
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 30 卷 第 1 號 1993 年 2 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No.1, February 1993

비대칭형 전류 고정날개 추진 시스템 연구

김문찬*, 이진태*, 서정천*, 김호충**

A Study on the Asymmetric Preswirl Stator System

by

Moon-Chan Kim*, Jin-Tae Lee*, Jung-Chun Suh* and Ho-Chung Kim**

요 약

추진 효율 향상을 위한 비대칭형 전류 고정날개-프로펠러 추진 시스템의 성능해석에 대한 이론적 실험적 고찰과 이에 대한 비교를 수행하였다. 성능해석을 위한 비대칭 및 대칭 해석 프로그램은 양력면 이론에 의해 개발되었으며, 실험과의 상호관계를 통하여 보다 정도 높은 설계 및 성능해석을 수행할 수 있도록 만들어졌으며 특히 불균일 반류에서의 고정날개 성능해석을 통한 비대칭 설계가 가능하여졌다.

개발된 프로그램을 이용하여 새로운 비대칭 고정날개를 설계하였으며 성능해석을 이론적으로 수행한 결과 단독 프로펠러에 비하여 약 6%의 효율증가를 보이고 있다.

Abstract

This paper deals with both experimental and theoretical methods for performance prediction of asymmetric stator propulsion systems which have been used for the purpose of recovery of a propeller slipstream rotational energy due to a stator located in front of the propeller.

Using the developed computer code based on the lifting surface theory, theoretical investigation on the interaction between the stator and the propeller is provided in order to obtain general insight on the performance characteristics of the propulsion systems in uniform and non-uniform flow.

Such theoretical calculations have good agreements with model test results.

The asymmetric stator would give an efficiency gain of about 6% to the compound propulsor system compared with the single propeller system.

발 표: 1992년도 대한조선학회 춘계연구발표회('92. 4. 18.)

접수일자: 1992년 5월 1일, 재접수일자: 1992년 7월 24일

* 정회원, 해사기술연구소

** 정회원, 대우조선공업(주)

1. 서 언

추진효율 향상을 위한 복합추진장치(Compound Propulsor)의 개발은 조선기술 선진국인 유럽 및 일본을 중심으로 새로운 장치의 개발에 많은 노력을 투입하고 있는 연구분야이다. 현재까지 개발된 복합 추진장치로는 상반회전 프로펠러(Contra-Rotating Propeller), Vane wheel 추진장치, 덕트 추진장치 등이며 본 연구에서는 전류 고정날개에 관하여 살펴 보고자 한다.

전류 고정날개 추진시스템(Pre-swirl Stator Propulsion System)은 프로펠러에 의해 유기되는 접선 속도와 반대방향인 접선속도(Counter-swirl)를 주기 위하여 프로펠러 전방에 고정날개를 설치함으로써 고정날개-프로펠러 추진시스템 후류에서의 회전방향 운동에너지의 손실을 최소화함으로써 추진효율 향상을 꾀하기 위한 장치이다[1].

이와같이 추진효율 향상을 위한 전류 고정날개-프로펠러 추진 시스템은 새로운 개념이 아니며 현재 실용화되어 많은 실적을 갖고 있다. 그러나 전류 고정날개 추진 시스템의 설계 및 성능해석에 대한 이론은 명확히 규명되지 못하고 있으며 대부분 모형 시험 결과 및 실선 설치 경험을 토대로 설계되고 있는 실정이다. 해사기술(연)에서는 대칭형 전류 고정날개에 대한 연구를 1989년에 수행한 바 있으며 [2,3], 고정날개에 대한 설계 및 모형시험을 수행한 바 있다[4].

본 연구에서는 추진효율 향상을 위한 비대칭 전류 고정날개 추진 시스템을 개발하기 위하여 불균일 반류중에서의 비대칭 전류 고정날개에 대한 이론 성능해석 및 설계를 수행할 수 있는 전산 프로그램을 개발하고 모형시험과의 상관관계를 정립하여 추진효율 향상을 극대화할 수 있는 실선용 비대칭 고정날개-프로펠러 시스템을 완성함을 목표로 하였다.

균일류 상태에서의 대칭형 고정날개에 대한 설계 및 성능해석은 기 수행된 연구에서 이미 다루었으나 전류 고정날개와 프로펠러의 동 유체력 계산에 있어서 해사(연) 공동수조에서 실험치와 상당한 차이를 보였다. 실험과 이론의 보다 정도 높은 상호관계를 얻기 위해서는 예인수조에서 실험을 수행하여야 하나 본 연구에서는 1차적으로 공동수조에서의 실험치와 이론과의 정성적·정량적 상호관계를 확보하여 이를 통하여 해석뿐 아니라 새로운 설계에 도움을

주고 또 나아가서 불균일 반류에서의 성능을 정도 높게 추정할 수 있는 시스템을 구축하도록 하였다.

전류 고정날개-프로펠러 추진 시스템이 불균일 반류중에 놓이게 되면 균일류 경우와는 달리 각 날개별 각 반경별 부하가 크게 달라지게 된다. 특히 고정날개와 같은 에너지 절약장치를 많이 사용하는 VLCC급 대형 선박의 경우 좌현과 우현의 접선방향 속도가 크게 다르고 후류의 불균일도가 심하여 균일류 중에서의 부하상태와 크게 다르고 후류의 불균일도가 심하여 균일류 중에서의 부하상태와 크게 달라지게 된다. 이와같이 불균일류 중에서 최적의 고정날개를 설계하기 위해서는 각각의 날개를 따로 푸는 비대칭 해석기법을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 통상적으로 주 날개(Key blade)만을 해석하는 방법에서 각 날개별 유입속도를 각각 고려하여 각각의 날개를 해석할 수 있는 비대칭 해석 시스템을 개발하였다.

개발된 비대칭 해석 시스템을 이용하여 기존 고정날개 및 설계 고정날개에 대한 성능해석을 수행하였다. 성능해석을 수행한 결과, 대칭형으로 고정날개를 설계할 경우 좌현쪽의 날개와 우현쪽의 날개의 부하의 차이가 큼을 발견하였으며 실선에서의 성능향상을 이루기 위해서는 이러한 특성을 충분히 고려한 최적설계가 되어져야 하리라 생각된다.

최적 비대칭 고정날개를 설계하기 위해서는 비대칭 해석 프로그램의 개발뿐 아니라 비대칭 해석 프로그램의 입력자료인 불균일 반류에 대한 정확한 계측 그리고 실선 유효반류에 대한 정확한 추정 등이 선행되어야 하며 실선에서의 시운전 결과에 대한 자료들을 이용하여 시스템의 검증 및 보완 등이 뒤따라야 할 것이다. 이러한 연구들이 본 연구와 함께 병행되어질 때 최적 비대칭 고정날개 설계·성능해석이 완벽하게 이루어지리라 생각된다.

2. 이론 성능 해석

2.1 개요

프로펠러와 대칭형 전류 고정날개의 유동해석에 관하여는 기 발표된 자료[3,4]에 언급한 바 있으며 본 연구에서는 비대칭형 전류 고정날개의 유동해석 방법에 대하여 언급하고자 한다.

비대칭형 전류 고정날개 해석에 있어서도 대칭형 시와 마찬가지로 계산의 효율성을 감안하여 양력면 이론을 이용하고 상호 유기속도를 고려하여 반복

계산하는 방법을 사용하였다. 대칭형과는 달리 비대칭의 경우 각 날개의 위치 및 각 날개의 제원이 각각 다르므로 프로펠러 문제 해석의 경우와 같이 축대칭성을 이용하여 한 날개(Key blade)만의 문제로 풀 수 없으므로 전체 날개를 동시에 풀어야만 한다. 이와 같은 개념에 따라 비대칭 해석 프로그램을 완성하였으며 완성된 해석 프로그램을 검증하기 위해 대칭형 해석 프로그램과 비교하였다. Fig.1은 본 연구에서 사용한 비대칭 전류 고정날개를 양력면 이론에 의해 보오텍스 격자로 이산화한 모습을 보여 주고 있으며 우현의 날개들로 부터 각각 S1~S6로 날개들을 명명하기로 한다. Fig.2는 본 연구에서

사용되어진 비대칭 고정날개(KP264)를 축대칭으로 가정하여 즉 각각의 날개 사이간격이 균일하다고 가정하여 대칭형 해석 프로그램을 사용하여 부하를 구한 것과 비대칭성을 고려하여 비대칭 해석 프로그램에 의한 계산값을 비교한 것이다. 이로부터 등간격이 아닌 경우 날개간격이 비교적 밀집되어 있는 날개들(S2, 24)에서 부하가 감소하는 현상을 잘 보여 주고 있으나 그 차이는 크지 않았으며 전체 유체력의 관점에서의 거의 같은 값을 주고 있다고 하겠다.

상호 유기속도의 고려는 대칭형 해석시와 마찬가지로 각각의 시스템에 의한 유기속도의 원주방향 시간 평균값(circumferentially time averaged value)으로 근사화한 값을 유입속도에 더하여 줄으로써 고려하여 주었다. KP264 고정날개에 대하여 각 날개의 위치가 균일하다고 가정하여 계산한 대칭형 해석 프로그램과 비대칭형 해석 프로그램의 후류에서의 접선방향 속도를 Fig.3에 보였으며 Fig.3에서 알 수 있는 바와 같이 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 사실로부터 볼 때 균일류 중의 성능 해석에 있어서는 시간이 많이 걸리는 비대칭 해석 프로그램을 사용하지 않아도 무방하리라 생각된다.

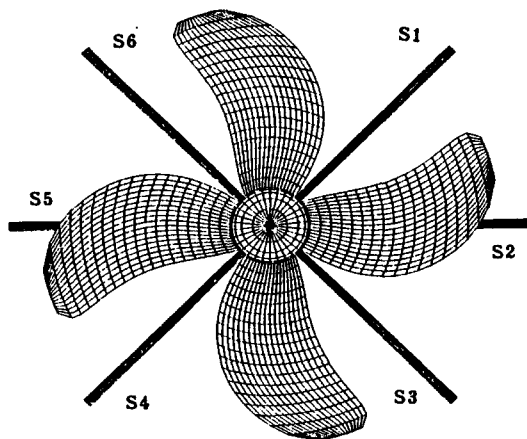


Fig.1 Illustration of singularity elements on stator and propeller blades

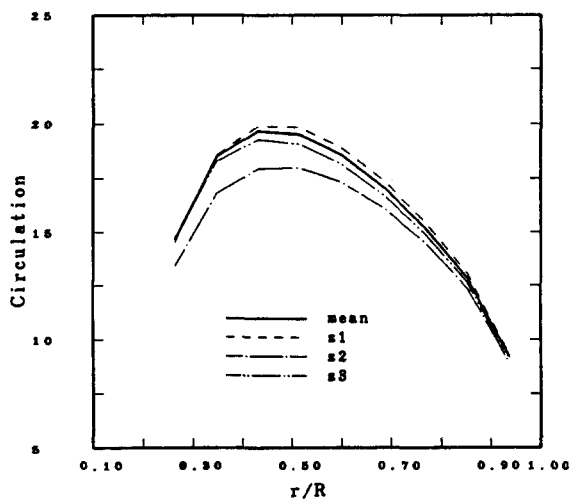


Fig.2 Comparison of stator circulation of uniform and non-uniform blade spacing

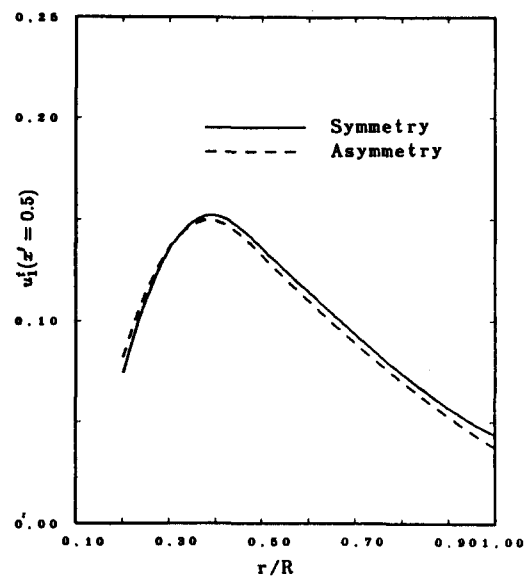


Fig.3 Comparison of tangential induced velocity of asymmetry and symmetry computer analysis program in uniform flow

2.2 모형시험-이론 상관관계

통상적으로 프로펠러의 경우는 각 반경별 유입류의 받음각이 거의 이상 받음각으로 설계되어지기 때문에 성능해석을 수행함에 있어서 이상유체 가정하에 양력면 이론을 적용하고 항력의 경우 국소 저항계수를 도입하여 평판의 경우와 같이 적용하여 해석하여 왔다. 모형시험의 경우 C_D 값을 0.0085로 하여 추정된 프로펠러 특성치는 모형 실험값과 좋은 일치를 보아 왔다[5].

전류 고정날개의 경우는 프로펠러의 회전속도를 상쇄시키기 위해 많은 양의 부하의 필요하므로 통상 이상 받음각을 훨씬 초과한 상태에서 운항되어지게 된다. 그러므로 프로펠러에서 쉽게 적용되어지는 C_D 값만 가지고는 항력을 보다 정확히 추정할 수 없다. 본 연구에서는 Hoerner[6]가 제안한 저항계수식을 이용하여 부하증가에 따른 항력증가를 유도하였다. 항력 계수식은 다음과 같다.

$$C_D = 2C_f \left[1 + \frac{t}{c} + 100 \left(\frac{t}{c} \right)^4 \right] \frac{C_L^2}{\pi A} \quad (1)$$

여기서 C_f 는 평판의 저항계수로서 R_n 에 따라 변화되어지며 ΔC_L 은 전체 양력에서 이상 받음각에서의 양력을 뺀 값이며 마지막 항은 3차원 효과를 고려한 항이며 A 는 가로-세로비(aspect ratio)를 나타낸다.

위와같은 식을 사용하여 C_D 를 결정하게 되면 두께(캠버 포함) 및 코오드 분포의 변화에 따른 효율의 비교가 가능하여지므로 전류 고정날개의 형상에 따른 효율변화를 추정할 수 있게 된다.

전류 고정날개에 대한 일련의 실험은 해사(연)의 공동수조에서 수행되었다. 공동수조에서의 시험결과는 예인수조에서의 실험결과와 상당한 차이가 나타나지만 정성적인 면에서는 연관성을 갖고 있다. 해사(연)에서는 공동수조에서의 단독특성치를 예인수조에서의 단독특성치로 보정하는 방법을 연구한 바 있으며[7], 그 결과 상당히 좋은 일치를 보이고 있다. 보정을 하지 않은 경우도 예인수조의 결과와 정성적으로 잘 일치하므로 유체역학적인 특성 파악에는 큰 문제가 없다할 수 있다. 그러나 전류 고정날개의 경우 공동수조와 예인수조간의 실험결과를 보정하는 방법이 아직 정립되어 있지 못하여 이론계산 결과를 공동수조에서의 결과와 비교하였다. 비교한 결과 계산된 유체력의 값이 비교적 작아 공동수조와의

연관성(correlation) 확보를 통하여 보다 정도높은 설계 및 성능해석을 수행하기 위해 상호 유기속도를 경험적으로 조종할 수 있는 식을 제안하였다. 이와같은 식은 실험조건에 따라 바뀌어질 수 있을 것이며 다음과 같이 정의하였다.

$$C_i = 1 + C_a \times (Gam)^{2.1}_{mean} \quad (2)$$

$$(Gam)_{mean} = \sum_{m=1}^M \frac{\Gamma_m}{M 2\pi R V_s}$$

여기서, m 은 이산화된 스펜방향의 보모택스 인덱스이고 M 은 전체 갯수를 의미하여 $(Gam)_{mean}$ 은 날개에 걸리는 부하의 평균값을 의미하고 C_a 는 실험 결과를 이용하여 조정되어질 수 있는 계수이며 대략 20~25 사이의 값이 된다. 프로펠러와 고정날개의 부하 $(Gam)_{mean}$ 가 커지면 커질수록 C_i 값은 증가하며 상호 유기속도에 C_i 값이 곱해져 새로운 유기속도의 입력값이 되므로 상호작용이 커지게 된다.

위와같은 식은 실제현상을 엄밀히 재현하기 위함이라기 보다는 모형실험과 이론의 상관관계로 부터 전류 고정날개 제원 변화에 따른 효율변화에 대한 이론과 실험의 연관성을 제시하여 최적 고정날개의 설계에 이용되리라 생각되며, 실험치에 대한 위벽효과나 backup bar 효과 등을 고려하여 보다 엄밀한 실험치를 얻게 되면 이와 같은 계수치는 바뀌게 될 것이다.

(1), (2)식을 고려하여 설계하고 성능해석한 결과를 3장에서 모형시험 결과와 함께 정리하였으며 특히 날개수나 전체적인 형상이 다른 새로운 고정날개에 대한 설계에 도움이 될 수 있으리라 생각된다.

3. 전류 고정날개 성능해석에 의한 해석 시스템 검증

본장에서는 2장에서 언급한 이론성능해석 과정을 토대로 전류 고정날개 추진 시스템에 대한 모형시험 결과와 성능해석 결과를 비교하여 성능해석 기법에 대한 검증과 설계 방향을 제시토록 한다. 검증에 사용되어진 비대칭 고정날개-프로펠러 시스템의 대상으로는 KP264와 KP249를 사용하였으며 KP264 고정날개는 날개수 6개인 비대칭 고정날개이며 Table 1,2에 제원을 각각 정리하였다.

먼저 프로펠러와 고정날개간의 상호작용에서 중요한 접선방향 유기속도에 대한 이론계산을 LDV 시스

Table 1 Geometry of the model propeller(KP249)

Propeller No.	KP249		Propeller Name		DW300K		
Designed by	DEAWOO		Project Name				
Propeller Type	FPP		No. of Propeller		SINGLE		
Diam.(Model)	250.000mm		Scale Ratio(λ)		39.200		
A_E/A_O	.453		$(P/D)_{mean}$.636		
Skew($^\circ$)	22.953		rake($^\circ$)		.000		
Section Name	NACA66		Hub Ratio		.155		
No. of Blades	4		Comment				
r/R	P/D	X_m/D	$\theta_m(^\circ)$	l/D	$f_o/D(10^3)$	$t_o/D(10^3)$	f_o/l
.20	.5600	.0000	-2.50	.1695	6.41	42.80	37.0457
.25	.5765	.0000	-3.67	.1814	6.88	39.54	37.1601
.30	.5920	.0000	-4.49	.1926	7.09	36.37	36.0848
.40	.6210	.0000	-4.95	.2128	6.98	30.31	32.1373
.50	.6470	.0000	-3.72	.2294	6.47	24.65	27.6314
.60	.6630	.0000	-1.07	.2412	5.74	19.30	23.3452
.70	.6680	.0000	2.71	.2458	5.11	14.55	20.3811
.80	.6560	.0000	7.33	.2391	4.52	10.31	18.5269
.90	.6280	.0000	12.53	.2094	3.66	6.37	17.1461
.95	.6120	.0000	15.24	.1718	2.87	4.45	16.3586
1.00	.5950	.0000	18.00	.0000	.00	2.72	.0000

Table 2 Geometry of the asymmetric model stator(KP264) with the reference pitch angle($\Delta\phi=0$)

Propeller No.	KP249		Propeller Name		STATOR2		
Designed by	KRISO		Project Name				
Propeller Type	CPP		No. of Propeller		SINGLE		
Diam.(Model)	287.500mm		Scale Ratio(λ)		39.200		
A_E/A_O	.453		$(P/D)_{mean}$		23.937		
Skew($^\circ$)	.000		rake($^\circ$)		.000		
Section Name	NACA66		Hub Ratio		.258		
No. of Blades	6		Comment				
r/R	P/D	X_m/D	$\theta_m(^\circ)$	l/D	$f_o/D(10^3)$	$t_o/D(10^3)$	f_o/l
.30	4.3591	.0000	.00	.1527	-6.23	20.61	-0.041
.35	4.8288	.0000	.00	.1496	-5.21	19.33	-0.035
.40	6.8468	.0000	.00	.1466	-4.31	18.03	-0.029
.50	10.1464	.0000	.00	.1405	-2.80	15.82	-0.020
.60	14.8172	.0000	.00	.1344	-1.54	14.34	-0.011
.70	21.2804	.0000	.00	.1283	-.63	13.03	-0.005
.80	29.3159	.0000	.00	.1222	-.12	11.87	-0.001
.90	37.6034	.0000	.00	.1161	.00	10.93	.0000
.95	41.6362	.0000	.00	.1131	.00	10.56	.0000
1.00	44.9272	.0000	.00	.1100	.00	10.19	.0000

템을 이용한 실험을 통해 검증하였고 해사(연) 공동 수조에서 수행된 단독특성 실험을 통해 얻어진 실험치와 이론에 의한 추정치와의 정성적 정량적인 비교를 수행하였다. 마지막으로 불균일 반류중에서의 성능해석을 통해 실선에서 비대칭 고정날개 설치에 대한 방향을 제시하였다. VLCC 급과 같이 대형

선박에서는 불균일 반류의 불균일도가 매우 심하고 특히 접선방향 속도가 우현과 좌현에서 날개단면의 입장에서 반대로 작용되어지기 때문에 비대칭 고정날개 설계를 정확한 반류의 입력없이 불가능한 것이다. 실선 시운전을 통한 실선 유효반류 추정연구가 아직 미미한 실정임을 감안할 때 조속히 이에

대한 정확한 추정이 필요한 것이다.

3.1 LDV를 이용한 유기 접선속도 검증

본 연구에서는 전류 고정날개-프로펠러 시스템의 후류에서 접선방향 속도를 LDV 시스템을 이용하여 계측함으로써 회전방향 운동에너지 회수를 확인하고 이론과 실험과의 차이를 확인하여 전류 고정날개 설계를 위한 개념을 구축하고자 한다. LDV 시스템에 의한 속도 계측시 계측자료의 일관성을 유지하기 위하여 터널 내부 유속은 5m/s로 고정하였으며 프로펠러는 회전수(n=45rps)를 동일하게 유지하였다. 이와같이 계측된 단독 고정날개에 의한 접선방향 유기속도는 단독 프로펠러에 의한 접선방향 속도 성분과 상쇄되어 고정날개-프로펠러 시스템 후류에서의 회전방향 운동에너지 손실이 최소가 되도록 고정날개를 설계하여야 한다.

본 실험에 사용되어진 LDV에 대한 구체적인 내용은 참고문헌[4]에 수록되어 있으며 여기서는 생략하기로 한다.

2장에서 언급한 양력면이론에 의하여 계산된 유기속도의 값과 LDV 계측장치에 의한 계측 속도값을 비교하였다. Fig.4에서는 단독 프로펠러(KP249) 후류

에서의 계산된 접선방향 속도값과 LDV 시스템에 의한 계측값을 비교하였다. LDV에 의한 속도계측시 프로펠러 후류 한점에서 충분한 시간동안 계측된 많은 양(1024개)의 계측값을 평균함으로써 시간평균 속도성분을 구하였다. 이때 계산점은 실험상태 ($V_{mean}=5m/s, n=45rps$)에서 계측된 프로펠러 부하 상태($K_T/J^2=0.791$)를 맞추어 선택되었다. 계산된 접선방향속도와 실험값이 허브 근처에서 비교적 차이가 큼을 알 수 있다. 이는 실제 고정날개 프로펠러 시스템은 허브효과를 가지고 있으나 양력면 이론에 의한 수치모형에서 허브를 제외하였으며 허브 및 축계에서의 점성에 의한 효과 등이 고려되지 않았기 때문으로 생각된다.

비대칭형 고정날개(KP264) 단독에 대하여 LDV 장치에 의한 접선속도 성분계측을 수행하였다. Fig. 5에서 보인바와 같이 비대칭형 고정날개(KP264) 후류($x=1.0R$)에서 LDV 시스템에 의해 계측된 시간 평균 접선속도 성분과 그 상태에서 계산된 회전방향 평균접선속도 성분은 비교적 잘 일치하고 있다.

비대칭형 고정날개와 프로펠러가 동시에 설치된 상태에서 고정날개-프로펠러 후류에서의 LDV 시스템에 의해 계측된 시간 평균 접선속도 성분과 그

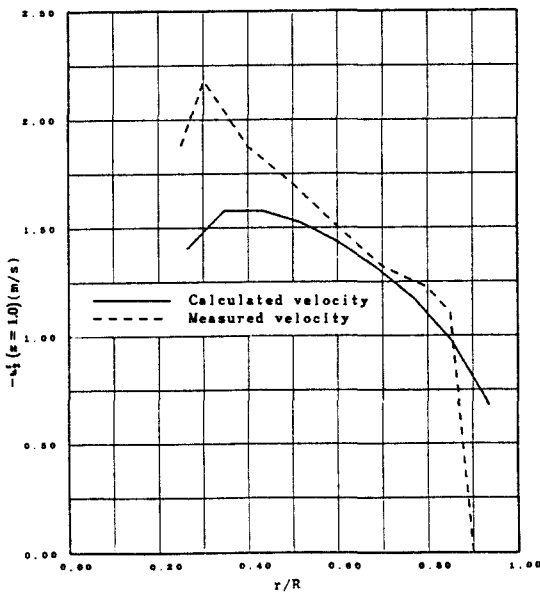


Fig.4 Comparison of the calculated tangential velocity distribution with the measured one behind the KP249 propeller alone at 1.0R downstream of propeller plane

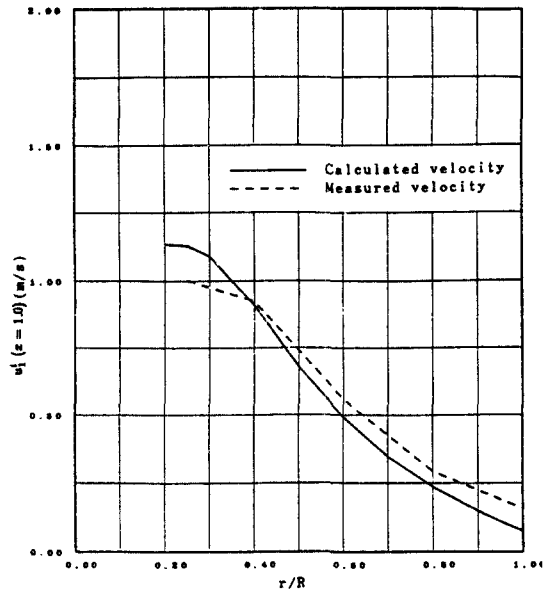


Fig.5 Comparison of the calculated tangential velocity distribution with the measured one behind the KP264 stator($\Delta\alpha=0^\circ$) at 1.0R downstream of propeller plane

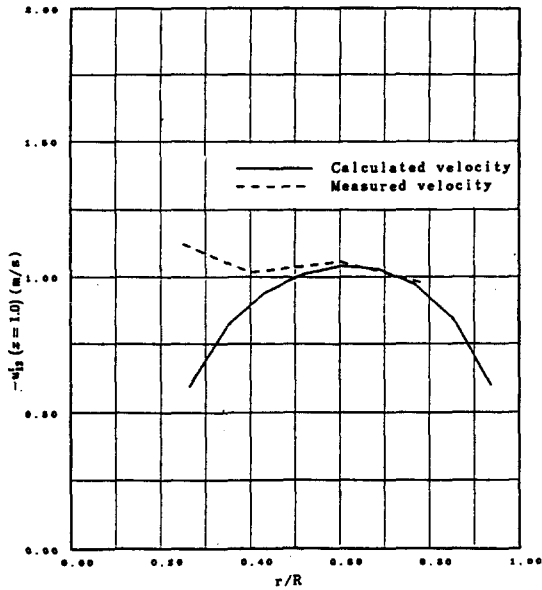


Fig.6 Comparison of the calculated tangential velocity distribution with the measured one behind the stator-propeller system(KP249+KP264 with $\Delta\alpha=0^\circ$) at 1.0R downstream of propeller plane

상태에서 계산된 회전방향 속도성분을(피치각 $\Delta\alpha=0^\circ$) Fig.6에 보였다. 점성효과 등으로 인하여 허브에서의 프로펠러의 회전속도와 이론치의 차이로 인하여 (Fig.4 참조) 그림에서 알 수 있듯이 허브에서의 회전속도 상쇄의 양이 차이가 나타남을 알 수 있다.

3.2 균일류 중에서의 단독특성 비교

전류 고정날개 추진 시스템의 단독실험은 전류 고정날개와 프로펠러에 작용하는 힘과 모멘트를 동시에 계측하여야 하기 때문에 2개의 동력계가 필요하다. 주 프로펠러 동력계(J25)와 경사류 동력계(H41)를 설치하여 일련의 시험을 한국해사기술연구소(KRISO)의 캐비테이션 터널에서 수행하였다.

예인수조에서의 프로펠러 및 고정날개 각각의 단독 시험결과와 대기압 상태로 실시된 캐비테이션 터널에서의 단독 시험 결과는 상당한 차이를 보이고 있다. 이의 주된 원인은 캐비테이션 터널에서의 물의 흐름이 주위 벽에 의해 제한되어지는 위벽 효과, 캐비테이션 터널과 예인수조에서의 시험속도 차이에 의한 Reynolds 수의 영향, 주동력계 축의 경계층에

의한 프로펠러 유입속도 차이에 의한 영향 등이 있으며 본 연구에서와 같이 두 동력계 J25와 H41을 동시에 사용하는 경우 후류에 위치한 H41 동력계 축에 의한 효과(backup-bar effect)도 나타날 수 있게 된다. 정량적으로 정확한 실험결과를 확보하기 위해서는 이러한 효과들을 정확히 보정하여야 하나 본 연구에서는 캐비테이션 터널에서의 고정날개 추진시스템과 단독 프로펠러와의 추진효율 비교를 주목적으로 하고, 차후 앞에서 언급한 효과들을 단계적으로 보정하고자 한다.

2장에서 언급한 이론 성능계산 결과와 시험결과들을 비교해 보기로 하자. 앞에서 언급한 바와 같이 프로펠러와 고정날개간의 상호작용에 의한 힘과 모멘트 값이 실험치보다 적어 이를 보정하여 단독특성치에 대한 실험과의 정성적인 관계를 확보하였다.

실험결과 비대칭 고정날개(KP264)는 고정날개의 설계 피치각이 최적 피치각보다 크게 설계되었음을 확인할 수 있었으며 반복시험 수행시 변화시킨 피치각은 기준설계된 피치각으로 부터 $\Delta\phi = -3^\circ, -4^\circ, -5^\circ, -7^\circ$ 만큼 변화시켜 실험하였다. 편의상 유입되는 입사각의 입장에서 $\Delta\alpha = 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 그리고 7° 로 정의하였다.

균일류 중에서 일지라도 비대칭 고정날개를 해석하기 위해서는 각 날개사이의 간격이 불균일하므로 앞서 언급한 바와 같이 각각의 날개를 따로 푸는 문제 비대칭 해석방법을 사용하여야 정확한 해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 이를 위한 비대칭용 프로그램을 개발하였으며 이를 사용하여 보다 정도 높은 계산을 수행할 수 있었다. 그러나 비대칭으로 문제를 푸는 경우 축 대칭시보다 훨씬 많은 시간이 소요되므로 균일류중에서의 성능해석 과정도 같은 경우에는 대칭형으로 간주하여 문제를 풀어도 전체 유체력에 있어서 크게 차이가 나지 않으므로 고정날개의 설계나 균일류중의 정성적인 성능특성 파악은 축 대칭형으로 간주하여 대칭형 프로그램을 이용하는 것이 타당하리라 생각된다.

최적 피치각($\Delta\alpha=5^\circ$)에서의 단독특성 실험치를 이론계산 점과 함께 Fig.7에서 비교하였다. 동일 추력상태에서의 효율 비교를 위하여 $K_T/J^2 - \eta_0$ 곡선을 Fig.8에 보였으며 이론계산 결과 또한 Fig.9에 보였다. 이들 결과로부터 $\Delta\alpha=5^\circ$ 에서 최대 효율을 갖음을 알 수 있으며 실험과 이론에 대한 피치 각도별 효율변화를 Fig.10, 11에 각각 보였다. 이때의

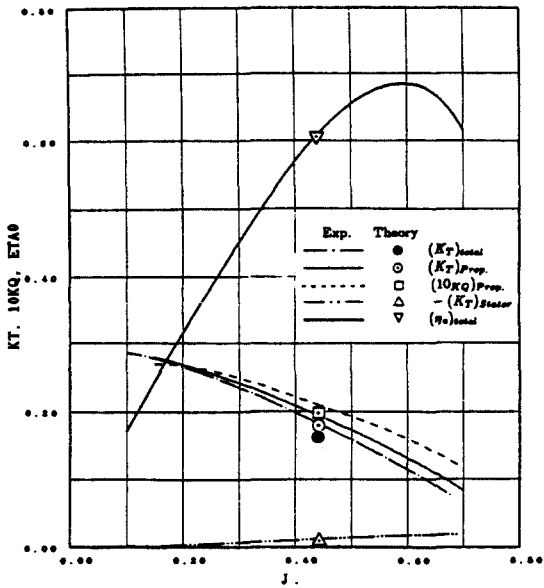


Fig.7 Open water test results of the stator(KP26 4)-propeller system($\Delta\alpha=5^\circ$)

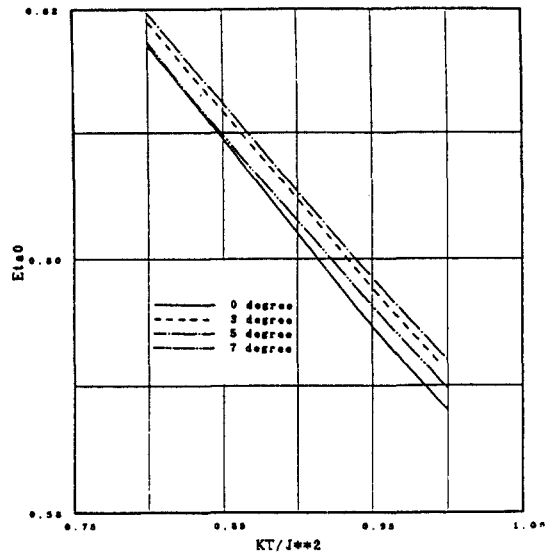


Fig.9 Comparison of computed propulsion efficiencies of the stator-propeller system with different stator angles

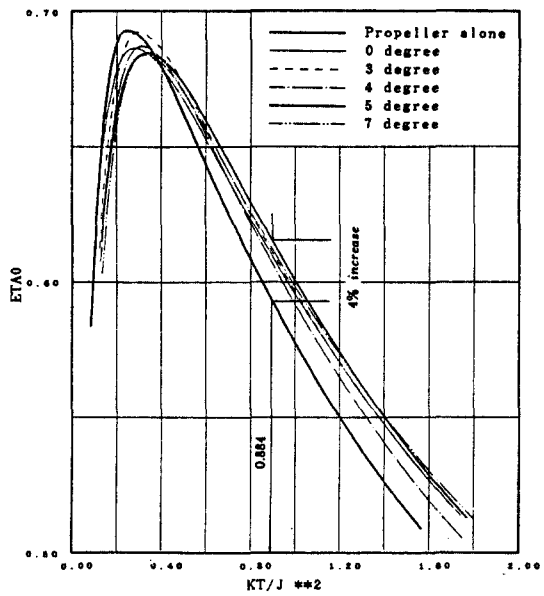


Fig.8 Comparison of propulsion efficiencies of the stator-propeller system with different stator angles

기준 추력은 $K_T/J^2=0.884$ 로 정하였으며 피치각 변화에 따른 효율의 변화가 이론보다는 실험결과에서 뚜렷이 나타나고 있으나 $\Delta\alpha=5^\circ$ 부근에서 동이

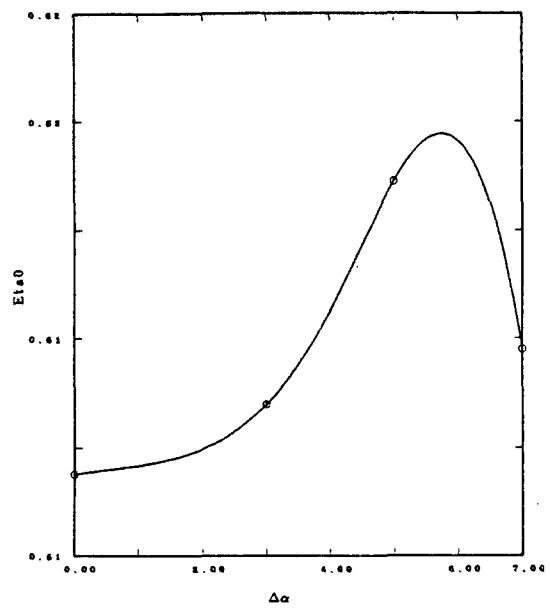


Fig.10 The stator angle .vs. efficiency curve for the determination of optimum stator angle

최적점이 존재하여 KP264와 KP249시스템의 경우 앞에서 언급한 보정에 의한 이론-모형시험 상호관계가 비교적 잘 이루어지고 있다고 생각된다.

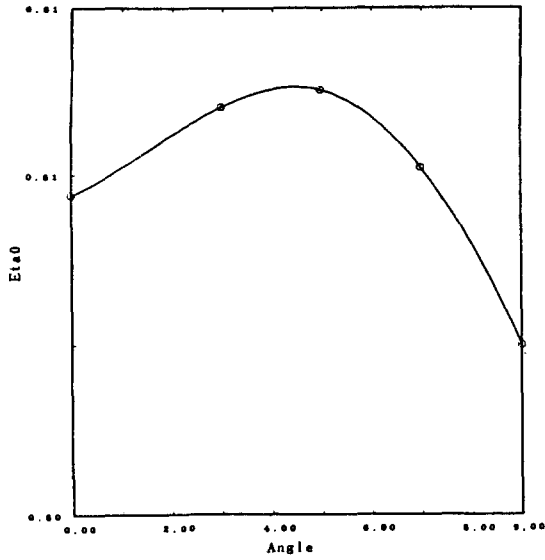


Fig.11 The stator angle .vs. computed efficiency curve for the determination of optimum stator angle

3.3 불균일류 중에서의 비대칭 설계

선박용 프로펠러는 궁극적으로는 실선 반류중에 최고의 성능이 나타날 수 있도록 하여야 한다. 선미 후류는 축방향, 반경방향 및 접선방향의 3 속도성분으로 구성되어 있으며 본 연구에서 사용한 불균일 반류를 Fig.12에 보였다.

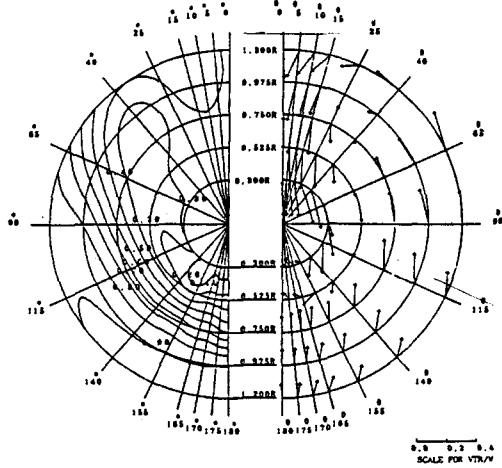


Fig.12 Iso-axial velocity contour and transverse velocity vectors for 300K VLCC(Full load condition, $V_s=15.5knots$)

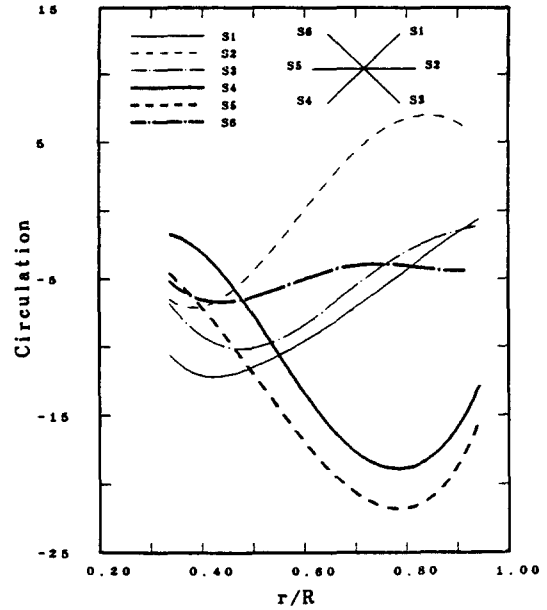


Fig.13 KP264 stator with the same of all blade pitch angles circulation distributions on each blade in non uniform wake

불균일 반류중에서 고정날개의 피치각이 각 날개 별로 동일한 경우 축방향 성분의 불균일도 뿐아니라 접선방향의 속도가 고정날개 입장에서 좌현과 우현에서 반대방향으로 나타나 각 날개에 걸리는 부하가 크게 달라지므로 고정날개의 각 날개 위치별 피치각도를 잘 조절해 주지 않으면 최대효율을 얻어내기 힘든 것이다. 비대칭형 성능해석 프로그램은 이와같은 불균일류 중에서의 특성 파악 및 피치각 결정에 유용하게 쓰일 수 있으며 이와같은 해석 시스템을 이용한 피치각 결정 방법에 관하여 간단히 언급하기로 한다.

불균일 반류중에서 고정날개의 날개 속도가 모두 동일할 경우 각 날개에 유입되는 접선방향 속도가 크게 달라 Fig.13에서 볼 수 있듯이 각 날개의 부하가 크게 달라지게 된다. 특히 S1~S3 즉 우현에 있는 날개들의 부하는 작아지는 반면 좌현에 있는 (S4~S6) 날개들의 부하는 커지게 된다.

Fig.14와 Table 3은 전체 부하의 평균값이 각 날개에 걸리도록 날개각도를 각각 돌려서 나온 부하값 및 돌린 각도를 나타내 주고 있다. 이때 우현과 좌현의 피치각 차이는 8도이다. Fig.14에서 알 수 있듯이 허브쪽에서의 부하값과 날개끝쪽에서의 부하값의

Table 3 KP264 stator mean circulation on each blade in non-uniform wake

Control	Condition	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Mean
No turning	Uniform	0.999	0.991	1.010	0.999	0.991	1.010	1.00
	Non-uniform	1.007	-0.078	0.805	1.579	2.020	0.666	1.00
turning	Non-uniform	0.950	0.869	0.977	1.034	1.154	1.006	1.00
	Angle($\Delta\alpha$)	+2.7°	+4.0°	+3.2°	-2.7°	-4.0°	-3.2°	0.0°

Stator mean angle of attack=13°

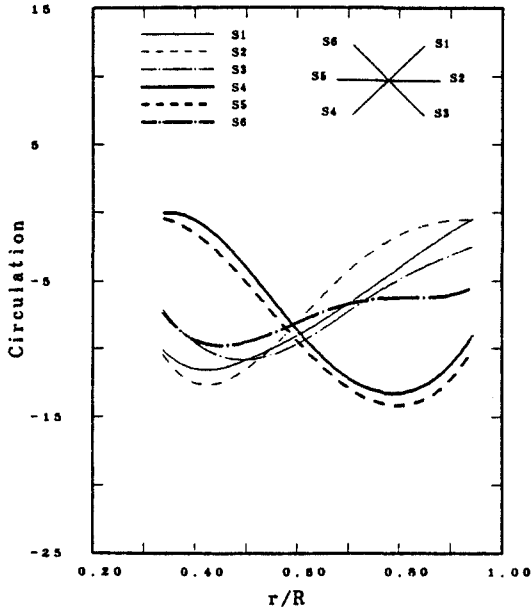


Fig.14 KP264 stator with each different blade pitch angles circulation distributions on each blade in non uniform wake

차이가 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 불균일 반류에 맞는 보다 더 정확한 고정날개를 설계하기 위해서는 각 날개 반경별로 유입반류에 맞도록 반경방향별 제원들을 전부 다르게 하여야 할 것이다. 그러나 반경방향별 제원을 완전히 다르게 설계할 경우 제작의 어려움 및 제작비의 과다 등으로 인한 손실과 추진효율 향상과의 이득을 계산해 보아야 할 것이다. Fig.14에서 알 수 있듯이 우현쪽을 좌현쪽보다 각 날개별 부하를 같게하기 위해 최대 8°까지 받음각을 크게 했음에도 우현쪽 허브에서는 불균일 반류의 영향으로 부하값이 반대임을 알 수 있다. 이는 오히려 고정날개에 의해 프로펠러의 접선속도를 가중시키므로 이와같은 관점에서는 이를 최대한 피하기 위해 받음각을 더 돌리는 것이

바람직하리라 생각된다. 그러나 이와같이 우현쪽 날개의 받음각이 커지게 되면 날개끝에서 부하량이 더욱 커지게 되고 날개 전체의 부하값이 평균 날개 부하값을 초과하게 된다. 그러므로 과도한 항력이나 stall이 발생되지 않는 범위에서 받음각을 증가시켜 주어야 할 것이다.

이와같은 비대칭 피치각 결정의 기준은 이론계산에 의해서만 결정되어질 수 있는 것이 아니며 계측된 불균일 반류에 대한 실선에의 확장값에 대한 실선 경험과 유효반류 추정도의 정도가 더욱 높아지는 일이 선행되어지지 않으면 보다 정도 높은 비대칭 설계는 어려우리라 생각된다. 그리고 무엇보다 중요한 것은 이와같은 비대칭 설계 및 성능해석이 자항 시험에 의해 확인되고 더 나아가서 실선에서 검증되어 이론과 실선 간의 상호관계가 더욱 확실히 파악되어져야 더욱 신뢰성있는 비대칭 설계가 이루어지리라 생각된다.

4. 개발된 해석 시스템을 이용한 비대칭 전류 고정날개 설계

지금까지는 본 연구를 통해 개발된 전류 고정날개 해석 시스템을 이용하여 전류 고정날개에 대한 모형 시험 결과와 이론해석 사이의 상관관계를 검증하고 해석하여 본 해석 시스템에 대한 신뢰성을 확보하였다. 이제 이와같은 설계/성능해석 시스템을 이용하여 최적고정날개-프로펠러 시스템을 설계/성능해석하여 보고자 한다.

먼저 대상선 및 대상 프로펠러는 앞에서 사용하였던 것으로 하며 최적의 고정날개-프로펠러 시스템을 구성하기 위하여 균일류중에서 대칭용 프로그램에 의한 설계과정을 거쳐 설계된 고정날개에 대한 비대칭 해석을 수행하기로 한다.

4.1 균일류 중에서의 설계 및 성능해석

효율이 우수한 고정날개를 설계하기 위해서는

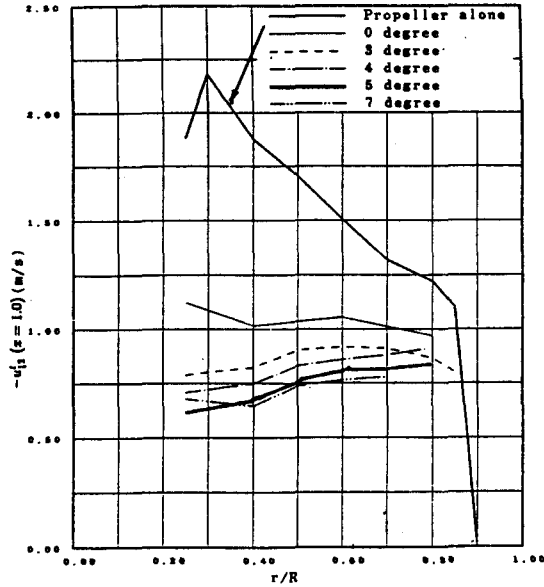


Fig.15 Circumferentially averaged tangential velocity component of the stator-propeller system at 1.0R downstream of propeller plane measured by L.D.V. system with varying stator pitch angle ($V_A=5m/s, n=45rps$)

프로펠러의 후류 에너지의 회수를 극대화하여 에너지 손실을 극소화시켜야 한다. 그러나 프로펠러의 회전 에너지를 많이 상쇄시키기 위해 고정날개의 부하가 커지게 되면 앞에서 본 바와 같이 고정날개의 저항이 급격히 증가하여 큰 저항이 발생되게 된다. 그러므로 프로펠러의 회전 에너지를 최대한 흡수하면서 저항을 극소화하는 것이 효율이 우수한 고정날개 설계의 가장 중요한 개념이 될 것이다.

Fig.15는 KP264+KP249 고정날개-프로펠러 시스템의 L.D.V. 실험 결과로써 고정날개 피치각 변화에 따른 후류 회전속도 상쇄량의 변화를 보이고 있다. $\Delta\alpha=7^\circ$ 가 되면 5° 때보다 후류 회전속도 상쇄량은 많으나, 이에 비하여 Fig.16에서 볼 수 있듯이 고정날개의 항력이 크게 증가함을 알 수 있다. 이 경우 허브에석의 받음각(angle of attack)은 20° 가 넘게 되므로 이 부분에서 심한 박리가 발생되리라 예상된다. 이 경우 설계 받음각으로부터($\Delta\alpha=5^\circ$) 5° 에서 최고 효율을 보이고 있다. 그러나 심한 박리를 피하기 위해 받음각에 의한 부하를 줄이고 캠버에 의한 부하를 늘리게 되면 프로펠러에서와 같이 캐비테이션이 크게 문제가 되지 않는 경우 효율의 증가를

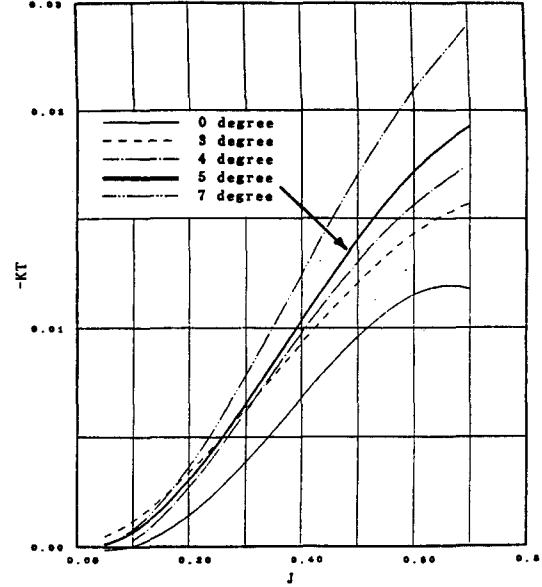


Fig.16 Comparison of the stator drags ($-K_T$) for the stator-propeller system with different stator angles

얻을 수 있을 것이다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이 유효반류의 정확한 추정 등이 쉽지 않기 때문에 비대칭 설계에서 국부적으로 과도한 받음각을 주지 않기 위해 날개를 반경방향별로 동일 피치각을 갖도록 설계함이 타당하리라 생각된다. 이렇게 설계될 경우 실선제작에 있어서도 상당한 편리성이 제공된다.

본 연구에서는 두번째 고정날개(KP264)를 근간으로 반경방향별 동일 피치각을 갖는 비대칭형 고정날개에 대한 설계를 수행하였다. 먼저 최적 직경을 결정하기 위해 고정날개 직경을 프로펠러 직경에 0.6, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2배로 변화시켜 기준 추력계수 상태($K_T/J^2=0.884$)에서의 효율 비교를 수행하였다. Fig.17에서 볼 수 있듯이 이 경우 프로펠러 직경의 90%가 최적치임을 알 수 있다. 코오드 분포와 두께 분포의 경우 반경방향별 선형적 분포를 취하여 허브에서의 값과 날개끝에서 값을 변수로 하여 많은 반복계산을 통해 가장 효율이 좋은 제원을 결정하였다. 코오드 분포와 두께분포를 선형적으로 결정할 경우 실선제작에서의 편리성이 있게 된다. 통상 고정날개의 경우 프로펠러에 비하여 부하가 적게 걸리므로 두께에 대한 제한은 거의 없는 편이나 설계각도 결정이 조금이라도 잘못되게 되면 두께가 얇고 캠버

Table 4 The ratio of camber and thickness for the design of KP280 stator

Radius	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
f_0/t_0	0.400	0.400	0.349	0.350	0.350	0.300	0.250	0.200	0.100

Table 5 Geometry of the designed asymmetry model stator(KP280)

Propeller No.	KP249	Propeller Name	STATOR3
Designed by	KRISO	Project Name	
Propeller Type	CPP	No. of Propeller	SINGLE
Diam.(Model)	225.000mm	Scale Ratio(λ)	39.200
A_E/A_0		$(P/D)_{mean}$	9.088
Skew($^\circ$)	.000	Rake($^\circ$)	.000
Section Name		Hub Ratio	.330
No. of Blades	6	Comment	ASYM.

r/R	P/D	X_m/D	$\theta_m(^\circ)$	l/D	$f_0/D(10^3)$	$t_0/D(10^3)$	f_{oll}
.30	3.7800	.0000	.00	.2263		33.32	
.40	5.0397	.0000	.00	.2226		29.85	
.50	6.3005	.0000	.00	.2187		26.38	
.60	7.5601	.0000	.00	.2150		22.90	
.70	8.8197	.0000	.00	.2112		19.43	
.80	10.0805	.0000	.00	.2075		15.95	
.90	11.3401	.0000	.00	.2037		12.48	
.95	11.9705	.0000	.00	.2019		10.74	
1.00	12.5998	.0000	.00	.2000		9.00	

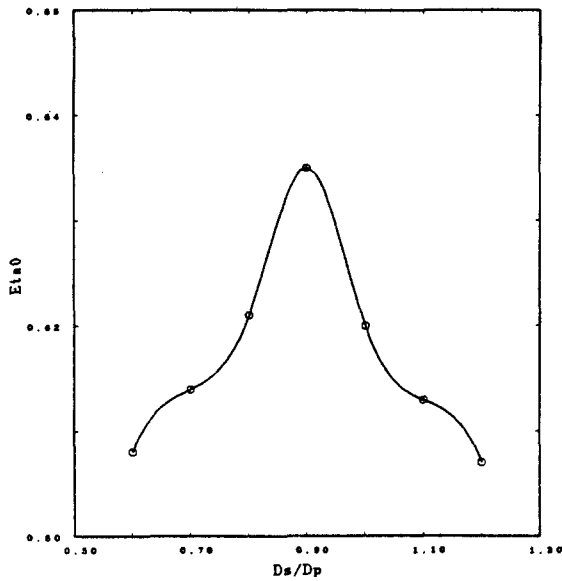


Fig.17 The stator diameter .vs. computed efficiency curve for the determination of the optimum diameter

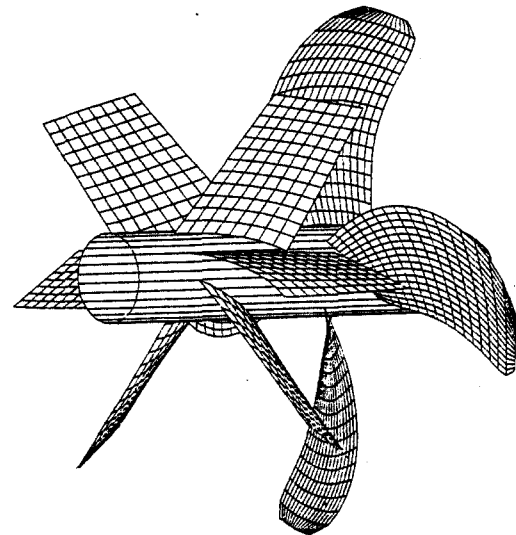


Fig.18 A view of surface discretization of the designed asymmetric stator-propeller system

가 큰 단면의 경우 심한 박리현상이 나타날 뿐 아니라 제작상의 어려움이 가중되므로 본 연구에서는 두께/캠버비를 Table 4에 보인것과 같이 결정하여

설계를 수행하였다. 설계된 고정날개의 모습을 Fig. 18에 보였으며 제원을 Table 5에 정리하였다. 고정날개 피치각을 변화시켰을 때의 효율변화를 Fig.19에

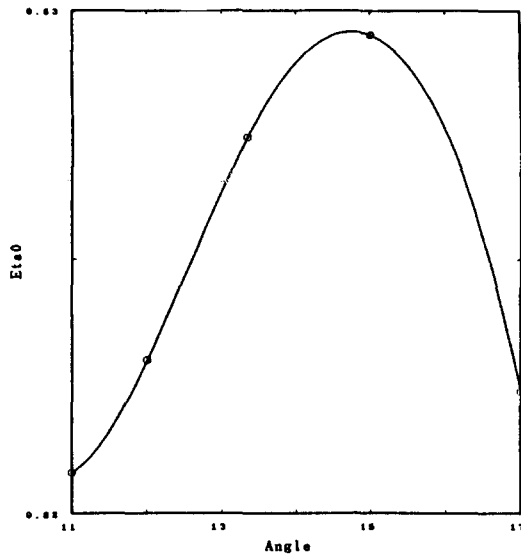


Fig.19 The stator angle .vs. computed efficiency curve for the determination of optimum stator angle

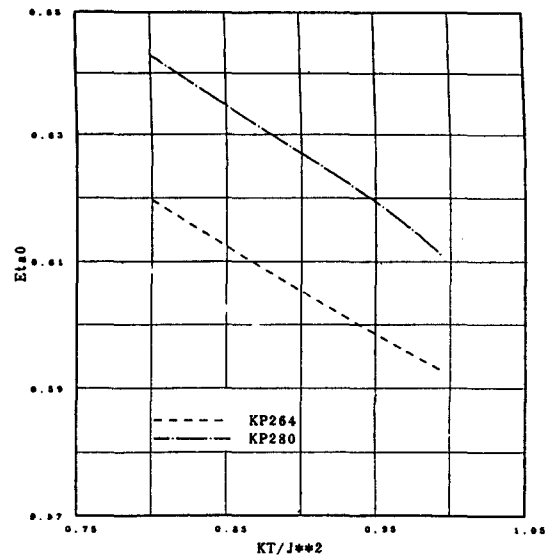


Fig.21 Comparison of the efficiencies with different stator-propeller systems

-프로펠러 시스템의 후류 회전속도 잔여량을 Fig. 20에 보였으며 K_T/J^2 를 기준으로 효율은 Fig.21에서 비교하였다. 기존 고정날개에 비하여 효율의 향상이 크게 된 것은 회전 에너지의 많은 부분을 캠버를 통하여 분담하게 하였으며 프로펠러에서 부하가 비교적 큰 Mid-span 부분의 회전에너지를 집중적으로 상쇄시키도록 설계되어졌기 때문이라 생각된다.

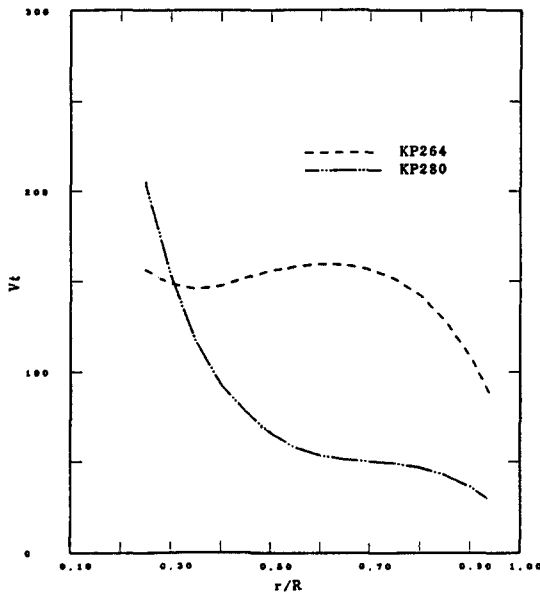


Fig.20 Comparison of the calculated tangential velocity behind different stator-propeller system

보였으며 이로부터 볼 때 약 $14^\circ \sim 15^\circ$ 에서 최적 피치각을 갖음을 알 수 있다.

KP264+KP249 시스템과 비교하여 설계 고정날개

4.2 불균일류 중에서의 설계 및 성능해석

앞절에서 기존 고정날개에 비하여 이론적으로 우수한 성능의 고정날개를 설계하였고 본절에서는 불균일 반류중에서의 성능해석에 관하여 살펴보고자 한다. 불균일 반류는 Fig.13에서 보인바 있는 반류를 사용하기로 한다.

먼저 설계된 동일 날개각도를 갖는 경우에 대하여 불균일류 중에서 해석한 결과를 Fig.22에서 보여주고 있다. Fig.22에서 보인바와 같이 불균일류 중에서 좌현에는 부하가 커지는 반면 우현에는 부하가 크게 감소하고 있는 현상은 앞에서 말한 바와 같다. 앞에서 언급한 방법에 따라 각 날개의 각도를 조절하여 얻은 결과를 Table 6과 Fig.23에 보였다. 좌현쪽 날개와 우현쪽 날개의 피치각 차이는 앞에서와 같이 8° 가량 나타나고 있다. 동일한 불균일 반류를 사용할 경우 이와같은 결과가 나타나리라 생각되며 자항 시험 및 실선 시운전 등을 통한 검증에 의해 최적

Table 6 Designed stator(KP280) mean circulation on each blade in non-uniform wake

Control	Condition	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Mean
No turning	Uniform	1.011	0.975	1.014	1.011	0.975	1.014	1.00
	Non-uniform	1.388	0.672	1.109	0.897	1.239	0.695	1.00
turning	Non-uniform	0.972	1.033	0.997	0.990	0.972	1.036	1.00
	Angle($\Delta\alpha$)	-5.0°	+4.0°	-1.0°	+1.0°	-3.0°	+4.0°	0.0°

Stator mean angle of attack=14°

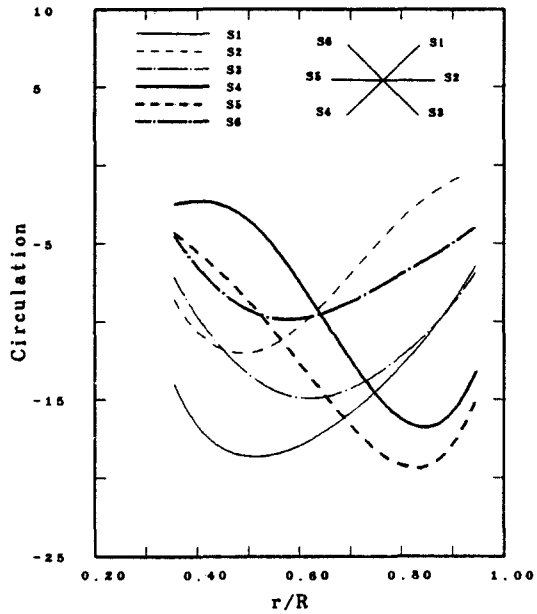


Fig.22 Designed stator(KP280) with the same of all blade pitch angles circulation distributions on each blade in non uniform wake

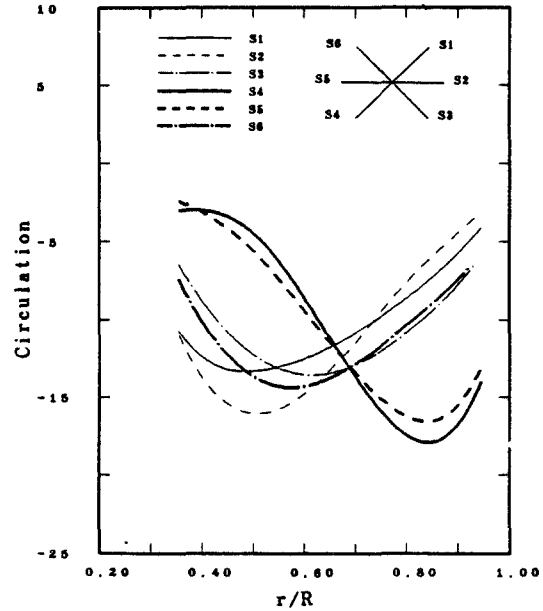


Fig.23 Designed stator(KP280) with each different blade pitch angles circulation distributions on each blade in non uniform wake

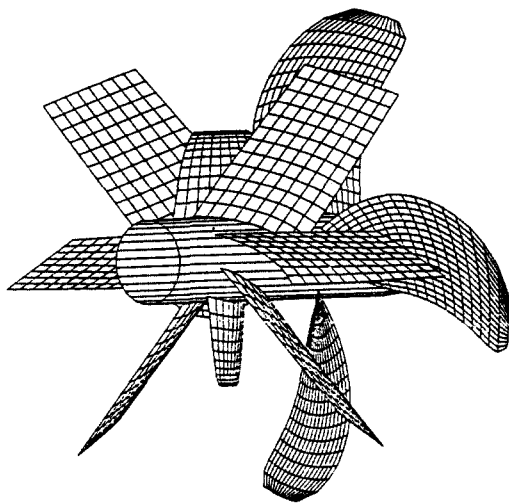


Fig.24 The proposed new stator-propeller system

비대칭 피치각들이 본 해석 시스템을 이용하여 결정되어질 수 있을 것이다.

5. 결 언

양력면 이론을 이용하여 비대칭 고정날개-프로펠러 추진시스템을 불균일 반류중에서 해석할 수 있는 성능해석 시스템을 완성하였다. 본 연구의 결과 및 향후 연구방향을 다음과 같이 몇가지로 요약하였다.

- 양력면 이론을 이용하여 비대칭 고정날개-프로펠러 추진 시스템에 대한 불균일 반류중에서의 성능해석을 수행하였다. 고정날개가 대형선박에서 주로 사용되어지므로 불균일 반류의 불균일도가 심하고 특히 접선방향의 속도성분

이 커서 균일류 중에서와는 달리 고정날개의 각도를 다르게 돌려주지 않으면 안된다. 본 연구를 통하여 이와같은 비대칭 고정날개 각각의 각도 결정뿐 아니라 각 날개별 최적 제원을 결정할 수 있도록 하였다.

- 기존 고정날개 KP264에 대한 모형시험 자료를 참고로 모형시험-이론 상관관계를 새롭게 도출하였다. 고정날개의 경우는 프로펠러와 달리 과도한 받음각과 또한 레이놀즈수가 프로펠러에 비해 훨씬 적어 박리현상 등이 발생되어 지므로 순수한 이상유체 가정하에서의 이론 계산과는 차이가 있을 수 밖에 없다. 본 연구를 통해 경험식을 도입하여 모형시험과의 상관관계를 도출하고 실제적으로 설계에 유용히 사용할 수 있게 되었다. 더 많은 모형시험 자료가 실선 시운전 결과가 확보되면 더 좋은 상관관계가 도출될 수 있으리라 생각된다.
- 본 연구를 통해 프로펠러의 후류에너지를 기존 고정날개보다 많이 상쇄시킬 수 있도록 제안하였으나 허브부분에서의 회전에너지가 비교적 많이 남아 있어(Fig.20 참조) 이 부분의 에너지를 집중적으로 회수할 수 있는 고정날개로서 Fig.24와 같은 구조의 고정날개에 대한 연구를 제안해 본다. Figure 24에서 보인 고정날개는 선체에 의해 크게 제약을 받지 않을 뿐 아니라 허브의 에너지만을 집중적으로 회수할 수 있는 장점이 있다. 그러나 위 아래에 있는 짧은 두개의 날개는 가로 세로비(aspect ratio)가 작아짐에 따라 3차원 효과의 저항이 급격히 늘어날 가능성이 있으므로 코오드를 짧게 하는 등의 연구가 뒤따라야 할 것이다. 본 연구에서 개발된 비대칭 고정날개 해석 시스템은 이와같은 연구에 매우 유용하리라 생각된다.
- 마지막으로 본 시스템을 이용하여 CRP, Pump

jet 추진장치의 성능요소 기술개발의 근간이 되고 이 연구가 도움이 될 수 있으리라 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술처의 기본과제 사업과 대우조선(주)의 수탁사업으로 수행되었으며 관련 제위께 감사드립니다. 수많은 실험과 실험자료정리에 노고를 아끼지 않았던 김경열, 이창용氏에게 특별한 감사드리고 Typing에 수고하신 전해숙氏께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] McCutchen, "A Theorem on Swirl Loss in Propeller Wakes," *J. of Aircraft*, Vol.22, No. 4, April 1985.
- [2] 이진태 외, "전류 고정날개 추진시스템 연구", 한국해사기술연구소 보고서 UCE424-1371·D, 1989.
- [3] 김문찬 외, "비대칭 전류 고정날개 추진 시스템 연구", 한국해사기술연구소 보고서 UCE500-1558E·D 1991.12.
- [4] 이진태 외, "전류 고정날개에 의한 고효율 복합 추진 시스템 개발 공동 연구(I)", 한국해사기술연구소 보고서, BSI826-1479.D, 1991.
- [5] 이창섭 외, "양력면 이론에 의한 프로펠러 성능해석", 선박해양기술, Vol.4, 1990.12.
- [6] Hoerner, S. *Fluid Dynamic Drag*, Bricktown, N.J. 1965.
- [7] 김기섭 외, "에인수조와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 단독특성의 실험적 상호관계 해석", '91 대한조선학회 추계 학술대회, Proceeding, 1991.