S$	Stator thrust coefficient based on propeller RPM and diameter
$(\eta_0)_T$	Total(propeller+stator) efficiency
$R_n$	Reynolds number
$P_D$	Delivered horse power
$\alpha_{des}$	Designed angle of attack
$\alpha_{equiv.}$	Equivalent 2-D angle of attack
$\alpha_{geom}$	Geometric angle of attack
$\Delta\alpha$	$\alpha_{des} - \alpha_{geom}$
$\phi_p$	Geometric pitch angle, $90 - \alpha_{geom}$

## 1. 서론

추진 효율 향상을 위한 복합 추진장치의 개발은 선진 조선소 및 각국 연구소를 중심으로 많은 시도가 있어 왔던 연구 과제이며 이의 실용화를 위한 연구는 현재 시점에도 계속 수행되고 있다.

진류고정날개 추진시스템 개발에 관한 연구내용은 대칭형 고정날개 및 비대칭형 고정날개로 나누어 두번에 걸쳐 이미 조선학회에 게재된 바 있으며[2][4] 최종적으로 정리된 결과를 본 논문에서 요약 기술하였다.

고정날개-프로펠러 상호작용을 고려한 성능해석을 수행할 수 있는 프로그램 개발은 선박해양공학연구센터에서 고정날개-프로펠러 추진시스템의 이론성능해

석을 위하여 표면양력판 이론과 양력면이론을 사용한 프로그램을 개발한 바 있으며[1][3][5] 개발된 프로그램에 의한 계산결과와 모형시험 결과와의 상관관계를 확립하기 위한 시도를 계속 수행중이다.

기발표된 연구결과에서 추진효율 향상을 위한 고정날개-프로펠러 추진시스템의 가능성을 모형시험에 의하여 검증한 결과 공동수조(Cavitation tunnel)에서의 단독특성시험에서 단독추진기에 비하여 약 4%의 추진효율 증가를 달성한 바 있다. 본 연구를 수행한 결과 선미후류에 적합하게 설계된 고정날개-프로펠러 시스템의 추진효율은 모형선 자항추진 시험시 단독 프로펠러에 의한 추진효율에 비하여 최대 6.5% 증가됨을 검증하였다.

본 연구에서는 이미 제작되어 모형시험을 수행한 바 있는 KP264 고정날개를 다시 사용하고 4개의 고정날개를 새로이 설계, 제작하여 모형시험을 수행하였다. 이중 2개 (KP279, KP280)의 고정날개는 모형시험

**Table 1 Summary of geometric characteristics for the tested stators**

Stator name	S1	S2	S3	S4	S5
Propeller No.	KP264	KP279	KP280	KP281	KP282
Type	CPS *	CPS *	CPS *	FPS *	FPS *
No. of Blades	6	6	6	6	6
Dia(mm)	287.5	250.0	225.0	250.0	250.0
$D_S/D_P$	1.15	1.0	0.9	1.0	1.0
$r_{iv}/R_P$	0.297	0.297	0.297	0.200	0.200
Section Type	NACA+a=0.8	Ogival	Ogival	Ogival	Ogival
$\alpha_{geom}(0.3R)$	12.2°	15°	14°	-	-
$\alpha_{geom}(0.5R)$	8.8°	15°	14°	-	-
$\alpha_{geom}(0.7R)$	5.9°	15°	14°	-	-
$\alpha_{geom}(0.9R)$	4.0°	15°	14°	-	-
Remark	Designed for circumferential mean wake			Designed for Non-uniform wake	

\* CPS:Controllable Pitch Stator  
FPS:Fixed Pitch Stator

시 피치각 조절이 가능하도록 가변피치 고정날개로 제작하였으며 나머지 2개(KP281, KP282) 고정날개는 고정피치 고정날개로 제작하였다. KP264 고정날개를 S1 고정날개로 칭하기로 하고 제작순서에 따라 S2(KP279), S3(KP280), S4(KP281), S5(KP282) 고정날개로 명명하였다. 5개 고정날개의 형상특성을 Table 1에 정리하였다.

S1, S2와 S3 고정날개는 피치각 조절이 가능하도록 제작되었으며 단독특성 시험시 피치각을 변화시켜 시험을 수행하였다.

예인수조에서의 단독특성시험 및 자항추진시험을 상반회전 프로펠러 시험용 동력계(R40)를 사용하였다. 고정날개에 작용하는 추력의 계측이 가능하게 됨으로서 자항추진 시험 결과를 해석하는 과정에서 고정날개를 추진기의 일부로 포함시켜 해석하는 방법이 가능하여 졌으며 실선 성능 추정 방법도 다양한 과정을 통하여 더욱 정확한 추정이 가능해졌으리라 판단된다.

고정날개와 재고프로펠러(KP259)와의 조합으로 이루어진 고정날개-프로펠러 시스템을 본연구 해석에서 사용한 보오텍스 격자로 이루어진 수치모형으로 표시된 그림을 Fig. 1에 보였으며, 대상선에 장착된 상태의 고정날개-프로펠러 추진 시스템의 사진은 Fig. 2

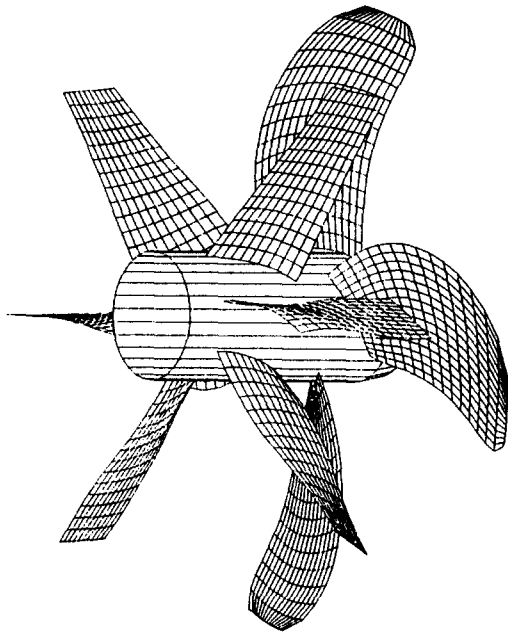


Fig. 1 Perspective view of the S5(KP282)+ P1(KP249) system

에 보였다. 모형시험은 공동수조(Cavitation tunnel)와 예인수조(Towing Tank)에서 수행되었다.

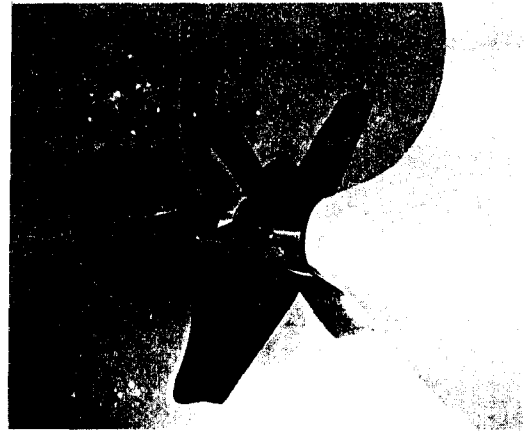


Fig. 2 Photograph of the stator-propeller system installed in the model ship of the 300K VLCC

본 연구를 통하여 최적 고정날개-프로펠러 추진시스템을 설계하기 위한 know-how를 축적하였으며 설계된 시스템의 성능을 모형시험에 의하여 검증하기 위한 모형시험기법이 확립되었다고 생각된다. 앞으로 이론 성능해석 프로그램에 의한 계산결과와 모형시험 결과와의 상관관계가 더욱 정돈높게 확립된다면 본 연구의 결과는 실선 고정날개-프로펠러 시스템의 설계에 직접 사용될 수 있으리라 판단된다.

## 2. 대칭형 가변피치 고정날개-프로펠러 복합 추진장치

### 2.1 개요

프로펠러와 대칭형 및 비대칭형 전류고정날개의 유동해석 방법에 대하여는 기 발표된 자료[2][4]에 언급한 바 있으며, 본논문에서는 개발된 성능해석 시스템을 이용하여 대칭형 및 비대칭형 전류고정날개의 설계 및 성능해석을 수행한 과정에 관하여 언급하고자 한다.

먼저 기개발된 성능해석 시스템을 이용하여 2개의 가변피치 고정날개(S2 : KP279, S3 : KP280)를 새로이 설계하였다. 코드 길이분포 및 두께분포는 문헌[7]에 소개된 기존 고정날개의 형상을 참고하여 선택하였다. 새로 설계된 고정날개 또한 피치변화가 가능하도록 제작하여 피치각을 변화시킨 모형시험 결과로부터 최적 피치각을 결정하게 하였다. 가변피치 고정

날개-프로펠러 추진시스템의 모형시험 수행시 고정날개 피치변화에 따른 모형시험 결과를 가능한 한 많이 확보하여 이론성능해석 결과와의 상관관계를 확립하는데 노력을 경주하였다. 또한 가변피치 고정날개는 모형제작시 제작이 용이하도록 피치각을 들릴 수 있다는 장점이 있다.

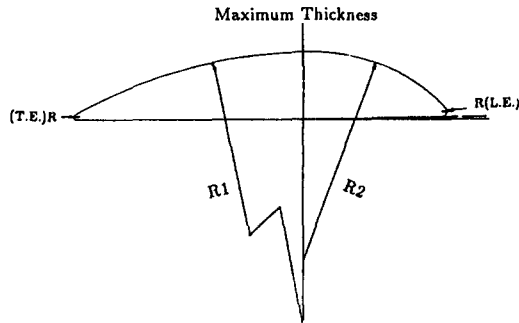


Fig.3 Geometry of the ogival blade section

기 연구결과로부터 고정날개의 직경변화가 고정날개-프로펠러 추진 시스템의 추진효율에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었으며 본 연구에서는 고정날개직경/프로펠러직경의 비율을 1.15(S1), 1.0(S2), 0.9(S3)로 변화시켰다. 고정날개 끝에서 발생하는 날개끝 보오텍스가 프로펠러 캐비테이션 특성에 미치는 영향을 고려하여 고정날개 직경을 고려하여야 하나 우선 고정날개 직경의 영향을 추진효율의 관점에서 고찰하기 위하여 고정날개 직경을 변화시켰다.

S1 고정날개는 NACA66(TMB Mod) 두께분포와  $a=0.8$  mean camber line을 갖는 날개단면을 사용하였으나 S2와 S3 고정날개는 실선장착을 고려하여 제작의 간편함을 갖는 원호형(ogival) 단면(Fig. 3)을 사용하였다. 원호형 단면의 특징중의 하나는 날개 두께 증감에 의하여 mean camber line이 변화하게 되어 캠버의 크기를 날개 두께로서 조정할 수 있다는 점이다. 원호형 단면을 사용한 S2, S3 고정날개가 S1 고정날개에 비하여 캠버양이 증가되었음을 알 수 있었다. 또한 S2, S3 고정날개는 제작상의 편의를 위하여 피치각을 반경방향으로 일정하게 설계하여 균일류중에서는 각 반경별 형상 입사각(geometric angle of attack)이 동일하다.

설계된 고정날개의 날개별 피치각을 동일하게 유지한 상태에서의 모형시험 결과와 이론 성능해석 결과와의 상관관계를 확립하여 최적 동일피치각을 결정하였

으며 최종적으로 실제 선박 추진장치로 사용하기 위해서는 고정날개 평면에 유입되는 불균일 선체 후류에 적합하도록 날개별 피치각을 결정하여야 된다. 이 부분에 관해서는 다음장에서 자세히 언급하기로 한다.

고정날개의 피치각( $\phi_p$ )은 각 반경별 날개 단면에 유입되는 형상 입사각(geometric angle of attack,  $\alpha_{geom}$ )과

$$\phi_p = 90^\circ - \alpha_{geom} \quad (\text{in degree})$$

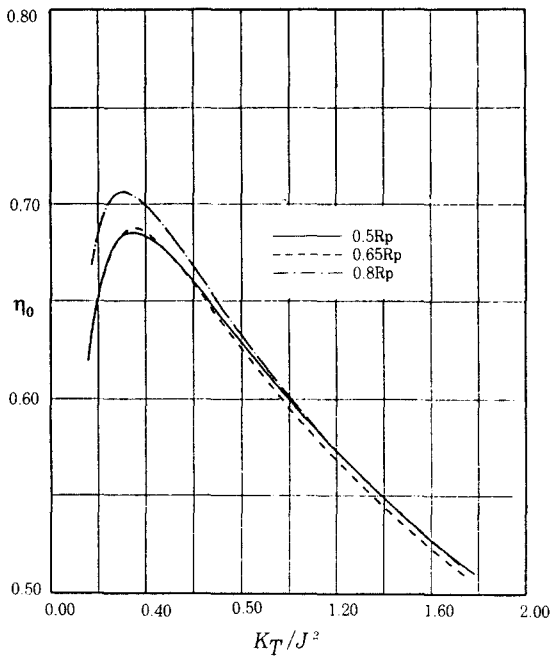
의 관계가 있다. 그러므로 고정날개의 피치각을 증가시키면 형상입사각을 감소시키게 되고 피치각을 감소시키면 형상입사각을 증가시키는 결과가 된다.

## 2.2 공동수조 단독특성시험

전류고정날개 추진시스템에서는 프로펠러가 고정날개 후류에 위치하고 있으며 고정날개 표면에서 형성된 경계층의 영향을 받아 고정날개와 프로펠러간의 축방향 거리 변화에 따른 프로펠러 추진특성이 변화할 수 있으리라 사료된다. 또한 공동수조 내부의 압력을 낮추어 고정날개 끝에 가나다란 날개끝 보오텍스 캐비테이션을 발생시키면 고정날개 날개끝 보오텍스의 반경수축을 가시화 할 수 있다. 반경수축양은 고정날개-프로펠러 간격이 증가할수록 증가하므로 그에 따라 추진특성이 변화할 가능성이 있다. 최적의 고정날개-프로펠러 간격을 결정하기 위하여 간격변화 시험을 수행하였다.

Fig.4는 S1+P1시스템에서의 고정날개와 프로펠러간의 간격이 0.65Rp와 0.8Rp로 변화될 때의  $\eta_0 - K_T/J^2$  특성에 대하여 보여주고 있다. 간격 증가에 따라 고정날개-프로펠러 상호작용이 감소하게 되어 프로펠러 추력과 토오크가 감소하는 경향을 보여주고 있으나 고정날개에 작용하는 항력이 감소하게 되어, 간격변화에 따른 고정날개-프로펠러 시스템의 추진효율 변화에 경향이 뚜렷하지 않다. 또한 설계점 ( $K_T/J^2=0.889$ )에서의 추진효율 차이가 크지 않음을 고려하여 본 연구에서는 고정날개의 간격을 프로펠러 반경의 50%로 결정하여 모든 실험을 수행하였다.

새로 설계 제작된 S2와 S3 고정날개의 설계 피치각은 이미 연구발표한 결과[2]에서 보인바와 같이 고정날개의 부하량이 프로펠러 부하량의 약 70% 정도가 되도록 설계하였다. 설계시 사용되었던 이론성능해석 프로그램의 해석결과와 모형시험결과와의 상관관계를 확립하기 위한 자료를 확보하고 최적 고정날개 피치각을 결정하기 위하여 고정날개 피치변화에 따른 고정날개-



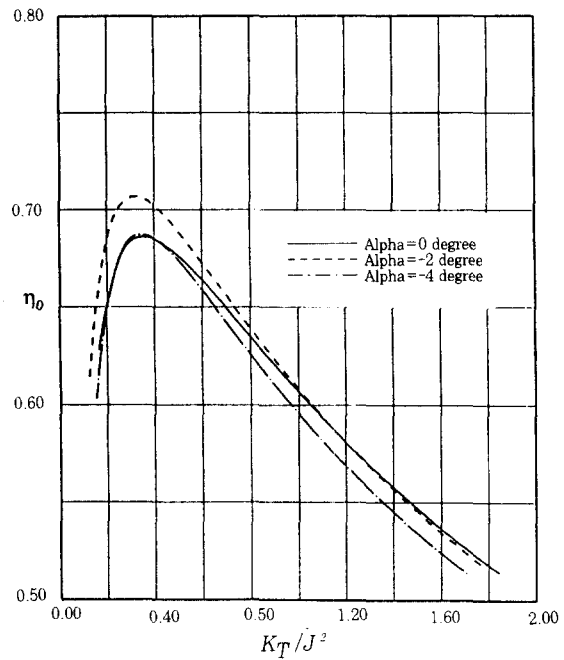
**Fig.4 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for the S1+P1 system with varying stator-propeller axial distances**

프로펠러 추진시스템의 단독특성시험을 수행하였다.

Fig. 5는 S2 고정날개의 피치각을 0°, 2°, 4° 증가시켰을 때 ( $\Delta\alpha = 0^\circ, -2^\circ, -4^\circ$ )의 S2+ P1 시스템의 단독특성 시험결과를  $\eta_0 - K_T / J^2$  로 보였다. 기 발표된 문헌에서 언급한 바와 같이 고정날개의 항력증가와 프로펠러 추력증가 사이에 최적점의 존재로 인해 전체 시스템의 효율이 피치각에 따라 변화되고 있다. S2 고정날개 시스템의 경우에는 피치각 2° 증가시 ( $\Delta\alpha = -2^\circ$ ) 최적효율을 갖고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 S3 고정날개의 피치각을 -2°, 0°, +2° 증가시켰을 때 ( $\Delta\alpha = +2^\circ, 0^\circ, -2^\circ$ )의 S3+ P1 시스템의 단독특성 결과들을  $\eta_0 - K$  로 보였다. S3 고정날개 시스템의 경우에는 설계 피치각 ( $\Delta\alpha = 0^\circ$ )에서 최적 효율을 갖고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 모형시험을 통하여 최적 피치각을 갖는 S1, S2, S3 고정날개 추진시스템의(S1:  $\Delta\alpha = +5^\circ$ , S2:  $\Delta\alpha = -2^\circ$ , S3:  $\Delta\alpha = 0^\circ$ )  $\eta_0 - K_T / J^2$  곡선을 Fig. 7에 비교하였다. 여기에서 단독프로펠러(KP249)의 단독특성은 dummy 고정날개 hub와 프로펠러가 설치된 상태에서의 프로펠러 단독특성이다. 각 고정날개



**Fig 5 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for the S2+P1 system with varying stator pitch angle**

추진시스템의 추진효율은 단독프로펠러의 추진효율에 비하여 높음을 알 수 있으며 S2(KP279)+P1 시스템의 추진효율이 가장 높아 설계점 ( $K_T / J^2 = 0.884$ )에서 단독프로펠러에 비하여 약 5.2% 증가하였음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 고정날개 직경변화(1.15Rp, 1.0Rp, 0.9Rp)에 대한 효율비교의 경우 1.0Rp가 가장 좋은 효율이 나타남을 알 수 있으며 이론계산의 경우 고정날개 후류 모델을 수축 모델을 사용할 경우 이와 같은 특성을 표현할 수 있으리라 생각된다.

### 2.3 예인수조 단독특성시험

당 연구에서는 새로이 확보한 상반회전 프로펠러 시험용 동력계(R40)를 개조하여 고정날개-프로펠러 추진시스템의 모형시험에 사용하였다. 공동수조와는 달리 예인수조는 위벽효과가 없고 고정날개 추진 시스템 상류에 축이 존재하지 않아 축 경계층에 의한 영향이 없으므로, 모형시험결과와 이론 성능해석 결과와의 상관관계를 확립하기 위한 자료로서 유용하게 사용되리라 생각되었다. 반면에 예인전차의 속도(최대속도 6m/s)가 공동수조 유속(최대 유속 11m/s)에 비하여 상대적으로 낮고 R40 동력계의 용량(최대 추력 = ±

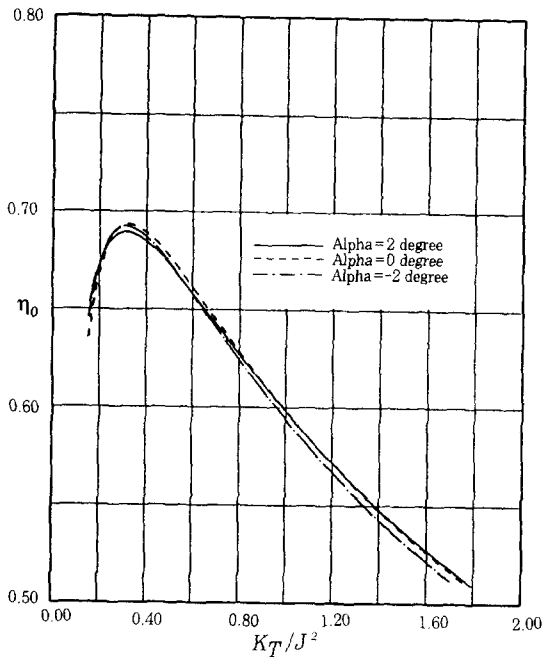


Fig. 6 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for the S3+P1 system with varying stator pitch angle

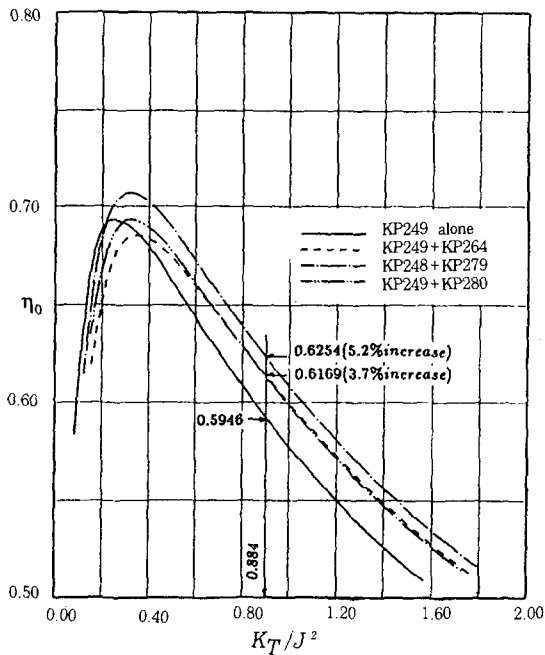


Fig. 7 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for the S1, S2 and S3+P1 system with the optimum stator pitch angle

25kgf, 최대 토오크 =  $\pm 70\text{kgf-cm}$ 이 적어 모형시험 상태의 Reynolds수(설계점 프로펠러  $R_{n,0.7R} = 0.35 \times 10^6$ , 고정날개  $R_n = 0.34 \times 10^5$ )가 공동수조 모형시험 상태(설계점 프로펠러  $R_{n,0.7R} = 1.14 \times 10^6$ , 고정날개  $R_n = 1.1 \times 10^5$ )에 비하여 현저히 낮기 때문에 실험의 신뢰성이 낮다는 문제점이 있다. 특히 고정날개 Reynolds수가 과도하게 낮기 때문에 고정날개 뒷날부근에서 유동박리의 위험성이 매우 높으며 유동박리에 의하여 고정날개 양력이 저하되면 프로펠러 평면에 프로펠러 회전방향과 반대방향의·접선방향 유기속도(Counter swirl)를 주지 못하게 되어 고정날개 추진시스템의 추진성능을 저하시키게 된다. S1, S2, S3 고정날개의 경우 가변피치로 제작이 되어 허브가 비교적 크게 제작이 되어 이러한 Reynolds수의 영향이 더욱 커질수 있으리라 생각된다. 그러므로 실선 고정날개 복합추진장치의 단독특성은 예인수조에서의 시험결과와 공동수조에서의 시험결과를 비교하면서 추정되어야 된다.

고정날개 피치각 변화에 따른 S2+P1 및 S3 +P1 시스템의 단독 특성시험은 공동수조에서 수행하였기 때문에, 예인수조에서는 S2+P1 시스템에 대하여 피

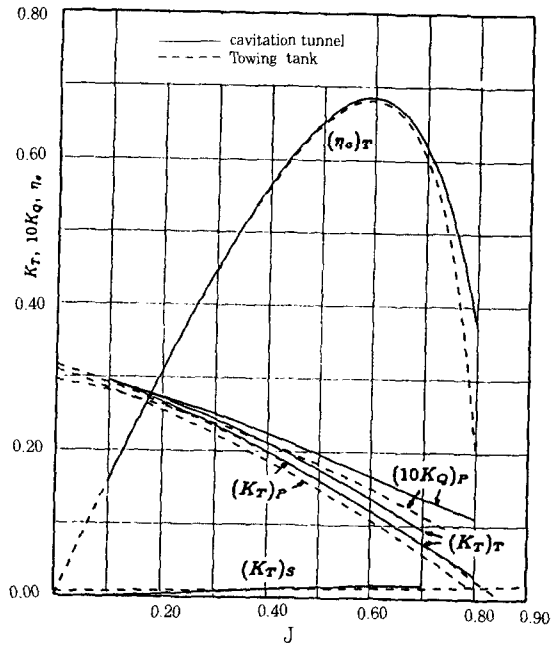
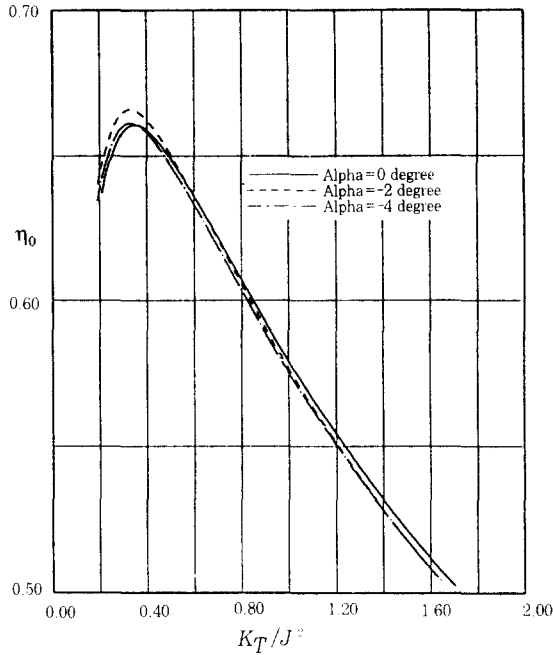


Fig.8 Comparison of the open water test results carried out in the rowing tank and in the cavitation tunnel for the S1+P1 system(  $\Delta\alpha = 5^\circ$ )

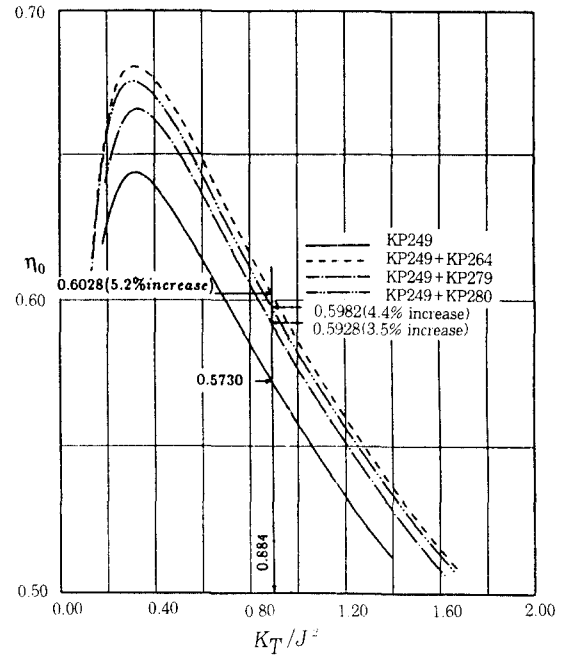


**Fig. 9 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves of the towing tank open water test for the S2+P1 system with varying stator pitch angles**

치변화에 따른 단독특성시험을 수행하여 공동수조에서의 시험결과와 비교하였다.

Fig. 8에서 S1+P1 시스템 ( $\Delta\alpha=5^\circ$ )에 대한 예인수조와 공동수조에서의 단독특성 시험결과를 비교하였다. 앞에서 언급한 공동수조와 예인수조에서의 시험환경 차이로 인하여 시험결과와의 차이를 볼 수 있다. 즉 예인수조에서의 프로펠러 추력 및 토오크계수가 공동수조에서의 그것에 비하여 감소하였음을 알 수 있으나 동일 전진계수에서의 추진효율의 값은 크게 변화되지 않았다.

고정날개 피치각이 변화함에 따른  $\eta_0 - K_T / J^2$  특성을 Fig. 9에 보였다.  $\eta_0 - K_T / J^2$ 에 따른 추진효율 특성이 공동수조에서의 특성과 차이가 있게 되었음을 알 수 있었다. 공동수조에서의 시험자료가 예인수조에서의 그것에 비하여 안정된 값을 주고 있었기 때문에 신뢰성이 높은 것으로 판단하였다. 최적 피치각으로 선정된 각 고정날개 추진시스템 (S1:  $\Delta\alpha=5^\circ$ , S2:  $\Delta\alpha=-2^\circ$ , S3:  $\Delta\alpha=0^\circ$ )의  $\eta_0 - K_T / J^2$  특성을 KP249 프로펠러의 특성과 함께 Fig. 10에 비교하였다. 동일 시스템에 대한 공동수조에서의 시험 결과인 Fig. 7과 비교하면 예인수조에서의 추진효율값이 전반적으로 낮음을 알



**Fig. 10 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for the S1( $\Delta\alpha = 5^\circ$ )+P1, S2( $\Delta\alpha = -2^\circ$ )+P1 and S3( $\Delta\alpha = 0^\circ$ )+P1 system**

수 있다. 또한 시스템간의 추진효율 크기의 순서 또한 변화되었음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 공동수조에서의 시험결과가 신뢰성이 좀더 높은 것으로 판단하였다.

### 3. 비대칭형 고정피치 고정날개-프로펠러 복합추진장치

#### 3.1 개요

2장에서 고정부에 대하여 각각의 피치각을 대칭적으로 변화시킴에 따른 성능특성을 파악했으며, 본장에서는 실선에서의 성능향상을 이루기 위해서 불균일 반류분포에 맞는 비대칭 고정날개 프로펠러 복합 추진장치에 관하여 언급하기로 한다.

고정날개의 직경 변화에 따른 추진효율 변화량을 2장에서 고찰한 바 있으며 S4와 S5 고정날개의 직경은 프로펠러 직경과 동일하게 250mm로 선택하였다.

S4와 S5 고정날개의 날개 제원은 S2 고정날개를 기준으로 결정하였다. S4 고정날개의 경우 각 날개의 반경방향 피치각은 일정하게 설계하였으나 S5 고정날개는 각 날개별 반경방향 피치각을 선미후류의 반류분

포에 맞추어 반경별로 변화하도록 설계하였다.

S4 고정날개의 각 날개별 피치각을 결정하기 위하여 이론 성능해석 과정을 반복 수행하여 최적 피치각을 결정하였다. 즉 계측된 반류분포의 반경별 접선방향 평균 유입속도(축방향, 접선방향 및 반경방향)를 입력자료로 하여 계산된 고정날개 추진시스템의 고정날개 부하분포를 Fig. 11 중 요구부하(Wanted)로 결정하고, 불균일 반류중에서 요구부하와 가장 근사한 부하분포를 줄 수 있는 각 날개별 피치각을 결정하였으며 S4+P1 시스템이 불균일 반류중 작동시 고정날개의 각 날개별 부하분포를 Fig. 11에 요구부하와 함께 보였다.  $\alpha_{equiv.}$  는 단면에 걸리는 부하를 상응하는 2-D 양력각으로 치환하여 표현한 값이며 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\alpha_{equiv.} = \sin^{-1}\left(\frac{C_L}{2\pi}\right) = \sin^{-1}\left(\left(\frac{u}{V_s}\right)\left(\frac{c}{R}\right)\right)$$

여기서 G는 무차원화된 부하값 ( $G = \frac{\Gamma}{2\pi R V_s}$ )이고, u는 국부유입속도, c는 코오드 길이를 의미한다.

각 날개의 부하분포가 0.7R 외부에서는 비교적 요구부하 분포와 일치하나 0.7R 내부에서는 잘 일치하지 못함을 알 수 있다. 이는 고정날개의 반경별 피치각을 일정하게 유지하였기 때문에 반경방향 부하분포를 요구부하분포와 일치시킬 수가 없었기 때문이다. 또한 이론 성능해석시 Hub의 영향을 무시하였기 때문에 Hub 부근의 부하분포값은 실제 상황과 차이가 있을 것으로 생각된다.

S5 고정날개는 제작상의 어려움을 감수하고서라도 고정날개의 반경별 피치각을 상이하게 설계하여 계측된 불균일 반류분포에 최대한 적합하도록 설계하였다. 그러나 반경방향으로 피치각이 과다하게 변화될 경우 고정날개 제작의 문제 뿐 아니라 유체역학적으로도 급격한 피치변화에 따른 유체 불연속성이 발생할 가능성이 있으므로 과도한 반경방향 피치각 변화는 피하도록 설계하였다.

S5 고정날개 설계를 위하여 S4 고정날개 설계시와 동일한 개념의 이론 성능해석을 수행하였으며 접선방향 평균 유입속도에 맞추어 요구부하를 결정한 후, 불균일 반류중에서도 요구부하를 최대한 맞출 수 있도록 날개별로 반경방향 피치각을 변화시키면서 Table 2의 피치각을 갖도록 설계하였다. 이와같이 설계된 S5 고정날개의 각 날개별 반경방향 부하분포를 Fig. 12에

요구부하와 함께 보였다. Fig.11의 S4 고정날개의 부하분포에 비하여 각 날개의 부하분포가 요구부하와 일치함을 알 수 있다.

**Table 2 Summary of each blade pitch designed of attack setting for the S4, S5 stators**

		(degree)								
Stator	r/R blade	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
S4	B1	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	B2	21	21	21	21	21	21	21	21	21
	B3	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	B4	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	B5	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	B6	14	14	14	14	14	14	14	14	14
S5	B1	15.01	14.0	13.0	11.7	10.5	9.0	8.5	10.0	11.5
	B2	14.8	11.3	11.1	12.9	16.6	21.4	25.0	27.4	29.1
	B3	16.2	10.8	7.1	6.6	9.5	14.9	19.4	22.0	23.0
	B4	24.0	24.2	23.0	20.0	15.1	10.6	7.2	5.0	4.1
	B5	30.2	24.5	19.1	13.6	8.4	4.1	1.7	1.0	0.9
	B6	32.0	28.9	25.0	21.0	16.1	12.0	8.8	6.7	5.1

### 3.2 공동수조 단독 특성시험

공동수조에서 고정날개-프로펠러 시스템의 단독 특성 시험을 수행하기 앞서 Reynolds수의 영향이 단독 특성 결과에 미치는 영향을 고찰하기 위한 Reynolds수 변화시험(Rey-Q)을 수행하였다. Rey-Q 시험은 설계점에서의 전진계수( $J_{design}$ )를 일정하게 유지하면서 유속과 프로펠러 회전수를 변화시켜 그때의 추력과 토오크를 계측하여 Reynolds수의 변화에 따른 단독특성을 고찰하기 위한 시험이다. 이러한 시험을 통하여 단독시험이 충분한 Reynolds수 값에서 수행되어 안정된 결과를 주고 있는 지를 판단할 수 있다. 특히 고정날개의 Reynolds수가 일반적으로 낮음을 고려할 때 본 시험을 통하여 시험결과의 안정도를 판단할 수 있으리라 생각된다.

고정날개는 회전하지 않으므로 Reynolds수가 상대적으로 낮게되고 고정날개표면 근처에서 층류유동을 형성할 가능성이 높아 난류촉진을 위한 거칠기(Roughness)를 부착하여 Rey-Q 시험을 수행하였다. 거칠기는 60 $\mu$ m의 탄화규소(Carborundum #220) 가루를 고정날개압력면과 흡입면 양면에 앞날로 부터 코오드길이의 10%까지 부착하였다. 표면거칠기의 부착방법과 부착에 의한 영향은 참고문헌[8]에 보인 바 있다.

표면거칠기를 부착한 상태와 부착하지 않은 상태에



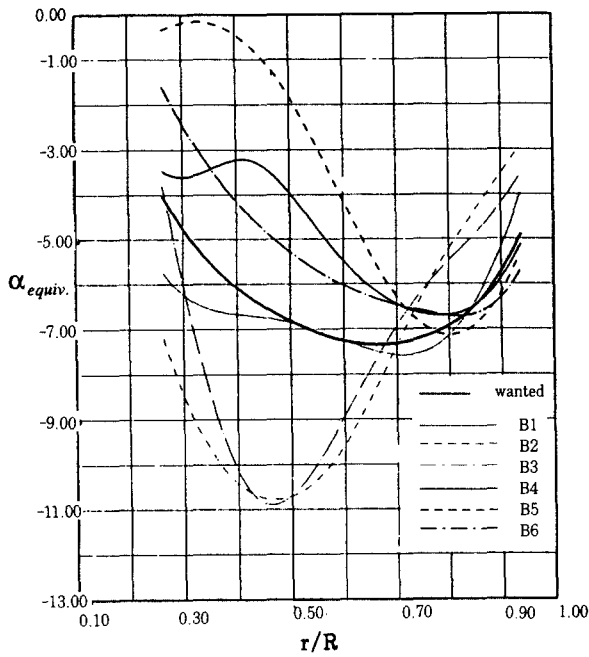


Fig. 11 Radial circulation distribution on the stator blades of the S4+P1 system

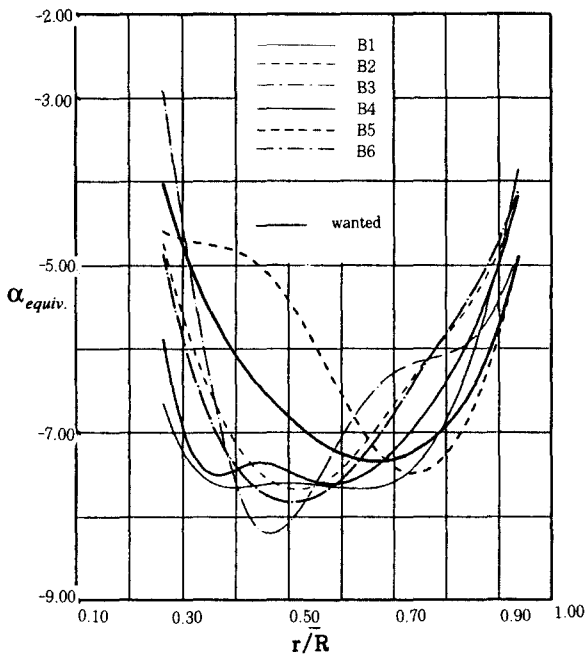


Fig. 12 Radial circulation distribution on the stator blades of the S5+P1 system

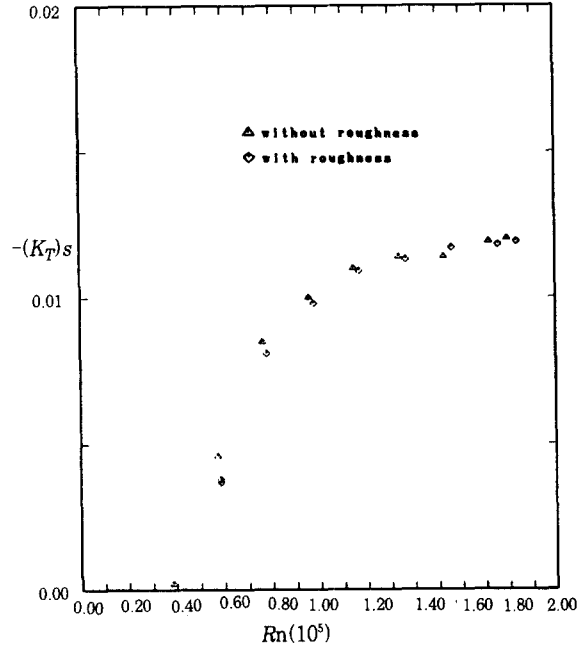


Fig. 13 Reynolds number effect on the stator thrust coefficients for the S4+P1 system with and without the stator leading edge roughness

서 수행한 S4+P1 시스템에 대한 Rey-Q 시험 결과로부터 Reynolds수 변화에 따른 고정날개 추력계수를 Fig. 13에 비교하였고 프로펠러 추력계수 및 토크 계수는 Fig. 14에 보였다( $J_{design}(\text{propeller})=0.5$ ). 고정날개 추력계수는 표면거칠기에 의하여 크게 변화하지 않음을 보였으나 프로펠러에 작용하는 추력계수 및 토크 계수는 고정날개 표면 거칠기를 부착함에 따라 크게 감소하였음을 알 수 있었다. 이는 표면거칠기에 의하여 고정날개 후류유동이 난류유동화되어 고정날개 후류의 반류형상의 폭이 감소하였기 때문에 프로펠러 평면에서의 유속이 증가하여 프로펠러 단면에서의 입사각(angle of attack)이 감소하였기 때문이라고 추론된다. 고정날개 추력계수는 Reynolds수 증가에 따라 계속 증가하고 있음을 알 수 있으며 아직 충분히 안정된 값을 주지 못함을 알 수 있다. 프로펠러의 추력계수 및 토크 계수 값은 Reynolds수가  $8.0 \times 10^5$  이상일 경우에는 안정된 값을 주고 있음을 알 수 있다.

표면거칠기가 S4+P1 시스템의 단독특성에 미치는 영향을 각 계측치별로 비교하기 위하여 Fig. 15에 고정날개 추력계수 특성을 보였다. 표면거칠기를 고정날개

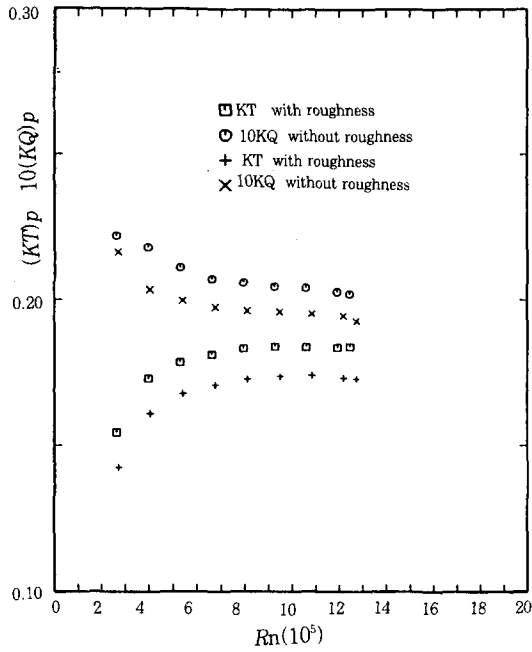


Fig. 14 Reynolds number effect on the propeller thrust and torque coefficients for the S4+P1 system with and without the stator leading edge roughness

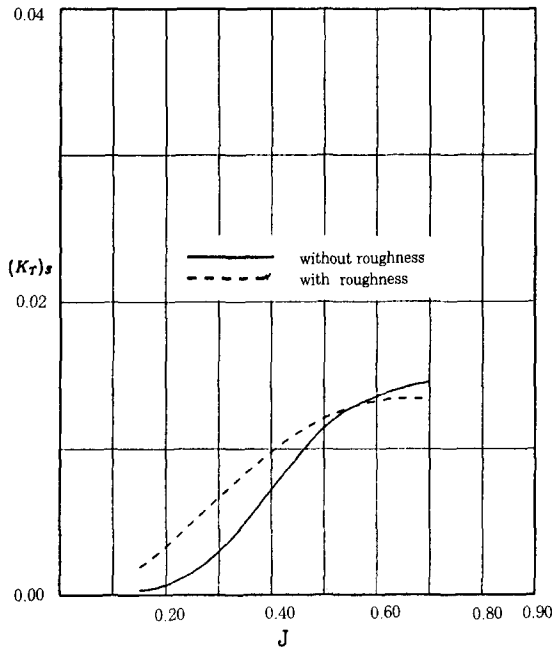


Fig.15 Comparison of the stator thrust coefficients for the S4+P1 system with and without the stator leading edge roughness

에 부착함으로써 고정날개 항력이 증가하였으나 전진비( $J_w$ )가 0.55보다 큰 경우에는 오히려 감소함을 알 수 있다. 이는 프로펠러 하중이 상대적으로 적은 높은 전진비에서 고정날개 평면에서의 축방향 유기속도가 적음으로 인한 고정날개 흡입면에서의 박리현상(Separation)을 거칠기를 부착함으로써 억제하였기 때문이라 판단된다. 그러므로 보다 정도높은 실험 및 실선과의 상관관계를 정립하기 위해서는 위와 같은 예비실험을 더욱 세밀히 수행하여야 할것이다.

새로 설계된 S4, S5에 대한 공동수조에서의 모형시험을 수행하였으며, Fig.16에 보인바와 같이 균일류중에서의 단독효율은 P1 단독프로펠러의 효율에 비하여 설계점( $K_T/J^2=0.884$ )에서 S4+P1 시스템이 5.1% 증가, S5+P1 시스템이 3.5% 증가됨을 알 수 있다. 불균일 반류에 맞추어 설계된 것을 감안할 때 균일류중에서도 효율증가가 큼을 알 수 있으며 비대칭성이 매우 심한 S5의 경우 균일류중에서의 성능이 다소 떨어짐을 알 수 있다.

3.3 예인수조 시험

예인수조에서 고정날개-프로펠러 추진시스템의 단

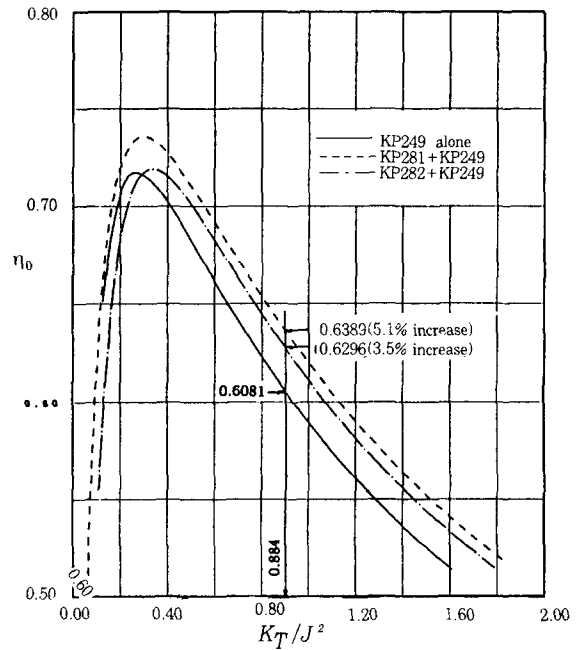


Fig.16 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves of P1, S4+P1 and S5+P1 systems in the cavitation tunnel

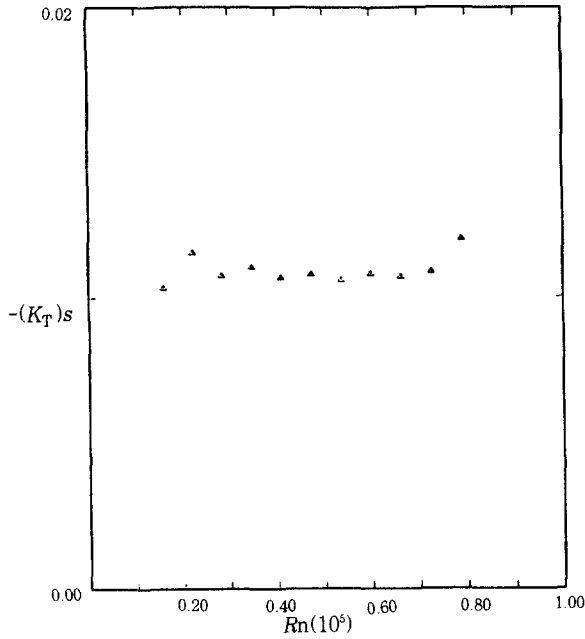


Fig. 17 Reynolds number effect on the stator thrust coefficients for the S4+P1 system in the towing tank (without roughness)

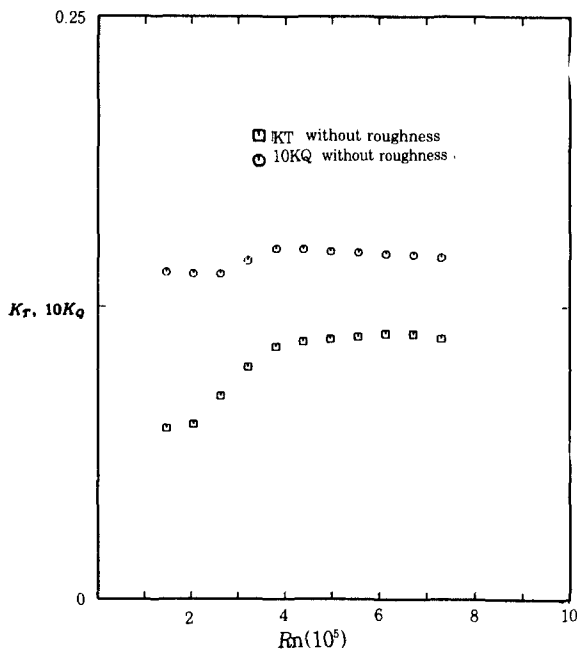


Fig. 18 Reynolds number effect on the propeller thrust and torque coefficients for the S4+P1 system in the towing tank (without roughness)

독특성시험을 수행하기 앞서 Reynolds수의 영향이 단독특성 결과에 미치는 영향을 확인하기 위한 시험 (Rey-T 시험)을 수행하였다. Rey-T 시험은 공동수조에서의 Rey-Q 시험과 비슷하게 예인차의 속도와 프로펠러 회전수를 조절하여 일정한 전진계수(일반적으로 설계 전진계수, Jdesign)로 유지시키면서 Reynolds수의 변화에 따른 추력계수와 토크 계수의 변화를 고찰하기 위한 시험이다.

S4(KP281)+P1 시스템에 대하여 설계점(Jdesign=0.4)에서 Reynolds수 변화에 따른 고정날개 추력계수의 변화량을 Fig.17에 보였으며 그에 따른 프로펠러 추력계수와 토크 계수의 변화량을 Fig.18에 보였었다. 예인수조 Reynolds수 변화 시험(Rey-T 시험) 결과로부터 Reynolds수 변화에 따른 단독특성 변화 경향이 공동수조의 경향과 다름을 알 수 있다. 즉 공동수조에서는 Fig.14에서 보인바와 같이 Reynolds수 증가에 따라 토크 계수의 값이 감소하면서 일정한 값으로 수렴하고 있으나 예인수조에서는 증가하면서 수렴함을 알 수 있다. 공동수조에서는 프로펠러 전부에 J25 동력계 설치를 위한 축이 설치되며 축 경계층 유동의 영향으로 인하여 예인수조에서의 단독특성과 다른 특성을 주고 있음을 알 수 있다. 또한 예인수조에

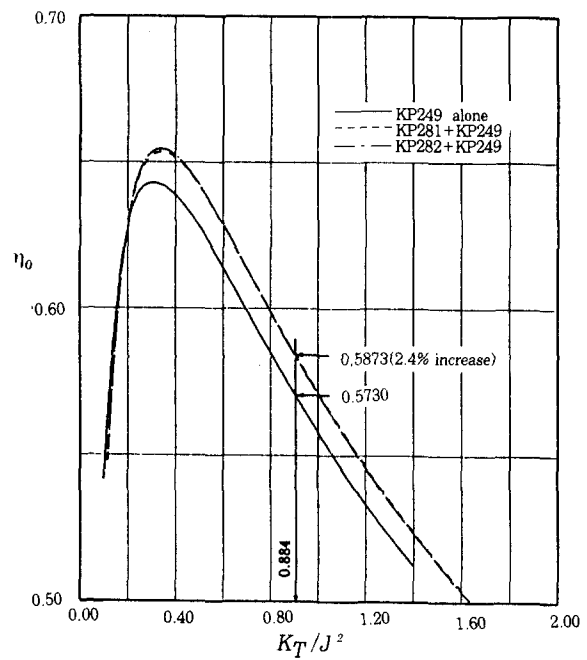


Fig. 19 Comparison of  $\eta_0 - \frac{(K_T)_T}{J^2}$  curves for P1, S4+P1 and S5+P1 systems in the towing tank

서의 단독특성시험 결과중 고정날개에 작용하는 항력은 낮은 Reynolds수에서도 작지 않은 값을 갖는다. 이는 고정날개 앞에 위치한 Cap에 작용하는 항력에 의한 값이라고 판단된다.

S4, S5 고정날개는 고정피치로 제작되었기 때문에 피치변화에 따른 단독특성시험은 수행하지 않았으며 자항추진 시험결과와 해석시 고정날개를 추진장치의 일부분으로 해석하기 위하여 각 시스템의 단독특성 시험을 수행하였다.

S4+P1 시스템과 S5+P1 시스템의 단독특성시험 결과를  $\eta_0-K_T/J^2$  특성으로 KP249 프로펠러 단독특성시험 결과(H29 동력계 사용)와 비교하여 Fig.19에 보였다.

S4+P1 시스템과 S5+P1 시스템의 추진효율은 설계점( $K_T/J^2=0.884$ )에서 차이가 크지 않으나 KP249 단독특성시험의 추진효율에 비하여 2.4%정도 향상되

었음을 알 수 있다.

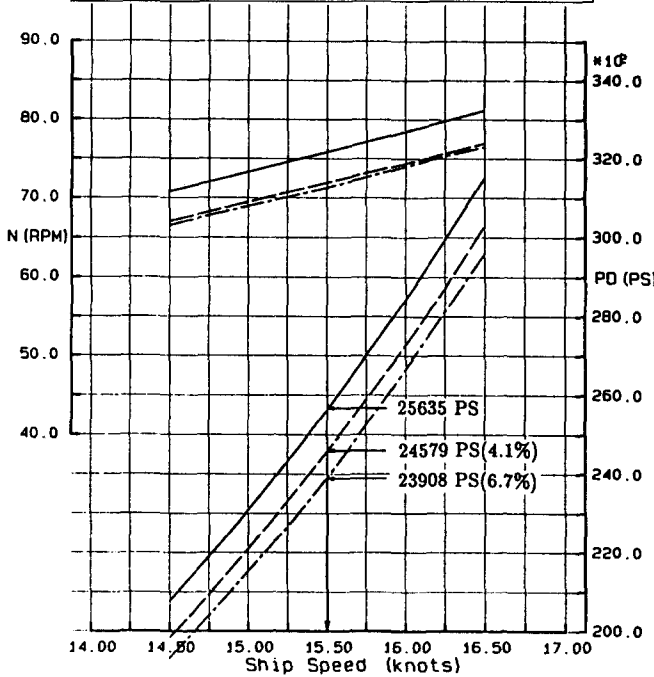
전류고정날개-프로펠러 시스템에 관한 자항시험에 관하여는 참고문헌[6]에 상세히 기록되어 있으며 본 연구에서는 불균일 반류중에서 최고의 성능을 도모한 S4, S5 고정날개 시스템에 관한 자항시험 결과만 간단히 언급하기로 한다.

**Table 3 Summary of powering performance results for the S4 and S5 stators**

Design speed (knots)	Method	S4 (KP281)	S5 (KP282)
15.5	Tank Power	96.2% (+3.8%)	93.7% (+6.3%)
	A	95.7% (+4.3%)	93.9% (+6.1%)
	B	95.9% (+4.1%)	93.3% (+6.7%)

KRISO 25-DEC-92 111100

File no.	Draft(m)	Displt.	Mark
	F.P.	A.P.	(m**3)
s352s50i. van	20.80	20.80	309263 ——— w/o
s352s51f. van	20.80	20.80	309263 - - - - S4
s352s52f. van	20.80	20.80	309263 - - - - S5



**Fig. 20 Comparison of powering performance prediction (Method B)**

Table 3에서는 S4와 S5의 자항시험 결과 요약을 보여주고 있다. 여기서 Tank power 방법은 자항추진시험시 계측된 추력과 토크를 직접 실선의 값으로 환산하여 구하는 방법으로 시험결과 해석시 상대적 비교방법으로 사용될 수 있으리라 생각된다. 또한 A방법은 고정날개를 추진기의 일부로 생각하여 실선으로 확장 해석하는 방법이며, B방법은 고정날개배의 일부로 간주하여 해석하는 방법이다. A방법과 B방법의 결과차이가 속도별로 크지 않음을 알 수 있다. S5 고정날개의 경우 B방법에 의해 해석할 경우 설계 속도에서 약 6.5% 효율의 증가를 보여주고 있으며 프로펠러 단독으로 운항할 때 S4+P1으로 운항할 때 그리고 S5+P1으로 운항할때의 추진성능비교를 Fig.20에서 보였다. 그림에서 보인바와 같이 설계속도에서 S4+P1의 경우는 약 4% 그리고 S5+P1의 경우는 6.5% 연료절감 효과를 거둘 수 있으리라 생각된다.

**4. 결론 및 제언**

프로펠러 후류의 회전방향 운동에너지 손실을 회수하기 위한 전류고정날개 추진시스템에 대한 최적 고정날개 설계과정, 모형시험에 의한 검증, 그리고 모형시험 결과로부터 실선 성능추정 과정과 같은 일련의 연구 개발과정을 기술하였다. 본 연구에서는 대상선(300K VLCC)의 추진효율 향상을 위하여 고정날개 5

조의 전류고정날개-프로펠러 시스템을 설계하여 모형 시험을 수행하였으며, 1단계로 모형시험을 수행하였던 3조(S1, S2, S3)의 전류고정날개-프로펠러 시스템은 전류고정날개를 가변피치로 제작하여 이론 성능해석 결과와 모형시험 결과와의 상관관계를 확립하였다. 이론 성능해석과 설계 정확도가 높아짐에 따라 2단계에서 설계된 2조(S4, S5)의 시스템은 고정피치 고정날개로 제작되어 모형시험의 정도를 향상시켰다. 설계 및 모형시험 과정별 중요 결과는 다음과 같다.

- 모형시험에 의하여 최적 피치각을 결정할 수 있도록 가변피치 고정날개 3조(S1, S2, S3)를 설계하여 모형시험을 수행하였다. S2(KP279)+P1(KP249) 시스템은 설계 피치각보다 2° 증가된 상태( $\Delta\alpha = -2^\circ$ )에서 최적 피치각을 갖으며, S3(KP280)+P1 시스템은 설계 피치각( $\Delta\alpha = 0^\circ$ )에서 최적 피치각을 갖음을 실험과 이론을 통하여 확인하였다. 각 고정날개 추진 시스템의 단독 추진효율은 단독 프로펠러(KP249)의 추진효율에 비하여 높음을 알 수 있으며 S2+P1 시스템의 추진효율은 설계점( $K_T/J^2 = 0.884$ )에서 단독 프로펠러에 비하여 약 5.2% 증가하였다. 예인수조 단독특성시험 결과는 공동수조 시험결과와 약간의 차이를 보였으나 공동수조에서의 시험결과가 신뢰성이 좀더 높은 것으로 판단하였다.
- 불균일 선미후류에 맞추어 날개별 피치각이 다르게 설계된 고정피치 고정날개-프로펠러 시스템을 2조(S4, S5) 설계 제작하여 모형시험을 수행하였다. 공동수조에서의 단독특성 시험결과 설계점에서의 추진효율이 단독 프로펠러에 비하여 S4+P1 시스템은 5.1% 증가, S5+P1 시스템은 3.5% 증가됨을 알 수 있었다. 자항시험 결과 S4+P1 시스템의 경우 약 4%, S5+P1의 경우 약 6.5%이 연료절감 효과를 거둘 수 있음을 확인하여 실선에 장착할 경우 경제적인 측면에서 큰 효과를 거둘 수 있으리라 생각된다.
- 모형시험 결과를 실선에 적용하여 우수한 성능을 입증하기 위해서는 정확한 실선 유효반류 추정이 매우 중요하다. 개발된 전류고정날개 추진시스템을 실선에 장착하여 성능을 확인하고 프로펠러 주위 유동을 예측할 수 있다면 더 많은 마력 절감을 기대할 수 있으리라 판단된다.

## 후 기

본연구는 과학기술처와 대우조선(주)의 공동연구 과제로 수행되었으며, 관련 제위께 감사드립니다. 수많은 실험과 실험자료 정리에 노고를 아끼지 않았던 김경열, 이창용氏에게 특별한 감사를 드리고 논문 편집에 도움을 준 전해숙氏께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Lee, J.-T., "A Study on the Preswirl Stator-Propulsion System", KRISO Report, UCE 424-1371.D, Dec., 1989.
- [2] Lee, J.-T., Kim, M.-C., Suh, J.-C., Kim, S.-H. and Choi, J.-K., "Development of a Preswirl Stator-propeller System for Improvement of Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator Propulsion System", *Trans. of SNAK*, Vol.29, No.4, Nov. 1992.
- [3] Kim, M.-C., etc., "A Study on the Asymmetric Preswirl Stator-Propulsion System", KRISO Report, UCE 500-1558 D., Dec. 1991.
- [4] Kim, M.-C., Lee, J.-T., Suh, J.-C. and Kim, H.-C., "A Study on the Asymmetric Preswirl Stator System", *Trans. of SNAK*, Vol.30, No. 1, 1993.
- [5] Kim, M.-C., Lee, J.-T. and Suh, J.-C., "Analysis of a Preswirl Stator-Propeller System by a Lifting-Surface Theory", Hull Form '92 Symp., Inha Univ., June 1992.
- [6] 이진태외, "전류고정날개 추진시스템 개발 공동연구(II)", 한국해사기술연구소 보고서 UCK009-1655 D, 1992. 12.
- [7] Takekuma, K., "Evaluation of Various Types of Nozzle Propellers and Reaction Fin as the Device for the Improvement of Propulsive Performance of High Block Coefficient Ship", *S-NAME, Shipboard Energy Conservation Symposium*, Sept. 1980.
- [8] ITTC, "Report of Cavitation Committee", *Proceeding of 19th ITTC*, Madrid, 1990.