
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 29 卷 第 4 號 1992 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.4, November 1992

추진 효율 향상을 위한 고정날개-프로펠러 추진시스템 개발 :
 대칭형 고정날개 추진 시스템

이진태*, 김문찬*, 서정천*, 김수형**, 최진근**

Development of a Preswirl Stator-Propeller System for Improvement of
 Propulsion Efficiency : a Symmetric Stator Propulsion System

by

Jin-Tae Lee*, Moon-Chan Kim*, Jung-Chun Suh*,
 Soo-Hyung Kim** and Jin-Keun Choi**

요 약

추진 효율 향상을 위한 대칭형 전류 고정날개-프로펠러 추진시스템의 설계, 이론성능해석 및 모형시험 과정을 정리하였다. 프로펠러 후류에서의 회전방향 운동에너지 회수를 통한 추진효율 향상을 도모하기 위하여 프로펠러 전방에 반대방향의 회전 속도를 주기 위한 고정날개를 설치하였다.

모형시험 결과 대칭형 전류 고정날개 추진시스템이 단독프로펠러에 비하여 3% 정도 추진효율의 향상이 있음을 확인하였다. 실선 장착시에는 선체 반류에서의 난류 강도증가 및 레이놀드 수 증가에 따른 고정날개 표면에서의 박리현상 감소에 의하여 고정날개 항력계수가 감소할 것으로 추정되며 그에 따라 본 추진시스템의 추진효율 증가량이 더욱 커지리라 판단된다.

Abstract

A series of design, theoretical analysis and model test procedures is presented for the development of an axisymmetric stator-propeller system. A preswirl stator is located in front of a propeller in order to improve the propulsion efficiency by cancellation of the slip stream rotational velocity due to the propeller.

발 표 : 1991년도 대한조선학회 추계연구발표회('91. 11. 16.)

접수일자 : 1991년 12월 2일, 재접수일자 : 1992년 11월 3일

* 정회원, 한국해사기술연구소

** 정회원, 대우조선공업(주)

Model test results show that propulsion efficiency gain due to the symmetric stator-propeller system is about 3% compared to the single propeller. This efficiency gain would increase for full scale application since the pressure drag coefficient of the stator would decrease due to increasement of turbulent intensity behind the hull wake and increasement of Reynolds number.

1. 서 언

회전하면서 추진력을 발생하는 프로펠러의 후류에는 프로펠러 회전방향의 접선 속도성분이 존재하게 되고 그에 의한 운동에너지의 손실이 발생된다. 프로펠러 후류의 회전방향 운동에너지 회수를 통하여 추진효율의 향상을 도모하기 위한 복합추진장치의 개발 및 실용화는 오래전 부터 시도되어 왔다. 추진효율 향상을 위한 여러종류의 복합추진장치에 대한 설계 개념 및 최근 실선 적용 사례는 Blaurock [1]에 정리되어 있으며 일본의 최근 기술동향은 참고 문헌[2]에 정리되어 있다.

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[3].

프로펠러의 전방 혹은 후방에 고정날개를 설치하여 프로펠러 후류에서의 회전방향 운동에너지를 회수하려는 시도는 결코 새로운 개념이 아니다. 일찌기 1903년 C.G. Curtis는 프로펠러 전방에 고정날개를 설치하여 추진효율 향상을 도모한 바 있으며 (U.S. Patent #803,671), 독일(German Patent #26 7,899: 1912년)에서도 비슷한 개념의 고정날개에 의한 추진효율 향상을 시도한 바 있다[4]. 프로펠러의 전방 뿐 아니라 후방에 고정날개를 설치하여 프로펠러 후류의 회전 방향 운동에너지를 회수하려는 시도도 있었다(U.S. Patent #1,386,835: 1921년), 그후 후방 고정날개를 타의 일부분으로 설치하여(U.S. Patent #1,461,841: 1923년) 새로운 장치를 설치하는 번거로움을 최소화하여 추진효율 향상을 도모하였다.

프로펠러 전방 혹은 후방에 고정날개를 설치하여 추진효율 향상을 꾀하는 장치를 일반적으로 Contra Propeller라고 칭하고 있으며 특히 타의 일부분으로 설치되었을 때 Contra Rudder라고 칭한다. 이러한

Contra Propeller는 1930년대 이후 거의 실선에 사용되지 못하였으나 1960년대 이후 일본의 Mitsubishi 조선소에서 프로펠러 전방에 고정날개를 설치하여 이를 Reaction Fin이라 칭하였으며 이를 이용한 추진장치에 대한 연구가 활발하게 진행되었다[5]. 1970년대초 유가급상승으로 인하여 선박의 연료비가 상승하여 추진효율 향상을 위한 복합 추진장치에 대한 인식이 증가된 이후 Mitsubishi 조선소에서 건조되는 대형 유조선에는 대부분 Reaction Fin을 장착하였다[6].

이와같이 추진효율 향상을 위한 전류 고정날개-프로펠러 추진 시스템은 새로운 개념이 아니며 현재 실용화되어 많은 실적선을 갖고 있다. 그러나 전류 고정날개 추진 시스템의 설계 및 성능해석에 대한 이론은 명확히 구명되지 못하고 있으며 대부분 모형 시험 결과 및 실선 설치 경험을 토대로 설계되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 추진효율 향상을 위한 전류 고정날개 추진 시스템을 개발하기 위하여 그의 이론 성능 해석 방법을 제시하였고 기존 프로펠러를 대상으로 한 대칭형 고정날개를 설계하여 고정날개-프로펠러 시스템의 추진효율 향상을 검증하기 위한 모형시험을 수행하였다. 일반적으로 대상선형의 반류분포를 고려한 고정날개는 각 고정날개의 피치각이 서로 다른 비대칭형 고정날개로 설계되어지나 본 논문에서는 균일류 상태에서의 추진효율 증가량을 확인하기 위한 목적으로 대칭형 고정날개를 설계하였다. 대상선의 반류분포를 고려한 비대칭형 고정날개 추진 시스템의 개발과정은 추후 발표될 예정이다.

모형시험 결과 대칭형 고정날개를 프로펠러 전방에 설치함으로써 추진효율이 약 3% 정도 증가함을 확인하였으며, 실선 적용시 선체 반류에서의 난류강도(Turbulent intensity) 증가 및 레이놀드 수 증가에 따른 고정날개 표면에서의 박리현상 감소에 의하여 고정날개의 항력계수의 감소가 추정되며 그에 따라 고정날개 추진시스템의 추진효율증가량도 커지리라 예상된다.

2. 이론 성능 해석

2.1 개요

프로펠러와 전류 고정날개의 복합 추진 시스템의 유동 해석은 상호 유기작용의 영향을 고려한 단독 추진장치로 생각하여 개별적으로 성능해석 이론을 적용할 수 있다. 더우기 전류 고정날개는 회전속도가 0(전진비가 무한대)인 프로펠러로 간주하면 프로펠러 유동해석 방법을 동일하게 적용할 수 있다. 프로펠러 유동해석 방법에는 양력면 이론과 양력판 이론이 널리 사용되는데 본 연구에서는 그동안 실선 적용성이 높은 양력면 이론을 채택하였다.

프로펠러와 전류 고정날개는 비점성, 비압축성인 무한 영역의 유체중에서 일정한 전진 속도와 회전 속도를 가지고 움직인다고 가정한다. 다만 추진 시스템에 작용하는 힘(추력 및 토크)을 계산시 점성 효과를 경험적으로 고려하기 위해서 국부 저항 계수를 이용하였다. 양력면 이론에서 프로펠러와 전류 고정날개간의 상호작용을 유기 속도성분으로 표현하는데 전반적으로 그 상호 유기속도는 프로펠러의 회전에 의하여 주기성을 갖는 비정상성(unsteadiness) 과 공간좌표의 함수성을 내포하고 있다. 그러나 계산 편의상 유기속도를 정해진 평면상에서 시간 평균값으로 산정하여 복잡한 비정상성과 함수성을 무시한 채 정상상태의 설계를 수행하는 방법이 많이 이용되고 있다.

정상상태의 문제 정식화를 위해 유기속도 계산은 프로펠러 평면과 전류 고정날개 평면상의 원주방향의 시간 평균값(circumferentially time-averaged value) 으로 근사화 하였으며 Fig. 1에서 보인바와 같이 프로펠러 날개에 고정, 회전하는 상대 좌표계(x, y, z)와 전류 고정날개에 고정된 공간 고정 좌표계(x', y', z')를 택하였다. 아울러 추진 시스템의 전진 속도 또는 선체 후류 속도에 해당하는 속도로 유체가 유입하는 상태로 바꾸면 단독 프로펠러 성능 해석시 이용한 기존의 양력면 이론 계산 프로그램에 유기속도 계산 부분을 첨가하여 활용할 수 있다. 더우기 이와 같은 좌표계 선정은 캐비테이션 터널 또는 회류 수조 시험시 동일하게 적용될 수 있으므로 이론적·실험적 해석 결과를 직접 비교, 검토할 수 있다.

프로펠러에 고정된 상대 좌표계(x, y, z)의 중심은 프로펠러 회전중심축과 프로펠러 평면(propeller plane) 과의 교점으로 잡고 x축은 회전 중심축을

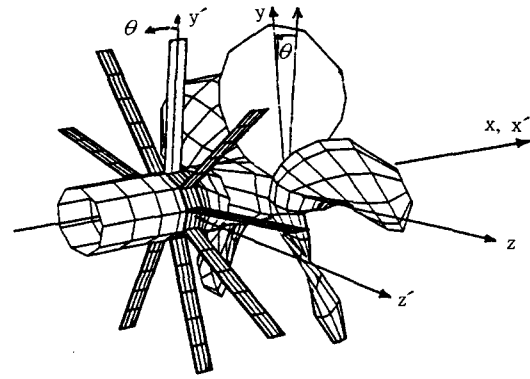


Fig. 1 Coordinate systems of a stator-propeller compound propulsor : a rotating frame (x, y, z) and a fixed frame(x', y', z')

따라 프로펠러 후류 방향으로, y축은 프로펠러 주날개(key-blade)의 프로펠러 기준선(propeller reference line)으로, z축은(x, y, z)우수좌표계가 형성되도록 결정하였다. 또한 원통 좌표계(x, r, theta)를 도입하였으며 r은 회전 중심축으로부터 반경좌표를 나타내고 각좌표 theta는 편의상 프로펠러 회전방향과 같은 방향으로 잡는다. 전류 고정날개에 고정된 공간 고정 좌표계(x', y', z')도 우수좌표계 형태를 택하였다. 그 중심은 프로펠러 회전 중심축과 전류 고정날개 평면(stator-plane)의 교점으로 잡고 x' 축은 그 후류 방향으로, y' 축은 연직 상방향으로 정하였다.

프로펠러와 전류 고정날개의 각각의 시스템에 대한 수학적 모형화는 이창섭 외[7]의 양력면 이론에 의한 해석기법을 사용하였으며 본문에서는 이에 대한 자세한 설명은 생략한다. 다만 전류 고정날개의 후류면(wake sheet)은 프로펠러 후류면의 모형화와는 달리 수축(contraction)이나 변형(distorsion) 없이 x' 축과 평행한 평면으로 가정하였다. 이와 같은 가정은 전류 고정날개에 작용하는 순환분포, 추력 및 토크에게 큰 영향을 주지 않으며 프로펠러 평면(propeller plane) 상의 그 후류면에 의해 유기되는 원주방향 평균 속도성분에는 별 영향을 끼치지 않는다. 왜냐하면 비회전성 유동에서 그 원주방향 평균속도는 Stokes의 이론을 이용하면 전류 고정날개의 순환 분포와 다음과 같이 직접 연관되기 때문이다[8].

$$u^t(r) = -\frac{Z \cdot \Gamma(r)}{2\pi r} \tag{1}$$

여기서,

Z : 전류 고정날개 또는 프로펠러의 날개수

Γ : 한날개의 순환분포

r : 반경좌표

u^t : 원주방향 평균 유기속도

이 식에서 후류면의 반경방향 수축(contraction)으로 인한 반경좌표 r 의 변화는 무시하였다. 이 식을 비대칭형 전류 고정날개에 적용할 경우, Γ 가 여타 날개에 대해 대칭성이 성립하지 않으므로 $Z \cdot \Gamma$ 대신에 각 날개 순환분포의 합으로 치환하여야 한다. 양력면 이론적용시 전류 고정날개의 허브효과는 프로펠러 허브와 마찬가지로 전체적으로 작용하는 추력 및 토크에는 미미하여 무시하였다. 또한 캐비티는 발생하지 않는 것으로 가정한다.

실제 고정날개의 직경은 프로펠러의 직경보다 크게 선택되어 고정날개 날개끝 보오텍스가 프로펠러 원판 외부로 통과하도록 선택되어지나 본 수치모형에서의 프로펠러와 고정날개의 직경을 동일하게 선택되었다. 또한 프로펠러와 고정날개의 반경방향 분할개수 및 분할간격을 동일하게 선택하여 수치계산이 쉽도록 하였다.

전류 고정날개 및 프로펠러에 작용하는 추력과 토크는 Kutta-Joukowski 정리 및 Lagally 정리에 의하여(양력면 이론에서 사용되는) 이산화된 선분요소의 보오텍스와 쏘오스에 작용하는 국소힘과 모멘트를 합하여 구하였다. 또한 점성영향을 고려하기 위해서 국소 속도의 제곱에 비례하는 저항값을 고려하였으며 그 저항계수는 추진장치의 부하조건에 따라 2차원 날개단면에 대한 실험값을 사용하였다. 본 논문에서 표시되는 물리량은 달리 언급이 없는한 선속(V_s)과 프로펠러 반경(R)으로 무차원화된 값이다.

2.2 전류 고정날개-프로펠러 상호작용 해석

2개 이상의 추진장치로 구성된 복합 추진장치를 해석하기 위한 방법으로, 양력면 이론에 의하여 각각의 추진장치를 특이점 분포로 표시하고, 상호 유기속도를 고려하여 양력면 표면에서의 비침투 경계조건을 만족하는 특이점의 세기를 결정하는 방법을 택하였다.

전류 고정날개-프로펠러 상호 유기속도 성분을 Fig. 2와 같이 표시할 수 있다. 위첨자 a와 t는 각각 축방향 및 접선방향을 의미하며 아래첨자 1은 전류 고정날개를 아래첨자 2는 프로펠러를 의미한다. 예를 들면 $u_1^a(x_0, r_0)$ 은 $x=x_0$ 평면상에서 $r=r_0$ 원주를

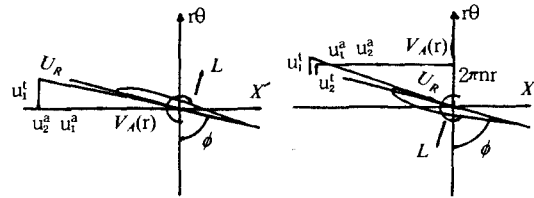


Fig. 2 Velocity vector diagrams for the analysis of the propeller-stator propulsion system

따라 전류 고정날개 단독장치에 의해 유기되는 원주방향(또는 회전방향) 평균 축방향 속도를 의미한다. 또한 $u_{1a}^t(x_0, r_0)$ 은 전류 고정날개-프로펠러 복합 추진장치에 의해 유기되는 원주방향 평균접선방향 속도를 의미한다. 양력면 이론 프로그램의 입력자료인 상호 유기속도 성분은 각 추진장치 평면에서의 원주방향 평균값으로 근사화 했으며, 반경방향의 유기 속도성분은 부하가 크지 않은 추진장치의 경우 크기가 상대적으로 적으므로 자세한 고찰은 생략한다. 전류 고정날개 해석시 프로펠러에 의한 전류 고정날개 평면에서의 원주방향 평균 접선방향 유기속도 성분은 Stokes 이론에 의해 이론적으로 0이 되므로 고려하지 않고, 축방향과 반경방향 속도 성분만을 고려한다. 반면에 프로펠러 유동 해석시는 전류 고정날개에 의한 3방향 유기속도 성분을 고려하였다.

상호 작용 해석은 단독 추진장치의 해석값을 초기값으로 하여 상호 유기속도 계산값을 상호간 주고받는 반복 계산법에 의해서 수렴성이 이루어진 단계까지 반복 수행한다.

이와 같은 해석과정을 이용하여 이미 설계된 프로펠러에 적합한 전류 고정날개의 설계를 수행할 수 있는 바, 고정날개에 의한 프로펠러 궁극반류(ultimate wake) 평면에서의 접선방향 유기속도 $u_1^t(x=\infty, r)$ 가 프로펠러에 의한 궁극반류 평면에서의 회전방향 유기속도 $u_2^t(x=\infty, r)$ 를 상쇄시키도록 전류 고정날개의 형상을 설계하여 복합 추진시스템 후류에서 회전방향 속도 성분이 없도록 하는 것이 이상적인 설계 개념이다. 본 연구에서는 이와같은 설계개념에 맞도록 전류 고정날개의 주요 형상(특히, 받음각 또는 날개 회전각)을 양력면 이론에 의해서 결정하였다. 이와같은 설계개념은 완전한 비점성유체의 이론적 해석에 중점을 두고 기본 설계 개념을 구축하려는 의도에서 택하였다. 점성의 영향을 받는 실제 유체에서 작동하는 고정날개-프로펠러 시스템은 상기의 설계개념을 완전히 만족하지 못하리라 예상된다. 제3장과 제4장의 실험결과로 보인바와 같이

최고 효율증가에 일치하는 전류 고정날개의 받음각이 기준설계점의 받음각과 현저히 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 제3장과 제4장에서 다루기로 한다.

2.3 임의점 유기속도 계산

양력면 이론을 사용하여 전류 고정날개 및 프로펠러 날개의 평균선(mean-line)면에 연속적으로 분포된 특이점들을 격자모양으로 집중시켜 놓은 직선 선분 요소상에 분포된 특이점계로 대체할 수 있다. 날개 형상은 보오텍스와 쏘오스 특이점으로 구성하고 날개 후류반류면은 보오텍스 특이점으로 표현된다. 후류 반류면의 기하학적 형상 표현은 실험을 바탕으로 하는 경험적인 방법으로 표현되는 바 프로펠러 후류 반류면은 수축과 변형을 고려한 Greeley와 Kerwin[9]의 반류 모형을 채택하였으며 전류 고정날개의 후류 반류면은 날개 뒤끝날로 부터 프로펠러 회전 중심축에 평행한(즉 x' 축에 평행한) 평면으로 근사화 하였다.

전류 고정날개와 그 후류반류면 및 프로펠러와 그 후류 반류면을 특이점계로 대체하고 경계치문제를 푼후 형상과 그 세기가 결정되면 이들 선분 쏘오스 및 보오텍스에 의한 공간상의 점에서 유기되는 속도는 Biot-Savart 법칙에 의해서 계산할 수 있다. 양력면 이론에 의해 프로펠러 경계치 문제를 풀 때 사용된 이산화된 격자모양의 특이점계를 Fig. 3에 보였으며 격자수는 전류 고정날개 유동해석시도 동일하게 적용하였다.

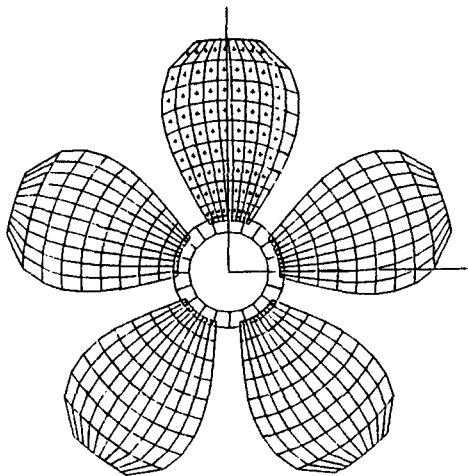


Fig. 3 Illustration of singularity elements and control points on blades

한 날개 간격내에서 상대 추진장치 평면상의 여러 공간점(field-point)을 택하여 그 유기속도들을 회전방향(원주방향)으로 평균을 취하면 원하는 상호 평균 유기속도 성분을 구할 수 있다. 이 평균 유기속도 성분을 상대 추진장치 해석시 본래 단독 성능해석시 입력되는 유입류 속도성분에 추가하여 경계치문제를 해석함으로써 상호작용을 고려한다. 이때 3방향 평균 유기속도 성분이 계산되는 바, 회전방향 속도성분은 경계치 문제를 푼 후 알 수 있는 반경방향 부하분포(순환분포)(Circulation distribution) $\Gamma(r)$ 로 부터 식(1)에 의해서 용이하게 구할 수 있다.

식(1)은 회전방향 속도성분만을 표현했기 때문에 3방향 유기속도 성분 계산시 불충분하나 성분요소 특이점계의 Biot-Savart 적분식으로 계산되는 실제 프로그램의 검증을 위해 비교 계산을 목적으로 활용할 수 있다. 그 예로써 단독 프로펠러 추진시 그 후류의 $x=1.0$ 평면상에서 2가지 방법으로 계산된 평균 접선방향 유기속도 성분의 반경별 분포 $u_t^t(x/R_p=1, r)$ 를 Fig. 4에 비교하였다. Fig. 4는 3장에서 선택된 대상 프로펠러(KP249)에 대한 계산 수행 결과이다. 전반적으로 두가지 계산 방법의 일치성을 알 수 있으나 계산값의 정량적인 차이는 1) 이산화된 특이점계(discretized singularity system)의 사용 및

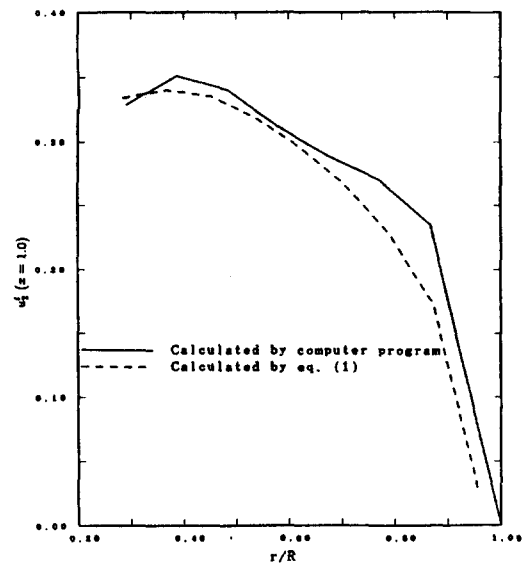


Fig. 4 Comparison of calculated circumferentially averaged tangential velocities induced by KP249 propeller at the beginning of ultimate wake($x/R_p=1.0, J=0.4287$)

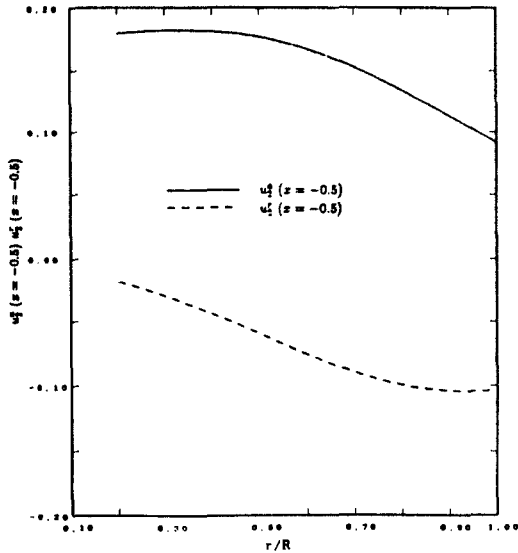


Fig. 5 Circumferentially averaged axial and radial induced velocity by KP249 propeller at KP259 stator plane($J=0.4287$)

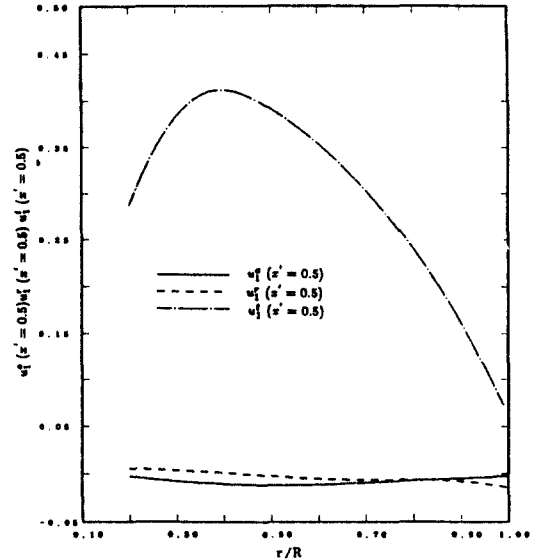


Fig. 6 Circumferentially averaged axial, radial and tangential induced velocity by KP259 stator at KP249 propeller plane($J=0.4287$)

2) 후류면 기하학적 표현상 후류면의 수축으로 인한 날개 반경좌표 (즉 $\Gamma(r)$ 의 r)와 관심있는 후류 반경좌표(즉, $u_z'(x=1.0, r)$ 에서 r) 간의 불일치 등으로 기인된 것으로 생각된다.

프로펠러-고정날개 추진시스템에서 상호 유기속도 성분의 크기를 비교하기 위하여 3장에서 언급된 프로펠러(KP249)와 고정날개(KP259)에 의한 추진시스템에 의한 추진장치 평면상에서 유기되는 축방향 속도성분 및 반경방향 속도성분을 Fig. 5에 보였다. 이로부터 프로펠러에 의해 유기되는 전류 고정날개 평면상에서의 축방향 속도성분의 크기는 반경방향 속도성분의 크기와 비교하여 상대적으로 큼을 알 수 있다. 따라서 통상부하가 크지 않는 경우 전류 고정날개 해석시 프로펠러에 의한 유기속도는 다른 2방향 성분은 무시한 채 축방향 속도성분만을 고려해도 무방할 것이다. 또한 Fig. 6에서는 프로펠러 평면에서의 고정날개에 의한 평균축방향, 반경방향 및 접선방향 유기속도 성분을 각각 보이고 있으며 이 경우는 접선방향 속도성분이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

이상과 같은 유기속도 계산 결과가 LDV로 계측한 실험결과와 정성적으로 같은 경향을 갖음을 제3장에서 보일 것이다. 따라서 단독 프로펠러 설계시 널리 사용하고 있는 양력면 이론에 상호 유기속도를 추가

적으로 고려함으로써 전류 고정날개 설계 및 성능해석기법에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 대칭형 전류 고정날개 추진 시스템

본장에서는 2장에서 언급한 성능해석 과정을 토대로 대칭형 전류 고정날개 추진 시스템을 설계, 모형 시험 및 성능해석을 수행하여 이론 성능해석을 검증하고 균일류중에서의 대칭형 전류 고정날개의 추진 효율 향상을 확인하여 실선으로의 확장 가능성을 살펴보았다. 또한 이론 성능해석 결과와 모형시험 결과의 비교를 통하여 보다 정도높은 이론해석 및 설계가 이루어질 수 있도록 일련의 설계, 모형시험 및 성능해석을 수행하였다.

3.1 대칭형 전류 고정날개 설계

대상선(300,000 DWT 대형 유조선)의 설계 프로펠러인 KP249 모형 프로펠러를 대상으로 균일류 중에서의 축대칭 전류 고정날개 설계에 관하여 살펴본다.

선속, 엔진 마력 및 축 회전수 등이 결정되어 있는 실제 대상선에 대한 설계에 있어서는 프로펠러와 전류 고정날개를 전체 추진 시스템으로 고려하여 추력 및 축 회전수가 설계조건과 일치하도록 프로펠

러 및 전류 고정날개를 동시에 설계해야 하지만 본 연구에서는 기존 프로펠러(KP249)에 적합한 전류 고정날개만 설계하여 효율향상의 측면을 고찰하기로 한다. KP249 모형 프로펠러 제원을 Table 1에 보았다.

전류 고정날개 직경은 통상 프로펠러 직경에 비하여 10%~20% 크게 설계되어 있는데 이는 고정날개의 후류가 수축하여지기 때문이며 프로펠러와 고정날개 사이의 간격에 따라 프로펠러면에서의 수축되어지는율이 또한 달라질 수 있게 된다. 축대칭 설계에서의 프로펠러와 고정날개 간격을 프로펠러 반경의 반(0.5R)만큼 두고 고정날개 직경을 프로펠러 직경의 1.1배로 결정하였다. 고정날개의 날개수는 7개로 선택하였으며 코오드 길이 및 두께분포는 실적선 자료를 토대로 결정하였다.

서언에서도 언급한 바와 같이 전류 고정날개 추진 시스템은 프로펠러 후류에서의 회전방향 운동에너지를 회수함으로써 효율을 향상시키는 에너지 절약 장치이므로 프로펠러 후류에서의 접선방향 속도성분을 상쇄시키도록 고정날개의 제원을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 회전방향 속도성분을 상쇄시키려는 위치를 프로펠러 궁극반류(ultimate wake)가 시작되는 위치(통상 프로펠러 면에서 프로펠러 반경(R)만큼 떨어진 곳)로 삼았다.

전류 고정날개 및 프로펠러 후류에서의 접선방향

속도는 2장에서 언급한 양력면 이론에 의한 성능해석 프로그램을 사용하여 계산할 수 있다. Fig. 7은 본 연구에서는 다루지는 않지만 표면 양력판이론에 의해 해석되는 프로펠러-전류 고정날개 시스템의 모습을 보이고 있다. 접선방향 속도 성분을 계산함에 있어 2가지 방법을 생각할 수 있는데 첫째는 프로펠러 궁극 반류(ultimate wake) 시작점에서 유기속도를 직접 계산하는 방법이고 또다른 방법은 프로펠러

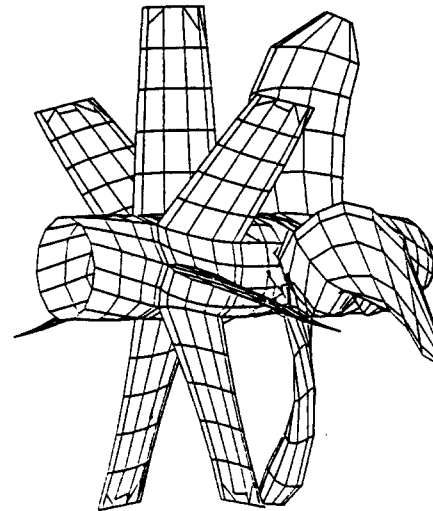


Fig. 7 A surface discretization of the symmetric stator(KP259) and the propeller(KP249)

Table 1 Geometry of the model propeller(KP249)

Propeller No.	KP249			Propeller Name	DW300K		
Designed by	DAWOO			Ship Name	DW300K		
Propeller Type	FPP			No. of Propeller	SINGLE		
Diam.(Model)	250.000mm			Scale Ratio(λ)	39.200		
A_E/A_O	.4529			$(P/D)_{mean}$.6364		
Skew($^\circ$)	22.95			Rake($^\circ$)	.00		
Section Type	NACA			Hub Ratio	.1550		
No. of Blades	4			Comment			
r/R	P/D	X_m/D	$\theta_m(^\circ)$	l/D	$f_{ol}D(10^3)$	$t_{ol}D(10^3)$	$f_{ol}l$
.20	.5600	.0000	-2.50	.1695	6.41	42.80	.0378
.25	.5765	.0000	-3.67	.1814	6.88	39.54	.0379
.30	.5920	.0000	-4.49	.1926	7.09	36.37	.0368
.40	.6210	.0000	-4.95	.2128	6.98	30.31	.0328
.50	.6470	.0000	-3.72	.2294	6.47	24.65	.0282
.60	.6630	.0000	-1.07	.2412	5.74	19.30	.0238
.70	.6680	.0000	2.71	.2458	5.11	14.55	.0208
.80	.6560	.0000	7.33	.2391	4.52	10.31	.0189
.90	.6280	.0000	12.53	.2094	3.66	6.37	.0175
.95	.6120	.0000	15.24	.1718	2.87	4.45	.0167
1.00	.5950	.0000	18.00	.0000	.00	2.72	.0000

부하 $\Gamma(r)$ (circulation)를 이용하여 회전방향 속도를 계산하는 방법이다. 즉 반경방향 부하분포 $\Gamma(r)$ 에 의한 접선방향 유기속도는 식(1)에 의해서 계산될 수 있다.

프로펠러 궁극반류 시작점에서의 접선 속도성분이 상쇄되도록 고정날개의 반경방향 부하분포를 결정하기 위하여 식(1)을 이용하였다.

Fig. 8은 설계된 고정날개와 프로펠러의 상호작용을 고려하여 양력면 이론에 의해 계산된 프로펠러와 전류 고정날개의 부하분포에 날개수를 곱한 값을 비교한 것으로 거의 같은 크기로 접선방향 속도성분을 상쇄함을 알 수 있다. 따라서 대칭형 전류 고정날개는 프로펠러 후류의 회전 에너지를 100% 회수하는 개념으로 설계하였다. 이와같이 프로펠러 후류에서의 회전방향 속도성분을 대부분 상쇄시킬 수 있도록 고정날개의 반경방향 부하분포를 결정하였다.

결정된 반경방향 부하분포를 만족시키기 위하여 피치분포를 양력면 이론[7]에 의하여 결정하였다. 대칭형 고정날개(KP259)의 경우에는 각 반경별 단면은 캠버가 없는 대칭형 단면형상(NACA66 TMB Mod.)을 택하여 설계했으며 고정날개의 피치를 조절하면서 모형실험을 수행할 수 있도록 가변피치 고정날개로 제작하였다. 고정날개의 스쿠 및 레이크는 없으며 피치조절시 고정날개의 날개 형상이 바뀌지 않도록 하였다. 설계된 대칭형 고정날개의 형상과 제원을 Table 2에 보였다.

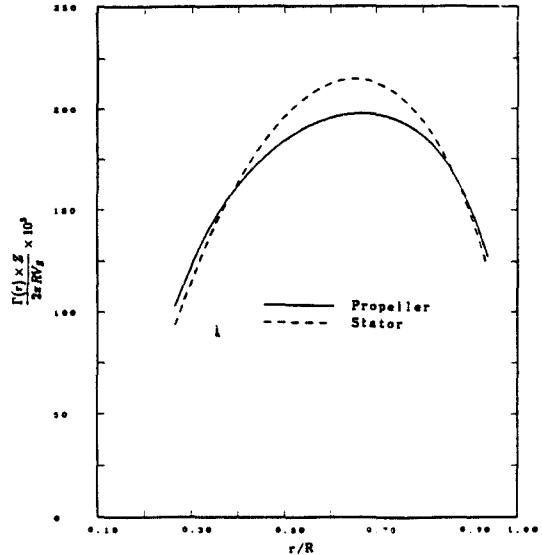


Fig. 8 Comparison of circulation distributions multiplied by blade number for KP249 propeller and KP259 stator after considering interaction between the propeller and the stator

3.2 단독 특성 시험

전류 고정날개 추진 시스템의 단독시험은 전류 고정날개와 프로펠러에 작용하는 힘과 모멘트를 동시에 측정하여야 하기 때문에 2개의 동력계가

Table 2 Geometry of the symmetric model stator(KP259) with the reference pitch angle($\Delta\phi=0$)

Propeller No.	KP259			Propeller Name	STATOR1		
Designed by	KRISO			Project Name			
Propeller Type	CPP			No. of Propeller	SINGLE		
Diam.(Model)	275.000mm			Scale Ratio(λ)	39.200		
A_E/A_O	.453			$(P/D)_{mean}$	5.321		
Skew($^\circ$)	.000			Rake($^\circ$)	.000		
Section Type	NACA66			Hub Ratio	.280		
No. of Blades	7			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	2.6300	.0000	.00	.1527	.00	20.61	.0000
.35	2.8862	.0000	.00	.1496	.00	19.32	.0000
.40	3.1262	.0000	.00	.1466	.00	18.03	.0000
.50	3.5910	.0000	.00	.1405	.00	15.82	.0000
.60	4.0900	.0000	.00	.1344	.00	14.34	.0000
.70	4.6840	.0000	.00	.1283	.00	13.02	.0000
.80	5.5110	.0000	.00	.1222	.00	11.88	.0000
.90	6.9920	.0000	.00	.1161	.00	10.93	.0000
.95	8.1280	.0000	.00	.1131	.00	10.56	.0000
1.00	9.6633	.0000	.00	.1100	.00	10.19	.0000

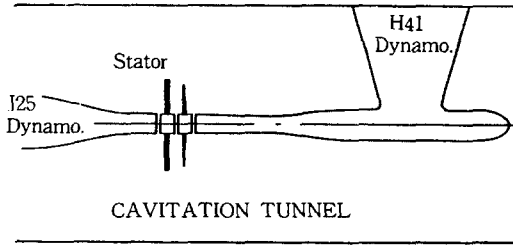


Fig. 9 Propeller open water test setup for the stator-propeller system

필요하다. 주 프로펠러 동력계(J25)와 경사류 동력계(H41)를 Fig. 9에 나타난 것과 같이 설치하여 한국해사기술연구소(KRISO)의 캐비테이션 터널에서 일련의 실험을 수행하였다. 예인수조에서의 시험은 고정날개와 프로펠러에 작용하는 힘과 모멘트를 동시에 계측할 수 있는 동력계의 부재로 고정날개 단독상태와 프로펠러 단독상태에서 각각 분리 수행되었다.

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 시험결과를 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.

고정날개의 모형은 피치를 변화시켜 시험을 수행할 수 있도록 가변피치로 제작되었다. 고정날개-프로펠러 추진시스템이 최적 설계점에서 최대의 효율을 낼 수 있도록 고정날개의 최적 피치각(ϕ : 평균 피치각)을 실험적으로 확인하기 위하여 피치각을 조정하여 시험을 반복 수행하였다. 실험결과 설계 고정날개의 피치각이 적게(고정날개에 대한 유입류의 입사각이 크게) 설계되었음을 확인할 수 있었으며 반복시험 수행시 변화시킨 피치각은 기준 설계된 피치각으로 부터 각각 $\Delta\phi = +5^\circ, +10^\circ, +11.25^\circ,$

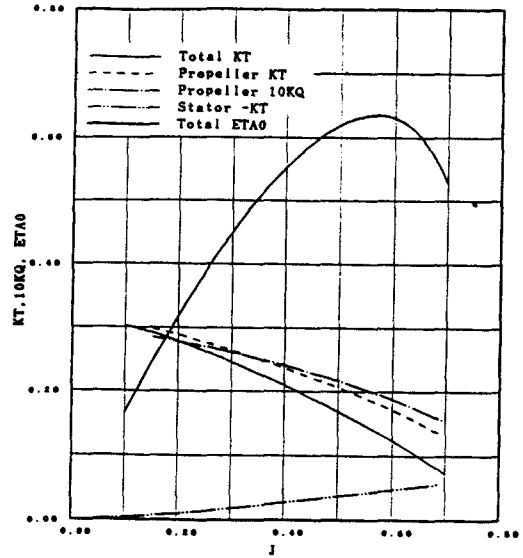


Fig. 10 Open water test results of the stator propeller system($\Delta\alpha=0^\circ$)

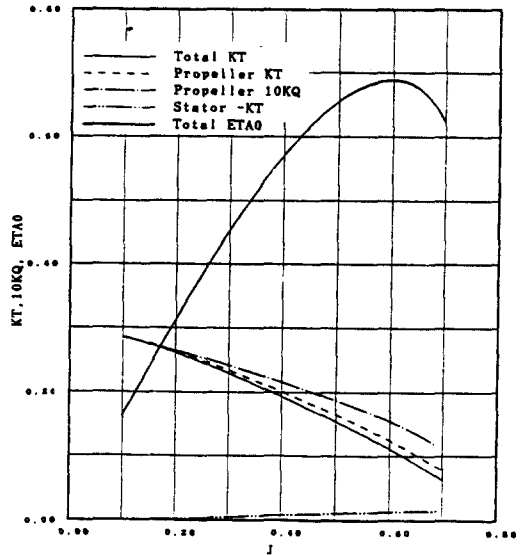


Fig. 11 Open water test results of the stator propeller system($\Delta\alpha=-11.25^\circ$)

$+15^\circ$ 만큼 변화시켜 실험하였다. 편의상 전류 고정날개에 유입되는 입사각의 입장에서 이것을 $\Delta\alpha = (-\Delta\phi) = -5^\circ, -10^\circ, -11.25^\circ$ 그리고 -15° 로 정의하였다.

피치각 변화에 따른 캐비테이션 터널에서의 단독 특성 곡선을 $\Delta\alpha=0^\circ$ 와 -11.25° 에 대하여 Fig. 10 및 11에 각각 보였고, 동일 추력상태(K_T/J^2 -identity)에서의 효율비교를 위하여 $K_T/J^2 - \eta_0$ 곡선을

Fig. 12에 보였다. Fig. 12에 보인바와 같이 전류 고정날개 추진시스템의 추진효율은 전반적으로 단독 프로펠러 상태에 비하여 향상되었으며 설계 기준값으로부터 입사각 $\Delta\alpha = -11.25^\circ$ 변화시킨 상태에서

최대 효율을 갖는다. 설계점($J=0.4287, K_T=0.140, K_T/J^2=0.762$)에서 단독 프로펠러에 비하여 최적 피치각을 가는 고정날개($\Delta\alpha = -11.25^\circ$) 추진 시스템의 추진효율이 약 3% 정도 향상되었다.

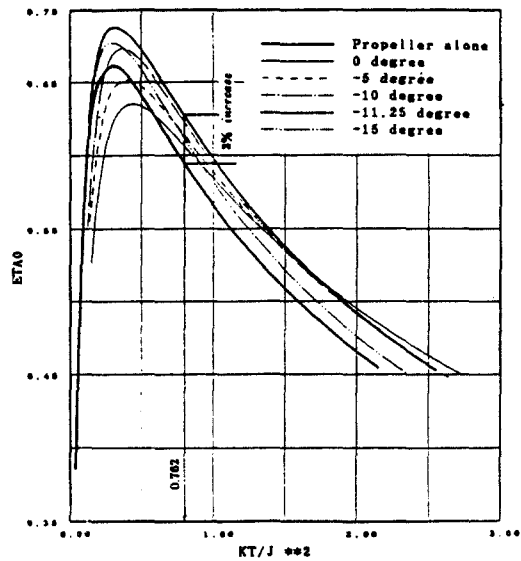


Fig. 12 Comparison of propulsion efficiencies of the stator-propeller system with different stator angles

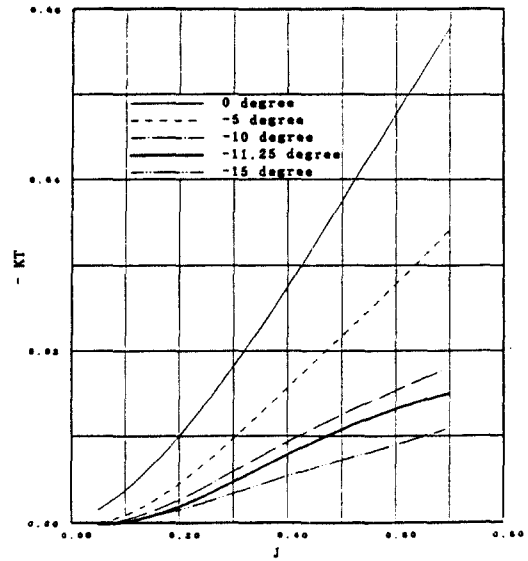


Fig. 13 Comparison of the stator drags($-K_T$) for the stator-propeller system with different stator angles

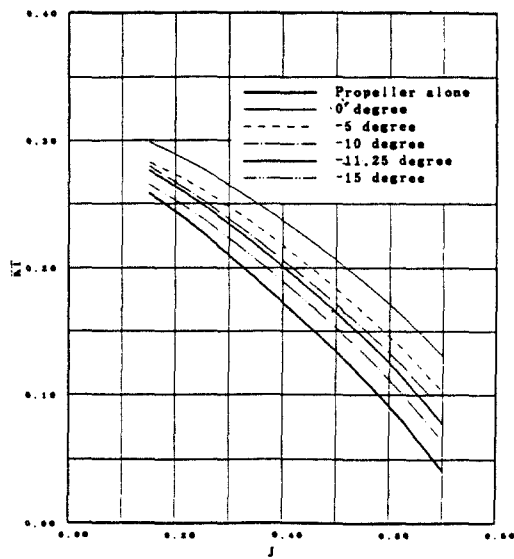


Fig. 14 Comparison of thrust coefficients of the propeller for the stator-propeller system with different stator angles

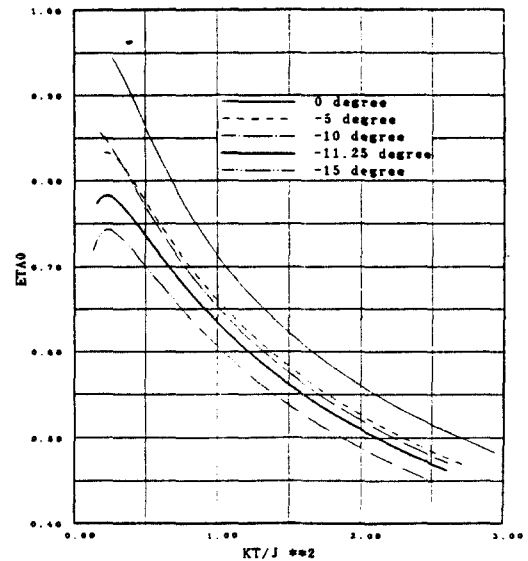


Fig. 15 Comparison of the propeller efficiencies for the stator-propeller system with different stator angles

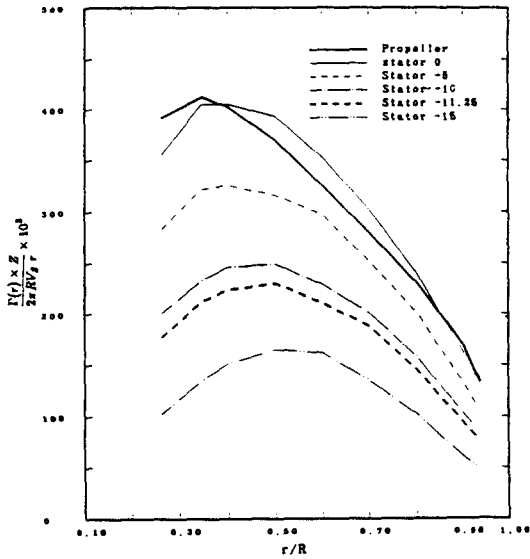


Fig. 16 Comparison of tangential velocities of the stator and the propeller for the stator-propeller system with different stator angles

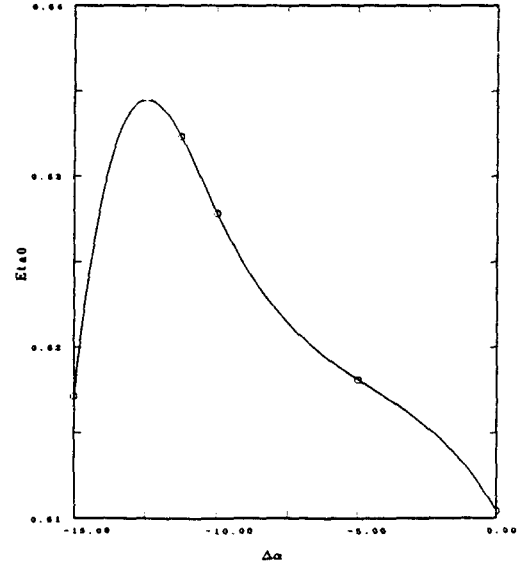


Fig. 17 The stator angle vs. efficiency curve for determination of the optimum stator angle

Fig. 13 및 14에서는 고정날개에 작용하는 항력계수 및 프로펠러 추력계수들의 피치각 변화에 따른 차이를 보여주고 있다. 또한 Fig. 15에서는 고정날개 각도변화에 따른 고정날개-프로펠러 추진시스템중 프로펠러 효율의 변화량을 보여주고 있다. 고정날개의 항력은 유기항력(induced drag), 마찰항력(friction drag), 형상항력(pressure drag)으로 나누어 볼 수 있으며 고정날개에 유입되는 입사각이 클수록 박리 현상등에 의해 고정날개에 작용하는 형상 항력은 증가하며 반면에 고정날개-프로펠러 상호작용이 증가함에 따라 프로펠러의 추력은 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 고정날개 추진시스템에서의 최적 고정날개 피치각은 고정날개의 항력증가와 프로펠러의 추력증가와외 타협에 의하여 결정된다.

피치각 변화에 따른 고정날개-프로펠러 시스템에 대한 양력면 이론에 의한 해석은 무한영역의 이상유체 가정하에서 수행되었기 때문에 고정날개 및 프로펠러에 작용하는 추력 및 토크의 계산값이 실험값과 차이가 많다. 추력 및 토크의 값에 대한 직접적인 비교보다 고정날개 및 프로펠러에 의해 유기되는 접선방향 속도분포 비교를 통하여 실험값과의 정성적인 비교를 수행하였다. Fig. 16에서는 고정날개 피치각 변화에 따른 궁극반류 시작점(x/R=1.0)에서의 고정날개 및 프로펠러에 의해 유기되는 접선방향

속도분포를 비교하였다. 고정날개에 의한 접선방향 속도성분의 방향을 프로펠러에 의한 접선속도방향과 반대로 하여 Fig. 16에서 같이 표시하였다.

이로부터 설계 고정날개 피치각은 이상유체 가정 하에서 접선방향 속도성분이 완전히 상쇄되도록 설계되었기 때문에 고정날개에 유입되는 입사각이 과대하게 결정되어 고정날개의 항력증가로 인하여 복합 추진시스템의 추진효율의 증가가 크지 않음을 알 수 있다. 모형시험 결과에 의하면 단독 프로펠러에 의한 접선방향 유기속도의 양을 60% 정도 감소시킬 수 있는 고정날개의 피치각($\Delta\alpha = -11.25^\circ$)이 최적 고정날개-프로펠러 시스템을 구성한다. 실험적으로 확인한(최대효율 증가를 위한) 60% 상쇄율은 참고문헌[6], [8]에서 이론적으로 제시하는 66%와 75% 상쇄율의 설계개념을 뒷받침해주고 있다.

기준 추력계수($K_T/J^2 = 0.762$)에서의 고정날개 피치각 변화에 따른 추진효율을 Fig. 17에 보였다. 이 그림에서 $\Delta\alpha = -11^\circ$ 와 -12° 사이에서 최적 고정날개 피치각의 위치함을 알 수 있으며 본 연구에서는 $\Delta\alpha = -11.25^\circ$ 를 최적 피치각으로 결정하였다.

3.3 LD.V에 의한 후류 계측

LDV(Laser Doppler Velocimetry) 계측장치는 계측하고자 하는 유동장에 영향을 주지 않고 측정점에서

의 속도성분을 계측할 수 있는 장비로서 본 고정날개-프로펠러 추진시스템 주위의 유동을 계측하기 위하여 설치되었다.

전류 고정날개 주위의 유속을 측정하기 위한 LDV 계측장치는 Fig. 18에 나타나 있으며 계측원리 및 각 장비의 작동원리를 간단히 정리하였다. Ar-Ion Laser(5W)에서 나온 빛은 Beam Expander 속의 Bragg Cell과 Prism을 통과하여 shift된 빛과 shift되지 않은 각각 두가지의 녹색빛($\lambda=514.5\text{nm}$)과 청색빛($\lambda=488.0\text{nm}$)으로 나누어지며, 이 빛들은 Optical Fiber선을 통과한 후 Probe 속의 초점렌즈를 거쳐 관측부에서 한점으로(측정점) 만난다. 관측부 속의 빛이 만난 곳에는 녹색 및 청색의 직교한 두가지 fringe 무늬가 형성되고 유동중에 포함되어 있는 산란입자가 이곳을 통과할 때 doppler 신호를 발생시키게 된다. 본 LDV 시스템은 Fiber Cable을 이용한 backscatter 형으로 산란입자에서 반사된 빛은 Probe의 렌즈를 통하여 모여진후 다시 Fiber Cable을 통과하여 녹색빛과 청색빛으로 나누어진 뒤 두개의 Photomultiplier 속으로 들어간다. 이곳에서 빛은 전기적 신호로 바뀌고 이것은 Shifter에서 주파수가 바뀐뒤 Counter로 들어가는데, Counter에서는 analog 신호를 주파수, 도착시간, 통과시간, fringe 수 등의 디지털 신호로 바꾸어 준다. 이중 필요한 정보를 컴퓨터에서 받아서 속도로 변환시킨다.

Beam Expander의 Bragg-cell은 Shifter에 의해서 구동되며 두개의 Photomultiplier는 두개의 Counter에 있는 High-voltage Supply에 의해 작동된다. Traversing System은 Traversing Controller에 의해

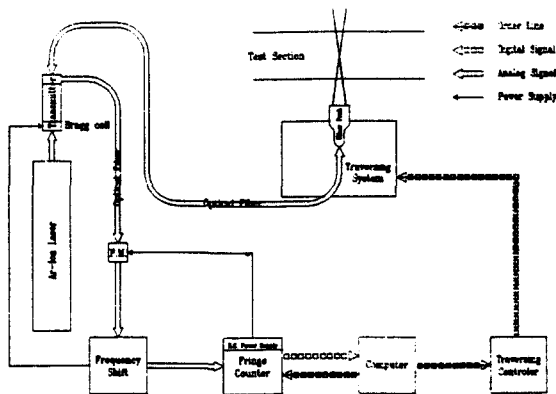


Fig. 18 Schematic diagram of LDV system for velocity measurement

작동되고 이것은 컴퓨터와 연결되어 컴퓨터에서 조작된다. 또한 Counter 역시 컴퓨터와 연결되어 있어 측정에 관한 명령을 컴퓨터에 보낸다.

본 연구에서는 전류 고정날개-프로펠러 시스템의 후류에서 접선방향 속도를 LDV 시스템을 이용하여 계측함으로써 회전방향 운동에너지 회수를 확인하고 이론과 실험과의 차이를 비교하여 전류 고정날개 설계 개념을 구축하고자 한다. LDV 시스템에 의한 속도 계측시 계측자료의 일관성을 유지하기 위하여 터널 내부 유속은 5m/s로 고정하였으며 프로펠러는 회전수($n=45\text{rps}$)를 동일하게 유지하였다.

2장에서 언급한 양력면이론에 의하여 계산된 유기 속도의 값과 LDV 계측장치에 의한 계측 속도값을 비교하였다. Fig. 19에서는 단독 프로펠러(KP249) 후류에서의 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($V_{\text{mean}}=5\text{m/s}$, $n=45\text{rps}$)에서 계측된 프로펠러 부하상태($K_T/J^2=0.791$)를 맞추어 선택되었다. 계산된 접선방향속도와 실험값이 허브 근처에서 비교적

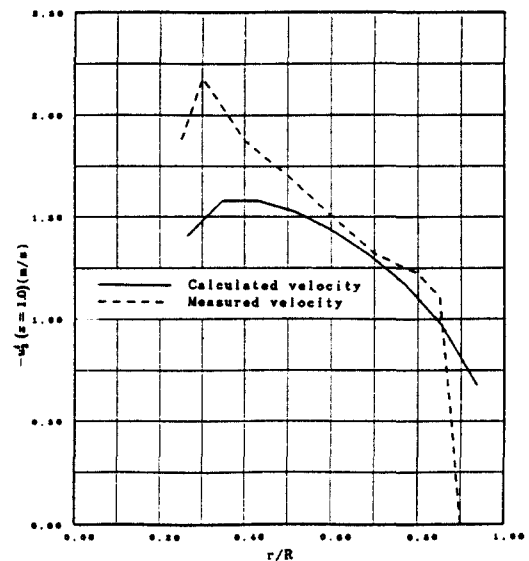


Fig. 19 Comparison of the calculated tangential velocity distribution with the measured one behind the KP249 propeller alone at 1.0R downstream of propeller plane(calculated $K_T/J^2=0.791$)

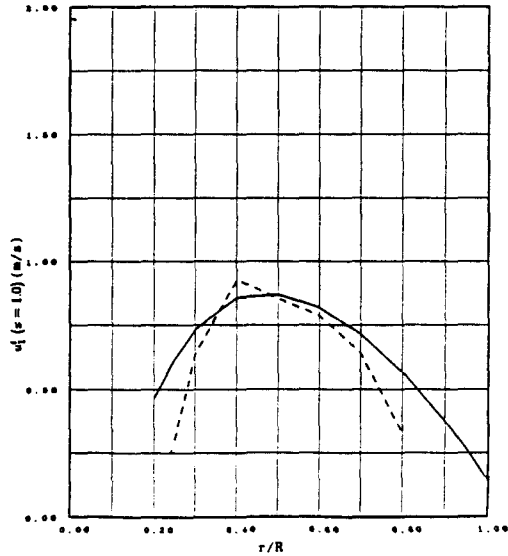


Fig. 20 Comparison of the calculated tangential velocity distribution with the measured one behind KP259 stator alone with optimum pitch angle($\Delta\alpha=-11.25^\circ$) at 1.0R downstream of propeller plane

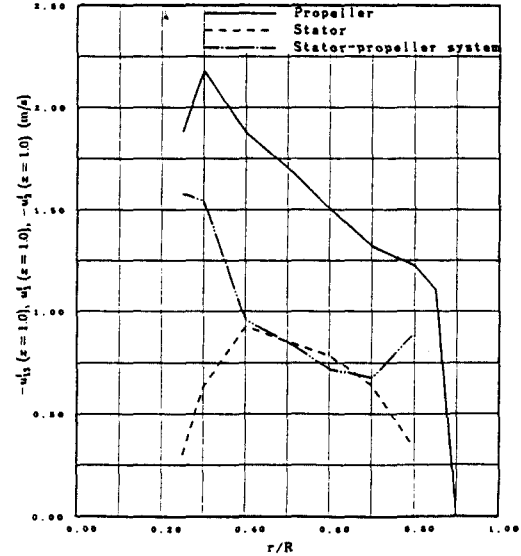


Fig. 21 Predicted circumferentially averaged tangential velocity component of the stator-propeller system(KP259, $\Delta\alpha=-11.25^\circ$) at 1.0R downstream of propeller plane. Tangential velocity components for propeller alone and stator alone are measured respectively with the L.D.V. system

차이가 크을 알 수 있다. 이는 양력면 이론에 의한 수치모형에서 허브를 제외하였으며 허브 및 축계에서의 점성에 의한 효과가 고려되지 않았기 때문으로 생각된다.

피치각($\Delta\alpha=-11.25^\circ$)으로 선택된 대칭형 고정날개(KP249)에 대하여 LDV 장치에 의한 접선속도 성분계측을 수행하였다. 고정날개 후류에서의 시간평균속도 성분은 고정날개를 서서히 회전시키면서 계측된 값의 평균치를 치하였다. Fig. 20에 보인바와 같이 대칭형 고정날개(KP259) 후류($x=1.0R$)에서 LDV 시스템에 의하여 계측된 시간평균 접선속도 성분과 그 상태에서의 계산된 회전방향 평균 접선속도 성분은 비교적 잘 일치하고 있다. 따라서 박리현상이 심하지 않는 유동상태에서 양력면 이론계산의 신뢰성을 확인할 수 있다.

대칭형 고정날개와 프로펠러가 동시에 설치된 상태에서 고정날개-프로펠러 후류에서의 LDV 시스템에 의한 계측은 수행되지 못하였다. 그러나 단독 프로펠러에 의한 접선방향 속도분포는 Fig. 19에 보인바 있으므로 그 값에서 고정날개 단독(KP259, $\Delta\alpha=-11.25^\circ$)상태 후류에서 계측된 접선방향

속도를 감하여 추정된 고정날개-프로펠러 후류에서의 접선방향 속도를 Fig. 21에 보였다. 대칭형 고정날개 설계시 허브 부근과 날개끝 부근의 부하를 적도록 설계하였기 때문에 상대적으로 그 부근에서 접선방향 속도성분의 상쇄가 적게 되었음을 알 수 있다.

4. 결 언

추진효율 향상을 위한 전류 고정날개 추진 시스템 개발을 위한 선행연구로서 대칭형 고정날개-프로펠러 시스템에 대한 이론 성능해석 기법을 제안하였고 대상 프로펠러에 대한 대칭형 고정날개를 설계하여 모형시험에 의한 성능검증을 수행하였다. 일련의 설계, 모형제작 및 모형시험 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 기존 프로펠러를 대상으로 프로펠러 후류의 회전방향 운동에너지를 회수하기 위하여 날개수 7개인 대칭형 고정날개를 설계하여 고정날개-프로

펠러 추진시스템의 추진 효율향상을 검증하였다. 모형 고정날개는 날개 피치각의 변화에 따른 전체 시스템의 효율변화를 확인하기 위하여 가변피치로 제작되었다.

• 모형시험 결과 고정날개-프로펠러 추진시스템 후류에서 접선방향 속도성분이 완전히 상쇄되도록 설계된 고정날개의 설계피치각에 비하여 피치각이 11.25° 증가($\Delta\alpha = -11.25^\circ$)된 상태에서 고정날개-프로펠러 시스템이 가장 높은 효율을 갖음을 알 수 있다. 이때 고정날개-프로펠러 시스템은 단독 프로펠러에 비하여 기준부하점(K_T/J^2 -identity)에서 약 3%정도 추진효율 향상이 있었다.

• 고정날개-프로펠러 시스템의 후류에서 접선방향 속도를 LDV 시스템에 의하여 계측함으로써 회전방향 운동에너지 회수를 확인하였고 이론과 실험의 차이를 검증하였다. 궁극후류(ultimate wake) 시작점에서의 이론계산에 의한 접선방향 속도와 계측된 속도는 비교적 잘 일치하였다.

• 고정날개 피치각 변화에 따른 고정날개-프로펠러 추진 시스템 모형시험 결과 고정날개의 피치각이 적을수록(입사각이 클수록) 고정날개에 작용하는 항력은 증가하고 프로펠러의 단독효율은 증가함을 알 수 있었다. 즉 고정날개-프로펠러 추진시스템의 효율은 고정날개의 항력이 최소로 되면서 프로펠러의 효율이 증가되도록 설계되어야 한다. 본 시스템이 실선에 장착될 경우 선체반류에서의 난류강도(Turbulent intensity) 증가 및 레이놀드 수 증가에 따른 박리현상 감소에 의하여 고정날개의 항력계수가 감소하리라 추정되며 그에 따라 본 추진시스템에 의한 추진 효율 증가량도 증가하리라 판단된다. 선체 반류를 고려한 비대칭형 고정날개를 설계하여 실선에 장착할 경우 단독 프로펠러에 비하여 약 5~8%의 추진효율 향상이 기대된다.

5. 후 기

본 연구는 대우조선공업(주)의 수탁연구사업으로 수행되었으며 관계제위에게 감사드립니다. 본 연구중 캐비테이션 터널에서의 실험은 김경열, 이창용씨가 수행하였다.

참 고 문 헌

- [1] Blaurock, J., "An Appraisal of Unconventional Aftbody Configurations and Propulsion Devices", *Marine Technology*, Vol.27, No.6, pp.325~336, Nov.1990.
- [2] NK-Register of Shipping, "Propellers: Special Feature", *Overseas*, No.40, 1988.
- [3] McCutchen, "A Theorem on Swirl Loss in Propeller Wakes", *J. of Aircraft*, Vol.22, No. 4, April 1985.
- [4] Gearhart, W. S. and Marboe, R. C., "Asymmetric Reaction Vane Application", *Proceedings, Symp. on Hydrodynamic Performance, Enhancement for Marine Applications*, Newport, RI, 1988.
- [5] Tanibayashi, H. and Takekuma, K., "Hydrodynamic Performance of Various Devices for the Improvement of Propulsive Performance of Ships", *MHI Technical Review*, Oct. 1982.
- [6] Takekuma, K., Tsuda, S., Kawanuram A. and Kawaguchi, N., "Development of Reaction Fin as a Device for Improvement of Propulsive Performance of High Block Coefficient Ships", *Journal of SNAJ*, No.150, Nov. 1981.
- [7] Lee, C.S., Suh, S.B. & Lee, J.T., "Analysis of the Propeller Performance by the Lifting Surface Theory", *Journal of Ships & Ocean Engineering*, Vol.4, Dec. 1990.
- [8] Brockett, T. & Korpus, R., "Parametric Evaluation of the Lifting-Line Model for Conventional and Preswirl Propulsors", *Proceedings, International Symposium on Propellers and Cavitation*, Wuxi, China, 1986.
- [9] Greely, D.S. & Kerwin, J.E., "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow", *Trans. SNAME*, Vol.90, 1982.