

선박 프로펠러 기술의 국내외 연구동향

이 창 섭
충남대학교 교수

최근 조선 분야의 기술이 눈부시게 발전하고 있다. 우리나라의 건조능력이 세계 제2위의 위치에 도달하여 있으며, 회복되어가는 조선 경기에 발맞추어 이제 우리 조선기술의 수준도 건조 능력 이상으로 끌어올려야 할 때라고 본다. 이를 위하여는 조선기술분야의 최근의 세계적인 연구 및 기술개발 추세를 바르게 파악할 필요가 있다. 본고에서는 이러한 노력의 일환으로 선박 프로펠러와 관련 분야의 외국의 연구 동향을 살펴보고 동시에 국내기술 수준의 위치를 점검해 보고자 한다.

선박 프로펠러와 관련한 외국의 기술, 동향 및 전망을 파악하기 위하여는 ITTC(International Towing Tank Conference, 국제수조회의)의 최근의 추진기 분과 보고서(ITTC, 1984, 1987, 1990)를 참조하는 것이 제일 바람직하며, 동시에 미국 조선학회의 주관하에 개최되고 있는 프로펠러 심포지엄(Propeller '81, '84, '88, '91)을 참고하여도 필요한 문헌을 찾을 수 있다. 국내 기술은 대부분 대한조선학회지 게재 논문을 참조하였다.

본 고에서는 편의상 ITTC보고서의 편성방법을 좇아 프로펠러의 요소 기술별로 나누어 다음과 같은 순서로 연구, 기술의 동향 및 기술의 내용을 소개하고자 한다.

1. 유효반류 분포
2. 추진장치의 최적화

3. 선체표면 기진력 추정
4. 프로펠러의 수학적 모형화
5. 새로운 날개 단면
6. 프로펠러 날개 응력
7. 프로펠러 설계

프로펠러 관련기술분야를 이와같이 분류하여 살펴보는 것은 필자의 편의를 위한 것 뿐이고 실제로는 상호 연관되어 설명이 되어야 할 경우가 대부분이다. 또한 인용되는 참고문헌은 최소한의 해설을 위해 임의로 선정된 것이지, 관련문헌을 모두 망라한 것은 아니며 더구나 전체 내용을 완전하게 대표하는 문헌은 아니다. 의문이 생기는 부분은 ITTC추진기분과 보고서의 관련 부분을 직접 참고하기 바란다.

1. 유효반류분포

1.1 서 언

선미반류가 프로펠러와 상호작용함으로써 얻어지는 유효반류에 관한 연구는, 선박 프로펠러의 설계 및 성능 해석을 정밀하게 수행하기 위하여 꼭 필요한 과제중의 하나임에도 불구하고, 이론체계의 미비로 아직 완전한 해결을 보지 못하고 있다. 이 문제는 정상상태인 축대칭 반류를 고려한 프로펠러의 설계는 물론이고, 선체의 동유체 기진력을 최소화하고 캐비테이션을 지연시키는 등 프로펠러의 비정상성능을

최적화하는 문제와도 직결된다.

따라서 유효반류를 프로펠러의 성능평가가 옳게 적용하기 위하여 세계의 많은 선박관련 연구기관이 연구를 수행하고 있으며, ITTC 프로펠러 기술위원회에서도 중요한 주제로 기술 내용을 검토한 바 있다.

1.2 문제의 정의

유효속도(effective velocity)는 프로펠러가 작동하고 있을 때 프로펠러 주위의 유동장에서 전체유속(total flow velocity)으로 부터 동일한 점에 유기된 프로펠러에 의한 포텐셜 유기속도(propeller potential induced velocity)를 뺀 값으로 정의되며, 유효반류(effective wake)는 프로펠러 평면에서의 선속과 유효속도의 차로 정의된다.

유효속도를 이해하기 위하여는 우선 전단유동장에서 작동하는 프로펠러 주위의 유동을 유체역학 원리에 의거 설명하여야 한다. 주어진 입사유동장에서 작동하는 프로펠러 주위의 유동에 관한 유체역학적 서술은 경계조건을 만족하도록 운동방정식에 대한 수학적 해답을 얻었을 때 완전할 수 있다. 유동장은 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식에 의해 지배되게 되며, 선체 및 프로펠러 표면에서는 no-slip 경계조건을 만족해야 한다. 먼저 프로펠러가 없는 상태에서 선체주위의 유동을 근사적으로 표현할 수 있어야 하고, 이때에 박리현상이나 조파현상을 고려할 수도 있다. 유동장에 프로펠러가 놓여질 때 선체주위 유동에 미치는 유체역학적 영향은 너무 복잡한 해석과정을 필요로 하므로, 좀더 간단한 방정식과 좀 유연한 경계조건으로 근사화 하여야만 해석이 용이해진다. 즉 Navier-Stokes 방정식 대신에 점성의 영향을 삭제한 Euler 방정식을 사용하고, 선체표면에서는 비침투조건(no penetration condition)만 만족시킨다. 프로펠러 자체는 두께가 얇은 양력면으로 표현될 수 있고, 날개 뒷날에서는 Kutta조건이 만족되어야 한다.

또한 프로펠러의 후류 보오텍스면에서의 경계조건은 경계조건이 사전에 그 위치를 알 수 없는 프로펠러 후류 보오텍스면에서 만족되어

야 하므로 프로펠러의 해석을 더욱 복잡하게 한다. 보오텍스면의 위치는 사전에 알 수 없고, 해답의 일부로 알아야 하기 때문이다. 한편 프로펠러 날개에서의 점성의 영향은 아주 얇은 경계층내에 국한될 수 있다고 가정한다.

입사유동에 프로펠러가 주는 영향에 관한 유체역학적 모형의 해답은 프로펠러에 의해 생성된 속도장(정상 및 주기적인)이다. 이러한 속도장은 Helmholtz의 정리에 의하면 포텐셜 유동과 전단유동(Shear flow) 즉, 보오텍스와와 상호작용에 의한 유동 성분으로 나눌 수 있다. 포텐셜 유동 성분은 프로펠러 유기속도(propeller induced velocity)가 되고, 유한속도는 입사유동과 상호작용성분의 중첩으로 얻어진다.

1.3 문제해결방법

유효반류 분포는 위에서와 같이 유일하게 정의될 수 있지만, 문제를 푸는 데에는 많은 어려움이 있다.

첫째는 입사유동을 서술하는 데에서의 복잡성이다. 최근의 3차원 두꺼운 경계층연구의 발전 또는 Navier-Stokes 방정식의 직접해석에도 불구하고, 반경험적 이론을 써서 공칭반류를 추정사용하는 데에 국한되어 있다.

둘째는 프로펠러 유기 포텐셜 교란자체가 찾고자 하는 해답 즉 유효속도 분포에 따라 결정된다는 점이다. 문제에 대한 이론적 해답을 일반적인 형태로 얻을 수 없기 때문에 실험적, 이론적 연구를 병행하여 수행하여야 한다는 점을 특히 강조하고자 한다.

유효반류 추정방법은, 공칭속도 혹은 전속도 계측결과를 입력자료로 하여, 반류에 미치는 프로펠러의 영향과 프로펠러에 의해 유기되는 속도를 해석적으로 구하는 두가지 방법이 있다.

프로펠러 유기속도의 계산이 상대적으로 용이한 점을 고려하면 전속도의 계측에 의한 방법이 훨씬 우위에 선다. 왜냐하면 유효속도장에 미치는 경계층의 영향이 물리적으로 이미 고려되어 있어서 일단 수렴된 유효반류를 얻으면 그것이 곧 해답이기 때문이다. 그러나 실험이 복잡하고 어려운 점과 모형에서 이렇게 구

한 유효반류를 실선으로 직접 확장하는 방법이 불확실한 단점이 있다.

이에 반하여 공칭속도 계측에 의한 방법은 실험이 간단하고 공칭반류를 실선으로 확장하는 경험식이 제안되어 있어 유리한 면이 있다. 그러나 경계층과 박리현상이 프로펠러의 작용에 의해 크게 영향받을 수 있기 때문에 수렴된 결과를 얻더라도 우리가 원하는 유효반류가 정확히 얻어졌는지 확신할 수 없는 단점이 있다.

1.4 유효반류추정의 실험적 측면

프로펠러에 아주 가까이 다가가서 최소한의 교란을 주면서 국부적 속도계측을 실시해야 하기 때문에 아직 시험장비 개발에 문제점이 많으며, 가장 유망한 방법은 레이저 유속계(Laser-Doppler Velocimeter, LDV)를 사용하는 방법이다.

LDV를 사용하여 유효반류를 얻는 실험적 방법은 Lauden[1981]에 의해 발표된 바 있으며, 국내에서도 성공적으로 수행된 바 있다[안종우 등, 1985; 이창섭 등, 1991]. 프로펠러 바로 상류에서의 유효속도는 계측된 전속도로부터 프로펠러 유기속도를 빼어 계산된다. 이때 프로펠러 유기속도가 단독작용 상태하의 프로펠러에 대해 계측되었기 때문에, 프로펠러가 불균일 입사유동장에서 작용할 때 프로펠러 평면에 걸친 불균일 하중분포가 유기속도에 미치는 영향이 얼마나 큰지 평가를 해야한다.

1.5 유효반류추정의 이론적 측면

선미의 3차원 유동에 대한 이론적 추정이 어려운(프로펠러가 없을 때에도) 현재 상황때문에 유효반류추정을 위한 이론개발의 노력은 주고 간단한 기하형상 특히, 긴 회전체에 대해서 수행되어 왔다. 이런 노력으로 점성과 포텐셜 상호작용에 근거한 방법이 효과적임이 밝혀지고 있다. 이 방법은 다음 두가지 가정에 근거하고 있다. 그 첫째는 축방향으로 프로펠러직경의 1.5-2.0되는 범위내에서는 운동방정식에서 점성항들이 압력항들에 비해서 무시할만하다는 점이고, 둘째는 유선을 따라서는 total head의 손실이 무시할 만하다는 것이다. 이러

한 가정으로 비점성 비압축성 유체이론을 선미의 바로 부근에서의 유동을 근사적으로 서술하는데 적용할 수 있게 된다. 그리고 공칭 프로펠러 유입유동에는 축방향속도의 반경방향 변화에 의한 와류성분(vorticity)이 존재하게 된다.

유효반류의 이론적 연구는 다음 세가지로 크게 나누어 볼 수 있다.

1) 유선을 따라 보오텍스의 세기 $r/r = \text{const}$ 를 적용, 이것은 'no swirl' 가정하에서 축대칭 유동에 맞는다. [Huang, 1980; Breslin 등, 1982]

2) 선형화된 Euler방정식의 직접해석 [Goodman, 1982; Campos, 1983]

3) 공칭반류보오텍스(ring vortex tubes)와 프로펠러 보오텍스시스템 사이의 상호작용 [Dyne, 1981; Lee and Song, 1987; Lee 등 1991]

Dyne[1981]는 프로펠러와 회전체 사이의 거리가 멀어 유효반류와 회전체 주위의 포텐셜 성분이 상호작용이 적다고 가정하였으나, 그 후[1983] 이 가정을 없애고 포텐셜 성분이 전체 유효반류에 대단히 큰 영향을 준다는 사실을 보였다. Lee[1988]는 유효반류의 개념을 새로이 유도한 과정을 보임과 함께 간단한 축대칭 모형을 써서 유효반류분포를 계산할 수 있는 방법을 제시하였고, 이창섭 등 [1990]에 의해 수치계산 방법이 제안되었다. 최근에는 Lee 등 [1991]에 의해 LDV에 의한 실험결과와 비교함으로써 유효반류의 추정이 설계목적에까지 적용가능함을 보였다.

Falcao de Campos[1983]는 공칭반류 집중보오텍스 모형을 적용하여 마찰유효반류가 프로펠러-덕트와 상호작용하는 현상을 연구하였다.

1.6 유효반류 연구의 진동해석에의 응용

일반적으로 유효반류의 세 성분은 시간과 공간적으로 변화한다. 그러나 진동해석의 목적을 위해서는 고정된 공간 위치에서 시간에 대해 평균한 값만도 프로펠러 작동을 해석하기 위한 현존 컴퓨터 프로그램의 입력자료로 적절하다.

이런 프로그램들은 대개 포텐셜 유동성분만을 다룬다. Breslin등 [1982]의 사례를 보면 그들은 반경방향 속도구배에 축대칭 이론을 써서 유효반류를 추정하고, 회전방향 구배에는 축소된 반경보오텍스선 모형을 써서 비정상 캐비테이션 형상 추정정도를 향상하였다. 불균일 유효반류 추정에 대한 최근의 결과로는 Lee등 [1991]에 의해 시도된 선미 전단유동장과 프로펠러를 표현하는 특이함수계의 상호작용 해석법이 발표된 바 있으며, Breslin등[1982]이 고려하지 않았던 프로펠러 원판 밖의 전단유동의 중요성을 지적하고 이 영향을 불균일 유효반류의 해석에 포함시켜야 함을 보였다.

2. 추진장치의 최적화

2.1 서 언

선주가 새로운 배를 계획할 때 부딪치는 가장 중요한 문제중의 하나는 경제적인 측면에서 기술적 요구조건을 만족하는 해답을 얻는 것이다. 이를 위하여 최적화 연구를 수행할 것이며, 선박의 설계, 생산, 운용 및 관리에 소요되는 비용을 서로 비교하게 된다. 십수년전 유류과동이 있기 전에는 연료소비가 상대적으로 최적화 조사에 적은 영향을 주었지만, 요즈음은 상황이 바뀌어 유류가가 가장 중요한 요소로 등장하여 추진 효율의 관점에서 본 최적화 연구가 활발히 수행되고 있다.

예인수조를 운용하는 연구기관들은 이 최적화 과정중에서 주로 여러가지 다른 방편들의 유체역학적 영향에 대한 정보를 제공하거나 개선점을 제안하거나 하는 식으로 참여하게 된다. 이 일은 통상 다음과 같이 두단계로 나뉘어 수행된다.

제1단계에서는 이론적-경험적 방법을 사용하여 추진체계, 프로펠러 직경, 날개부하분포, 날개수, 날개면적 등을 결정하게 되는데, 이때 캐비테이션, 진동 및 강도 조건을 동시에 만족할 뿐만 아니라 주어진 속도에서 축동력을 최소화하기 위해 노력을 한다.

제2단계는 여러가지 모형시험을 실시하여 첫 단계에서 이론적-경험적 방법에 의해 선택한

변수를 확인하는 단계이다. 단추진기선에 대하여는 공통된 성능추정방법(ITTC, 1957)이 있고 사용이 간단하지만, 다른 추진체계에 대하여는 공통의 방향이 없어 각 선박연구기관마다 제각기 차이를 보이고 있다.

그 주요 차이점을 보면 다음과 같다.

a) 실선 저항 추정을 위한 모형선-실선 상관관계의 선택

b) 척도 효과

c) 실선 시운전 수정계수

이러한 차이점들이 추진체계의 상대적 성능 평가에 영향을 주게되므로 예인수조를 운용하는 연구기관 사이에 성능추정을 위한 공통적인 방법 혹은 최소한 공통적인 원리를 갖도록 하는 것이 중요하다. 최적화 작업을 실험적으로 증명하게될 이 분야에 대한 연구가 많이 필요하다.

Dyne[1983]에 의하면 추진효율을 높이기 위하여 다음과 같은 변화를 시도해 볼 수 있다.

a) 단위시간당 프로펠러 원판을 지나는 유량을 증가시킨다. (η_0 증가)

b) 프로펠러 후류의 회전을 감소시킨다. (η_0 증가)

c) 프로펠러 날개 및 부가물들의 항력을 감소시킨다. (η_0 증가)

d) 추진장치를 마찰반류가 높은 곳으로 옮긴다. (η_H 증가)

2.2 단추진기 추진

최적부하 분포

균일흐름 속에서 정해진 추력에 대해 최대효율을 주는 부하분포를 결정하는 문제는 경부하상태의 비 캐비테이션 프로펠러에 대해 Betz [1919]에 의해 해석된 바 있다. Betz는 프로펠러 후류 나선형 보오텍스선의 피치가 반경방향으로 일정할 때 최대효율을 얻을 수 있다는 사실을 보였으며, 이는 적절한 부하상태의 프로펠러에 대하여 근사적으로 성립한다. 보통 프로펠러에서 날개항력의 부하분포에 미치는 영향은 적지만 초월공동 프로펠러의 경우는 항력이 최적부하 분포에 큰 영향을 줄 수 있다.

축대칭 반류에서 작동하는 프로펠러에 대한

여도 최종반류(ultimate wake)에서 보오텍스면의 피치가 일정해야 한다는 최적 조건이 Lerbs [1952]나 Burrill [1955]에 의해 보인 적이 있다. 유기속도에 의한 2차 비선형항을 무시함으로써 Lerbs는 다음과 같은 최적조건을 유도하였다. 즉,

$$(P/D) \approx \text{const.} \cdot \sqrt{1-w(x)}$$

여기에서 (P/D) 는 프로펠러에서 보오텍스 피치비이고, $W(x)$ 는 국부반류비이다. 또 다른 단순화 방법으로 van Manen [1951]은 다음식을 유도하였다.

$$(P/D)_0 = \text{const.}$$

반류를 고려한 최적조건은 Loukakis [1981] 등에 의해 비판의 대상이 되었었다. 그들은 Lerbs의 elliptical 분포와는 달리 순환의 최대 위치를 $r=R=0.90-0.95$ 위치에 오게하여 효율을 4-14% 증가시킬 수 있다고 주장하였다. 이들의 설계를 검증하기 위하여 Holden 등 [1983]은 모형프로펠러를 제작 캐비테이션 터널에서 실험을 실시한 바 있다. 그 결과 극단적인 날개끝 부하를 가진 스유프로펠러의 경우 효율 증가는 커녕 Lerbs 최적프로펠러보다 5-13%의 낮은 효율을 얻었다. 실험도중 날개끝 부근에서 앞날부분부터 발생한 이상한 박리현상이 관찰되었는데, 아마 이것이 날개 저항증가의 주범이 아니었나 설명하고 있다. 부하분포의 비선형 효과에 대한 연구는 Brockett [1986] 및 Kerwin 등 [1986]에 의해서도 계속되었으나, 날개끝 주위에서의 실제유동이 이론의 검증에 제한이 되고있다.

이론에 의한 계산이 높은 효율을 주는 원인을 조사하기 위하여 Dyne [1984]는 양력선이론을 사용하여 연구를 수행하였는바, 연구 도중에 운동량법칙에 의해 계산된 추력이 Kutta-Joukowski 정리에 의해 계산된 추력보다 항상 적다는 사실을 발견하여, 두 계산에 의해 동일한 값을 얻기 위해서는 최외 반경부근의 helical 보오텍스면의 피치를 어느 정도 감소시킬 필요가 있음을 알아내었다. 이것을 근거로 Dyne는 프로펠러 후류 보오텍스시스템의 모형화가 매우 중요하다는 결론을 내렸다. 따라서 특히 최외 반경부근의 피치가 중요하다는 사실

로부터 비선형 보오텍스시스템의 모형이 중요함도 유추할 수 있겠다.

반류를 좀더 정확하게 고려하려는 노력은 계속되어 최근에는 프로펠러 해석시 공칭반류의 분포뿐 아니라 반류에 포함되어 있는 전단성분을 고려해야 한다는 연구결과가 나오고 있다. Goodman [1979]은 Euler의 운동방정식과 연속방정식을 응용하여 wake vorticity가 무한수의 날개로 대치된 프로펠러에서의 최적 부하분포에 미치는 영향을 처음으로 고려하였다. 이때의 최적조건은 전진비, 반경쪽 반류분포, 프로펠러에 의해 유기된 축 및 반경방향 속도사이의 복잡한 관계식으로 표현되었다. 계산예에 의하면 최적효율을 위해서는 날개끝의 부하가 통상적인 경우보다 wake vorticity를 고려했을 때 더욱 증가되어야 한다고 한다. 이것은 재래식 설계방법은 최외반경에서 너무 낮은 피치를 준다는 것을 의미하며 ($K_T/J^2 \approx 0.2$ 인 예제에서 약 5% 정도), 허브부근에서는 너무 높은 피치를 갖는 프로펠러를 설계하게 된다는 사실을 의미한다. 동일한 연구결과가 최근에 국내에서도 발표된 바 있다. [이창섭 등, 1990]

Dyne [1983]는 최적화 연구에서 축대칭 반류를 일련의 무한길이 ring vortex tube로 표시한 바 있다. 이 ring vortex system의 강도 및 위치는 프로펠러에 의해 변화되며, 그 결과로 프로펠러 원판에서의 공칭반류 W_w 이 유효반류 W_e 로 변환된다. 프로펠러와 wake vortex system의 상호작용은 프로펠러 원판 후류에서도 계속되어 최종반류(final wake) W_f 는 유효반류와 크게 달라지며, 특히 배수반류(displacement wake) W_d 가 클때 더욱 두드러진다.

Dyne는 또한 최종반류에서의 helical vortex의 피치가 거의 일정할 때 최적 효율이 얻어짐을 보였다. 그리고 축대칭 반류에서는 순환분포를 변화시켜서 얻는 효율의 이득이 적다는 것을 보였다.

불균일 반류에서의 이론적 연구는 아직 초보 단계에 있다.

최적직경 및 회전수

프로펠러 하중이 주어졌을 때, 직경이 주어지면 $K_T/J^2 (= T/\rho V_A^2 D^2)$ 이 정해지고 혹은

회전수가 주어지면 $\sqrt[4]{K_T/J^4} (= \sqrt[4]{Tn^2/\rho V_A^4})$ 이 정해질때 프로펠러 후류회전에 의한 효율의 손실은 전진비($J_A = V_A/nD$)의 감소와 함께(즉, 회전수나 프로펠러 직경의 증가로) 줄어든다. 날개마찰저항에 의한 손실은 반대경향을 보이고 있기 때문에 최적효율은 그 중간의 적절한 전진비에서 타협되어 얻어지게 된다. 이러한 최적 J-값은 이론적으로 계산되거나 계열자료로부터 유도될 수 있다.

계열자료로부터 최적직경을 결정하기 위하여 $\sqrt[4]{K_T/J^4}$ 에 대한 J_{opt} 의 변화를 보여주는 도표가 자주 쓰인다. SSPA의 경험에 의하면 최적상태가 얻어졌을 때 추진계수 K_{Top} 의 값이 프로펠러에 걸리는 하중에 거의 관계없이 일정한 값을 갖는다. 이 경험에 의거 SSPA는 아래 표에서 보는 바와 같은 K_{Top} 의 값을 최적 기준으로 사용하고 있다. 최적 K_T 값은 날개수가 적어지면 감소하는 경향을 보인다.

No of Blades	K_{Top}	
	SSPA Series	NSMB B-Series
3	0.12	
4	0.16	0.18
5	0.18	0.20
6	0.21	

또한 위의 표로부터 날개수가 적을수록 더욱 더 큰 최적직경을 갖는다는 사실을 알 수 있다. 전개면적이 K_{Top} 에 미치는 영향은 적지만, 면적증가와 함께 조금 증가하리라고 생각할 수 있다.

Burrill[1955]의 실험과 계산에 의하면 선후 조건에서의 최적 프로펠러 직경이 단독상태의 것보다 적다고 하였던 바, 주요원인은 아마도 직경의 감소가 일반적으로 선체효율 $\eta_H (= (1-t)(1-W))$ 을 증가시키기 때문인 것으로 보인다. 다른 이유는 원주방향에 걸친 반류 속도변화의 부정적 영향이 감소하기 때문이라고 언급되어 있다. 조사자료에 따르면 세계의 많은 설계기관이 단추진기선의 경우 선후상태의 직경은 단독상태의 최적직경을 5%정도 감소시켜 쓰는 것으로 나타나 있다. 최적직경을 이론적으로 계산하는 것도 가능하다.

이때의 과정을 보면

a) 연구대상인 각개 프로펠러 직경에 대해, 캐비테이션 여유를 만족하도록 코드 길이를 조정.

b) 반경쪽 반류변화의 영향 고려.

c) 정확한 허브직경 사용. 계열자료 사용시는 계열의 허브를 써야 함.

이론에 의해 계산할 경우는 실험에 의한 것에 비하여 직경변화에 따른 효율변화가 완만함이 알려져 있다.

프로펠러 날개수

프로펠러 날개수는 대부분의 경우 프로펠러에 의한 선체 표면전달 기진력 및 축전달 기진력의 진동수 및 진폭과 함께 선체응답의 특성을 고려하여 선택된다. 여러가지의 프로펠러 날개수에 대한 선류부의 진동해석 결과가 진동의 관점에서 서로 동등하고 허용될 수 있다는 결론을 얻은 경우에만, 효율이 중요 관점으로 등장한다.

NSMB B-Series의 최근 컴퓨터 해석결과에 따르면 프로펠러 효율은 날개수가 감소함에 따라 매우 큰 폭으로 증가한다. 이 경향은 날개수가 적을수록 캐비테이션을 피하기 위한 전개면적비가 더욱 적어진다는 사실 때문에 더욱 심해진다. 예를 들면 $(K_T/J^5)^{1/4} = 1.01$ 의 하중상태에 대하여 $A_E/A_0 = 0.32$ 인 2개의 날개를 가진 B-Series 프로펠러가 $A_E/A_0 = 0.53$ 이고 날개수가 5개인 프로펠러보다 13% 큰 효율을 보인다. 그러나 최근의 실험검증결과 위의 경우 실제 모형해석값 보다 적은 7%정도만의 이득이 얻어진다는 사실이 새로이 밝혀졌다.

이 결과가 의미하는 것은 계통적인 프로펠러 자료가 계측오차, 프로펠러 특성을 표시하는 회귀해석으로 구한 다항식의 부정확함 그리고 예상치 못한 척도효과를 때문에 다소 오도하는 결과를 줄 수 있다는 것이다. 따라서 계열자료는 개략적 지침으로만 사용되어야 한다. 이러한 제한은 날개 수 뿐만 아니라 최적직경과 날개면적의 영향 결정에도 적용될 수 있겠다. 최종 결단을 내리기 전에 다른 계열자료와의 비교 혹은 이론적 계산과의 비교가 요구된다.

날개 윤곽선

날개 윤곽선은 보통 최적 추진이 아닌 다른 조건으로 선택된다. 즉, 프로펠러 날개 면적은 캐비테이션 침식을 피하기 위해 결정되고, 날개의 모양과 스큐는 기진력을 최소로 하도록, 날개의 두께는 강도 요구조건을 만족하도록 결정되기 때문이다. 이러한 변수의 변화가 축동력에 미치는 영향은 따라서 간접적으로 나타난다.

날개 면적을 예로 들어보자. 만일 반경방향 코드길이의 분포가 주어지면, 캐비테이션 침식을 피하기 위해 필요한 최소 날개 면적은 경험에 바탕을 둔 캐비테이션 기준에 의해 계산된다. 그러나 최신의 설계법을 쓰면 계산된 코드방향 입력분포와 기포 캐비테이션 등을 피하기 위해 주어진 캐비테이션 여유로 부터 날개면적이 계산될 수 있다. 반경위치에 상관이 없는 캐비테이션 여유를 갖도록 코드길이를 조절함으로써 최소한의 날개면적을 얻고 축동력도 경험식에 의해 결정된 때보다 적을 수 있겠다.

프로펠러에 의해 유기된 기진력을 감소시키는 한가지 방법으로 스큐를 도입할 수 있다. 진동 허용한계가 주어지면 스큐프로펠러의 효율은 통상의 프로펠러 효율보다 클 수 있는데 다음과 같은 이유 때문이다.

- a) 보다 적은 날개면적이 허용되거나,
- b) 최적의 반경방향 순환분포가 적용되거나
- c) 보다 적은 날개끝-선체 간격이 허용되기 때문에 대직경, 저회전 설계가 가능하게 되기 때문이다.

2.3 특별한 추진체계

쌍추진기 추진

쌍추진기 선박의 경우, 선후상태에서 최적인 프로펠러의 직경은, 단추진기 경우 단독시험 최적직경보다 5%적었는데 비해, 보다 적게 보통 2~4% 감소시킨다.

쌍추진기 선박의 최적화에서 중요한 것은 회전방향의 선택, 허브 및 스트럿의 모양과 방향이다. 간단한 선택방법은 없지만 대개 회전방향의 선택은 preswirl(상류회전)의 개념과 연관지어 결정되어야 하며, 스트럿은 국부 유동방향과 일치하도록 결정되어야 한다.

덕트프로펠러 추진

프로펠러 부하가 큰 경우에는 가속덕트로 들어싸인 프로펠러의 단독효율이 보통 프로펠러의 효율을 훨씬 상회한다. NSMB 19A 덕트의 경우 덕트프로펠러 부하(K_{TT})의 한계는 $(K_{TT}/J^4) \cong 1.2$ 혹은 $(K_Q/J^5)^{1/4} \cong 0.9$ 이다. 각개 덕트의 개별적 설계로 이 범위를 낮출 수 있겠지만, 대부분의 모형시험에서 선후상태에서의 덕트에 의한 이득이 단독상태에서의 이득보다 적어진다는 사실을 감안하여 다음 기준을 결정하기로 한다. 즉,

$$(K_{TT}/J^4)^{1/4} \geq 1.2$$

인 경우에는 적절히 설계된 덕트프로펠러가 축동력을 절감시킨다.

덕트프로펠러의 최적직경은 보통 프로펠러의 직경보다 적지만, 덕트의 최대직경은 더 클 경우도 있을 수 있다. 그리고 최적부하계수 K_{TTopt} 의 범위는

$$0.25 \leq K_{TTopt} \leq 0.35$$

덕트의 모양과 방향이 적절히 선택되면 덕트가 유동에 좋은 영향을 주어 프로펠러의 도움 없이도 저항을 감소시킬 수 있다. 이 영향은 Wake vorticity와의 유리한 상호작용과 함께 프로펠러 전방에 위치한 덕트가 어떻게 축동력을 감소시켜 주는가를 설명해준다.

상반회전 프로펠러 추진

단독시험 결과에 따르면 상반회전 프로펠러는 대응되는 보통 프로펠러와 거의 비슷한 효율을 갖는다. 이때 전체 부하계수는

$$\Sigma K_{Top} \cong 0.30$$

이 되며, 이는 최적직경이 약 12% 적음을 의미한다. 적은 직경은 다음과 같은 두가지 잇점을 가진다.

- a) 회전수가 불변인 경우는 선체효율이 증가된다.
- b) 프로펠러 직경을 단추진기의 경우만큼 증가시키면 상반회전 프로펠러의 회전수가 감소될 수 있으므로 효율이 증가된다.

이론 계산에 의하면 선후상태에서의 상반회전 프로펠러의 최적 조건은 날개끝 하중이 상대적으로 줄어든다는 사실을 알 수 있다. 즉 날개끝 하중의 감소는 유용한 일이 안쪽 반경

에서 이루어진다는 것을 뜻한다.

CRP의 효율이 통상의 프로펠러 보다 10% 이상 높아서 지금같은 에너지 절약시대의 필수적인 추진장치라는 것은 누구나 아는 것이나, 이중 동심축과 CRP기어의 구조적 강도가 분체되어 실용화되지 못하고 있었으나, 일본의 IHI와 MHI에서 실선장착에 성공함으로써 우리로서는 급박하게 되었다. 이 분야에 대한 연구는 수출선의 수주등과 관련하여 국내 조선공업의 사활이 걸릴만큼 시급하게 되었다. 또한 Guide vane등과 같은 복합 추진장치도 똑같은 특성을 가지고 있으므로 비슷하게 해석이 가능할 것이다.

3. 선체 표면 기진력 추정

3.1 서 언

프로펠러에 의한 선체표면 변동압력을 정확하게 추정하기 위하여는 여러개의 중간과정을 자세히 살펴볼 필요가 있다. 우선 프로펠러가 작동하는 선미반류와 프로펠러와의 상호작용에 대한 이해 즉, 유효반류에 대한 정보가 필요하다. 유효반류에 대한 해석이 완료되면 프로펠러의 경계치 문제에 대한 해석을 통하여 프로펠러에 작용하는 전체하중, 날개표면에서의 압력분포등에 관한 결과를 얻게 되며, 이 결과는 궁극적으로 캐비테이션 범위 및 체적의 추정에 결정적 영향을 주게 된다.

16차 및 17차 ITTC 프로펠러 및 캐비테이션 기술위원회에 보고된 바와 같이 프로펠러 비정상 캐비테이션과 선체에의 유기변동압력을 추정하기 위한 이론적/경험적 방법들이 다수 개발되었다. 여기에서는 이러한 방법들을 실제 특정한 설계과정에서 단계 단계별로 어떻게 응용하는가를 검토하기로 한다. 설계과정에서 가장 중요한 단계는 프로펠러의 형상을 수정하는 것과 반류유동을 개선하기 위하여 선체를 수정하는 것이다. 그러나 여기에서는 프로펠러에 관한 문제만을 설명하기로 한다.

3.2 초기설계단계

초기설계 단계에서는 일반적으로 축동력, 속

도, 선박의 주요치수 등과 같은 주요 변수들이 우선 주어지며, 동시에 선박 진동의 허용기준 등이 규정되어 있다. 16차 ITTC 프로펠러 기술위원회 보고서에는 이런 목적의 기준들이 발표되어 있으며, 이들은 대부분 진동이 승무원이나 국부판 진동에 또는 구조적 실패에 미치는 영향을 기초로 작성된 것이다. 날개진동수의 허용 압력 진폭은 4-12kPa 사이에서 변화하지만, 실제 항해중의 경험에 의하면 선미구조 실패의 위험성은 진폭이 7-8kPa 이상될 때에 크게 증가한다. 전체적인 진동에 관하여는 날개진동수의 허용압력진폭은 선종이나 선형에 크게 상관되지 않는다.

대부분의 초기평가 방법은 주요 프로펠러 변수와 함께 반류자료를 필요로 한다. 따라서 2차 설계 단계에서는 모형선 선미에서의 반류를 계측하여 사용하거나, 수많은 모형시험에서 얻은, 반류자료를 통계해석하여 얻은 반류 peak와 속도구배와 같은 중요한 반류변수를 추정하기 위한 경험적/통계적 공식이 최근 많이 발표되고 있다.

현존하는 선체변동압력 초기 추정자료는 스큐를 고려하지 않고 있으나, Yamasaki[1983]는 주어진 선형의 반류형상에 따라 스큐가 변동압력에 미치는 영향을 연구하고, 선형과 그 반류로부터 스큐의 효과를 미리 예측할 수 있다는 점을 정리해 보였다.

3.3 상세설계단계

프로펠러 설계의 최종결정은 다음 세가지의 계산결과를 토대로 이루어진다.

a) 캐비테이션 범위계산 : 뒷면 캐비테이션은 물론이고 앞면 캐비테이션도 최소화하도록 한다.

b) 변동압력계산 : 프로펠러에 의해 유기되어 선체 표면에 전달된 국부변동압력의 진폭과 적분력을 구하고 초기설계단계에서 사용된 기준과 비교한다.

c) 강제진동해석 : 가장 완전한 방법으로 프로펠러에 의한 기진력을 입력으로 유한요소법등을 적용하여 선루의 진동 해석을 실시한다.

이러한 과정을 지낸후 선루의 고유진동수를

피하도록 날개수를 정한다. 다음은 현존하는 여러가지 방법들의 장점 및 제한범위를 요약해 보기로 한다.

날개부하와 압력분포의 계산

비정상 하중을 계산하는데에는 세가지 과정이 있다.

- a) 양력선 이론법
- b) 양력선 이론과 양력면 효과 수정계수
- c) 양력면 이론법 또는 양력판 이론법

최근에는 PC급 개인용 컴퓨터의 이용으로 양력면 이론에 근거한 방법이 널리 보급되고 있다. 비정상 하중의 계산정도를 높이기 위하여, 양력판 이론에 의한 계산이 발표되고 있으나[Shin[1990] 또는 김영기 등[1991], 양력면 이론과 동일한 값을 주고 계산시간만을 증가시키기 때문에 비정상 하중의 계산에는 아직 활용되지 않고 있다.

날개 캐비테이션 계산

날개 캐비테이션 계산은 다음과 같은 방법들이 쓰이고 있다.

- a) 최대 기포개념(Johnsson[1966])
- b) 날개 단면의 일정 양력 개념(van Oossanen[1974])
- c) 2차원 단면에 대한 선형 자유유선 이론 Geurst[1961])
- d) 캐비테이션 양력면 이론(Lee[1980] : Kinnas[1991])

위의 여러가지 방법중 Lee[1980]는 양력면 이론의 수식화를 이룬 다음 선형화된 경계조건을 만족시켜 해를 구함으로써 캐비티의 길이, 두께 등을 계산한다. 이로부터 캐비티의 체적을 시간의 함수로 구하면 이로부터 선체표면에서의 변동압력계산이 가능해진다.

프로펠러 캐비테이션에 의한 선체 변동압력 계산

캐비테이션에 의한 선체 변동압력을 계산하기 위하여는 자유수면의 존재하에서 선체와 프로펠러의 상호작용을 정확히 해석해야 한다는 어려운 문제가 있다. 그러나 프로펠러의 회전수가 높은 것을 감안하여, 구주파수 근사에 의해 자유수면 경계조건을 근사화 하면 (Breslin [1982]), 프로펠러에 의한 선체표면에서의 기

진력을 비교적 정확히 계산할 수 있다. 최근에 이창섭등[1991]은 Lee[1980]의 양력면이론에 의해 캐비티를 계산한 후에 캐비티에 의해 유기된 속도포텐셜장을 입사류로 하여 Breslin방법에 의해 선체표면에서의 변동압력을 추정한 예를 보여주고 있다.

실험에 의한 추정법

실험적으로 캐비테이션 영향을 알아내는 방법은 다음 네가지가 있다.

- a) 완전한 모형선을 감압된 진공예인수조에서 예인하 실험(MARIN방식)
- b) 완전한 모형선을 캐비테이션 터널에 넣고 실험(SSPA방식)
- c) 선미부만 완전한(가끔 wire grid비용) 모조선을 캐비테이션 터널에 장치하고 실험(KRISO 혹은 현대 HMRI방식)
- d) 표준모조선/모조판을 사용하여 실험

각 실험방법은 경제적, 기술적 장단점을 가진다. 그러나 실험법의 정립을 위하여는 해당 기관 사이에 기본 및 2차 날개진동수의 변동압력 크기에 대한 비교연구가 이루어져야 하겠다. 선미가 뚝뚝한 저속선의 경우는 통상적인 축방향 유속의 재현뿐만 아니라, 프로펠러 근처에서의 횡방향 속도성분의 재현도 중요하다. 이를 위하여 일부 캐비테이션 터널에서는 유동 조절장치(flow liner)를 써서 프로펠러면에서의 횡방향 유동을 조절해주어서, 모형선-실선 사이의 캐비티 형상의 상호관계를 증진시키고 있다.

3.4 선체표면 기진력 추정능력 평가

제18차 및 19차 ITTC에서 수행한 비교계산에 의하면 일부 연구기관을 제외하면 전 세계적으로 캐비테이션에 의한 선체표면 변동압력의 추정은 초보적인 단계에 있음을 알 수 있다. 특히 캐비테이션 범위의 계산결과를 비교한 결과 너무 분산이 심한 것이 밝혀짐으로써 보다 근본적인 문제의 해결이 필요하다고 인식하게 되었다.

현재 국내에서는 선체표면 기진력 추정을 위한 수치모형개발이 활발히 진행되고 있는 상황이며, 캐비테이션 터널을 이용한 실험 방법도

해사기술연구소와 현대 선박해양연구소를 중심으로 확립되어가고 있다. 그러나 모형시험에서 얻어진 이러한 결과들은 실선실험을 통한 검증 과정을 거쳐야만 신뢰성을 가질 수 있으며, feedback된 실선 자료를 불완전한 이론 및 실험법의 개선에 활용하여야 보다 진동 성능이 우수한 선박의 설계가 가능해질 수 있다.

4. 프로펠러의 수학적 모형화

4.1 서 언

프로펠러를 수학적으로 표시하는 이론은 Lerbs의 양력선 이론의 발표된 이후 큰 발전을 이룩하여, 양력면 이론까지 발달하여 정상적인, 또한 비정상적인 프로펠러의 성능해석 및 복잡한 형상의 프로펠러를 설계하는 단계까지 실용화되고 있다. 최근에는 프로펠러 양력판 이론 (Panel Method)이 프로펠러 앞날 및 뒷날 부근에서의 압력분포를 추정하는데에서 특히 정도를 향상시키고 있다.

프로펠러 성능의 수학적 해석은 특이점을 분포하여 날개 및 프로펠러 후류 보오텍스 시스템을 표시하고 경계조건을 만족하는 경계 방정식을 해석함으로써 가능하다. 이때 특이점을 일정한 피치를 갖는 나선면에 놓는가 또는 실제의 위치에 놓는가에 따라 선형 또는 비선형 문제로 나뉘게 된다. 프로펠러의 하중이 가벼울 때에는 선형이론으로 충분히 프로펠러의 성능을 해석할 수 있지만, 하중이 무거워지기 시작하면 후류 보오텍스의 변형이 심하여서 후연 보오텍스를 일정한 피치면이 아니라 실제의 위치에 놓아야 한다. 이러한 비선형 보오텍스 모형화를 가능케하기 위하여는 LDV 등을 이용한 프로펠러 주위의 유동에 대한 상세하고도 정확한 관찰이 필요하다.

4.2 프로펠러 양력면 이론

프로펠러의 성능은 2차원 비행익의 성능해석과 마찬가지로 캠버면에 의한 양력특성과 날개 두께에 의한 압력분포의 변형을 따로 분리하여 해석할 수 있다. 양력특성을 표현하기 위하여 캠버면에 보오텍스를 분포하고, 날개두께의 영

향을 표현하기 위하여 쏘오스를 분포하는 경계치 문제가 널리 알려져 있다. [Kervin & Lee, 1978]

연속적으로 분포되는 보오텍스 분포는 수치 해석을 가능하게 하기 위하여 집중화된 보오텍스 격자 시스템 (Discrete Vortex Lattice System)으로 표현될 수 있으며, 후연 보오텍스 시스템도 격자의 형식으로 치환된다. 보오텍스의 세기를 미지수로 하여 날개표면에서의 경계조건을 만족시키는 적분방정식은 위의 집중화로 1차 연립방정식의 형태로 변환되며, 고속 컴퓨터의 도움으로 해가 쉽게 구해진다. 이로부터 날개에 작용하는 압력 및 추력, 토오크를 계산해 낼 수 있다.

위와 같은 방법은 비정상 프로펠러 성능의 계산에도 똑같이 적용되고 있으며, 프로펠러 설계에도 직접 활용되고 있다. 날개의 점성저항은 경험에 의한 날개 단면 항력 계수값을 사용하여 고려해 주고 있다.

최근 프로펠러 양력면 이론 분야에서는 프랑스의 Guermond[1988]에 의해 발표된 Collocation Method가 특기할 만한 것이다. 지금까지 가장 정도가 높은 것으로 알려졌던 보오텍스 분포법을 프로펠러 양력면 문제 해석에 응용할 때, 엄밀한 해석적 증명이 결여된채로 수치해석 결과가 실험결과와 비슷하다는 것을 유일한 증거로 채택, 활용하여 왔으나 해석해가 존재하는 Circular wing등에 대하여 정밀한 Collocation Method를 제안함으로써 기존의 보오텍스 분포법이 널리 사용된 이유를 증명하였다.

4.3 프로펠러 후연 보오텍스 체계

최근 사용되는 대부분의 설계 및 해석방법은 추진기 후류의 자유 나선형 보오텍스가 일정한 반경과 피치를 가지고 축대칭이라는 가정 아래서 이루어지고 있다. 실제로 이 보오텍스들은 유선을 따라 흐르게 되며, 따라서 그 형태가 불규칙적이며 반경과 피치가 축방향으로 상당히 변화하고 있다. 프로펠러에 의해 유기되는 속도의 계산정도를 향상시키기 위하여는 위에 언급한 선형 보오텍스 모형을 실제 보오텍스

체계와 잘 일치하는 비선형 모형으로 치환하여야 한다.

최근에 Laser-Doppler 계측에 의한 이러한 보오텍스 체계의 연구는 매우 활발하며, 일련의 실험결과를 종합하여 보면 정상 축대칭 유동에서 후류 보오텍스의 기하현상을 결정하는 더 많은 변수들이 계측되어야 하며, 제안되어 쓰이고 있는 보오텍스면 모형에 대한 세세한 개선이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 일정한 세기를 유지하는 방출 보오텍스 선의 위치를 결정시켜주는 보오텍스 방정식은 잘 알려져 있으나 너무 많은 수치해석을 필요로 하기 때문에 실용성이 없다. 따라서 불균일 유동에서의 캐비테이션 상태나 프로펠러 주위에서의 방출 보오텍스 체계에 대한 보다 풍부한 실험정보가 절실히 요구되고 있다. Greeley and Kerwin[1985]은 LDV계측을 바탕으로 가장 실제와 가까운 후연 보오텍스체계를 제안한 바 있으며, 국내에서는 이창섭 등 [1991]에 의해 프로펠러의 성능 및 설계 프로그램에 동 모형이 적용되어 쓰이고 있다.

4.4 프로펠러 양력판 이론

프로펠러 유체역학 문제에 대한 해석분야의 최근 동향은 더욱 고속화 대형화 되어가는 컴퓨터의 이용과 함께 프로펠러 양력판 이론(Panel Method)이 급속히 보급되고 있는 것들을 들 수 있다. 종래에는 캠버면에 dipole 혹은 보오텍스 격자를 분포함으로써 프로펠러의 성능계산을 하여 왔으나, 이러한 방법으로는 프로펠러 앞날 근처의 압력분포 추정이 부정확하여 캐비테이션의 발생을 추정하는데 어려움이 많았다. 그러나 프로펠러 날개의 실제 표면에 dipole을 분포함으로써 날개 표면은 물론 프로펠러 앞날 부근 및 날개끝 근처의 압력의 계산 정도를 크게 향상시키고 있다. dipole 혹은 source panel을 선체에 적용하는 것은 널리 소개되어 응용되어 왔으나 프로펠러에의 적용은 최근의 일이며, dipole 분포법을 프로펠러에 적용함에 있어 Kutta condition문제를 정확하게 적용하는 새로운 해석이 이진태[1987]에 의해 밝혀진 바 있다.

최근에는 MIT의 Kerwin[1987]과 그의 그룹에서 양력판이론을 덕트의 성능해석 및 최적화에 활용한 내용과 프로펠러와 vane과의 상호작용 [Kerwin, 1988]을 다룬 문제가 발표되었으며, DTRC(미해군 선박연구소, David Taylor Research Center)에서 Yang[1988] 등에 의해 항공분야에서 이미 보급되고 있는 VSAERO code를 프로펠러에 적용한 예가 발표되었다. Yang의 발표에서 보면 이진태[1987]에 의해 발표된 Kutta condition을 적용하지 않았기 때문에 날개 뒷날부분의 정도가 많이 떨어지고 있음을 볼 수 있다.

최근에는 양력판이론이 비정상 성능해석에도 확대적용되어 가고 있으며 [Shin, 1990; 김영기 등, 1991], 기존의 비정상 양력면이론과 동일한 좋은 결과를 보여주는 것으로 발표되고 있다.

4.5 프로펠러 이론의 향후 연구과제

균일류에서 작동하는 보통 프로펠러의 성능계산을 위한 포텐셜 유동해석은 거의 완전하게 해결되어가고 있으며, 기하적인 비선형 효과를 다루는 양력판 이론이 발표되고 있다. 이 방법이 더욱 발전하면 프로펠러 표면, 특히 날개의 앞날 부분에서의 압력계산이 더욱 정확하게 수행될 수 있을 것이다. 포텐셜 유동의 정확한 해석 다음은 선미 반류중의 shear flow와의 상호 작용해석으로 Laplace방정식이 더이상 적용되지 못하는 유장의 해석을 위한 기법의 개발이 요구된다. 현재 선체주위의 점성유동해석에 쓰이는 Navier-Stokes 방정식 해석을 프로펠러까지 확장시키는 시도가 진행되고 있으며, 선형화된 보오텍스 방정식을 써서 전단류와 프로펠러의 상호작용을 해석하는 이론도 정립되어 가고 있으나 더욱 더 발전시켜야 한다.

프로펠러 표면의 점성류에 관한 연구로는 Jessup에 의한 LDV를 사용한 경계층의 분포모양 및 난류 강도의 측정이 있으며, Groves & Chang[1985]에 의한 층류 및 난류 경계층을 얇은 경계층이론을 적용하여 유한차분법에 의해 계산하는 과정을 개발한 것이 있다.

프로펠러 표면에서의 압력계산의 정도향상이

이루어지면 캐비테이션의 정확한 해석이 가능해질 것이다. 아직은 이창섭[1989], 김영기 등[1990], Lee등[1991], Kinnas and Fine[1990]에서 볼 수 있듯이 2차원 단면에서의 부분 및 초월공동 추정수준에 있지만, 최근의 고속컴퓨터의 도움으로 전세계적으로 이분야의 연구가 활발히 진행될 전망이다.

5. 새로운 날개단면개발

최근들어 세계적으로 앞선 선박관련 연구기관의 주요 연구과제의 하나로 약 15개 기관이 새로운 단면의 개발에 집중 투자하고 있다. 새로운 단면의 개발의 주요 목적은 캐비테이션의 초기발생 억제와 이에 따른 소음의 감소와 추진효율의 향상에 있다. 특히 해군용 프로펠러는 소음의 감소가 절대적으로 필요하기 때문에 이 분야 연구의 주류를 이루고 있다.

새로운 날개에 의한 효율향상

지금까지 새로운 단면의 개발에 있어서 주요 설계목적은 캐비테이션의 초기발생 지연 및 소음감소였다. 그러나 이렇게 하여 캐비테이션이 발생하지 않는 작동범위가 넓어지면 상대적으로 캐비테이션 여유가 커지게 되는 풀이므로, 반대로 프로펠러의 설계시 동일한 캐비테이션 여유를 만족시키도록하면, 보다 작은 전개면적비의 값을 얻게되므로, 효율을 증가시킬 수 있게된다. 따라서 캐비테이션 초기발생지연만을 목적으로 할 것이 아니라, 동시에 날개자체의 효율을 증가시키는 방향으로도 연구가 수행되어야 할 것이다. 그리고 이 사실을 고려하여 새로운 단면에 알맞는 예를 들면 Burrill의 판정기준을 대치할 새로운 캐비테이션 판정기준을 찾아내어 프로펠러의 초기설계시 전개면적비의 결정과정에 활용할 수 있어야 하겠다.

Eppler 방법의 개요

Eppler 방법[1979, 1981]은 일찌기 전산 프로그램이 공개되고, 실험에 의해 검증이 됨으로써, 새로운 단면 개발의 초창기에서부터 널리 보급되어 왔다. 종전의 날개 단면 설계이론

은 이상유체의 가정하에서 표면에 압력을 분포함으로써 날개형상을 유도하던 것이 대부분이었다. 그러나, Eppler 방법은 날개표면의 임의의 구간에 어떤 특정 받음각에서 원하는 속도값을 갖도록 지정해 줄 수 있어서, 불균일성이 심한 유동장에서 작동하는 선박 프로펠러의 날개 설계방법으로는 아주 적절한 이론이다. 또한 Eppler의 프로펠러의 날개 설계방법으로는 아주 적절한 이론이다. 또한 Eppler의 프로그램은 얇은 경계층이론에 근거하여 점성의 영향을 추가함으로써, 점성이 날개의 양력 및 항력에 미치는 영향이 고려되도록 하였다. 나아가 Eppler프로그램은 캐비테이션과 날개 뒷부분에서의 박리현상, 압력회복(pressure recovery)등을 입력자료로 제어할 수 있다는 장점 때문에 날개단면 설계에 아주 적합하다.

새로운 날개개발 사례

지금까지의 연구결과로는 초기에 Eppler와의 공동 연구에 의해 DTRC의 Shen[1979, 1981]에 의해 발표된 연구와, 동경대학의 Yamaguchi [1983]등에 의한 활용이 가장 대표적이다. 일본의 프로펠러 제작회사에서는 동 방법에 의해 개발한 프로펠러를 PI 프로펠러라는 상표를 사용하여 상당한 판매실적을 올리고 있는 중이다. 이 분야의 연구는 국내에서는 해사기술연구소에서 집중적으로 수행되어 [이창섭 등, 1984 ; 이진태 등 1989, 1991a], 독특한 설계법이 정립되어 가는 중이며, 체계적으로 날개형상을 변화시켜가며 새로운 단면을 활용한 KD-프로펠러 Series까지 개발한 바 있다 [이진태 등, 1991b]. 또한 최근에는 새로운 날개 개발법을 실선 선박의 프로펠러 설계에 까지 성공적으로 적용[Lee, J.-T.등, 1991]되어 보고된 바 있다.

6. 프로펠러 날개 응력

프로펠러의 제작과 실제 사용을 위하여는 정확한 응력해석이 필요하다. 통상적인 프로펠러의 경우는 단순보 이론에 근거한 각종 선급규정을 만족시키면 되지만, 프로펠러의 스쿠양이

증가되고 특수한 운항상태를 필요로 하는 경우에는 FEM 등의 방법에 의한 정밀한 해석이 필수적으로 요구된다[노인식 등, 1989]

ITTC의 추진기위원회 내부에서의 비교연구에 의하면 FEM 방법은 그 정도의 차이는 약간 있지만 주어진 하중하에서 거의 비슷한 응력분포를 계산해 냄으로써, 프로펠러 응력해석의 가장 중요한 단계는 유체력적 하중을 계산하는 것으로 결론이 이어졌다.

특히 유체력 의한 하중분포가 중요한 경우 비상역추진(crash-astern manoeuvre) 상태로 얼마나 빨리 (Δt), 얼마의 동력까지 허용되는가에 따라 응력의 크기가 영향을 받는다. 이때 하중분포의 계산은 유동의 박리현상 때문에 아직도 정확한 해석이 불가하지만, 최근에는 Jiang 등[1991]에 의해 근사적 해석방법이 제안된 바 있다.

최근 프로펠러의 hydro-elastic 영향을 다루는 문제가 영국의 Glover[1988]와 노인식 등[1989]에 의해 발표되었다. 유체역학적 문제는 양력면 이론에 의해 해석되었으며, 이를 유한요소법에 의한 날개 프로그램에 연결시킨 후 날개변형이 프로펠러의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 특히 고스큐 프로펠러의 경우에 무시하지 못할 만큼의 영향을 줄 수 있다는 것이 발표되었다.

7. 프로펠러 설계

프로펠러의 설계가 바르게 수행되기 위하여는 위에 언급한 모든 분야의 지식을 서로 관련시켜 고려하여야 하지만, 여기에서는 프로펠러의 설계를 프로펠러의 3-차원 날개형상 결정 과정에만 국한하여 기술하고자 한다. 또한 프로펠러의 설계과정이 대부분 전산화가 되어 이미 국내 조선소에 널리 보급되고 있는 관계로, 연구기술 동향 파악을 위하여는 그간 국내에서 개발, 보급되고 있는 연구결과를 위주로 하여 살펴보아도 좋을리라 본다.

선박설계의 다른 분야와 마찬가지로 프로펠러의 설계도 크게 초기설계, 상세설계 등의 단계로 나누어 볼 수 있다. 프로펠러의 초기설계

단계에서 가장 중요한 설계변수는 프로펠러의 날개수, 전계면적비, 피치비 등이며, 이러한 변수는 통상 계열자료를 사용하여 최적값을 결정한다. 현재 널리 활용되고 있는 계열자료로는 MARIN의 B-Series와 일본의 MAU-Series를 들 수 있으나, MARIN에서 그동안의 모형실험 자료를 재 해석하여 발표한 최근의 B-Series 자료가 효율 추정 등에 있어 문제점이 있어 믿고 사용할 수 없으므로, MAU프로펠러의 단독 실험 결과를 국내에서 회귀해석하여 구한 자료를 사용하고 있다[서정천 등, 1984].

최근에는 위의 회귀해석된 MAU자료를 사용하여, 프로펠러-선체-엔진 사이의 상호작용을 고려하면서 전체 추진시스템을 최적화하는 연구가 국내에서 이루어져서[안성수 등, 1991], 초기설계 단계에서 프로펠러 제원과 엔진의 동시선정 등을 포함하여 연료소비량을 최소화한 종합적인 추진 시스템을 결정할 수 있는 단계까지 발전하고 있다.

프로펠러 상세설계의 첫단계는 양력선 이론에 의한 설계를 들 수 있다. 양력선이론은 Lerbs[1952]에 의해 발표된 이래 프로펠러 설계 및 성능해석에 계속 활용되어 왔으며, 국내에서는 이진태 등 [1980]에 의해 연구된 바 있다.

그러나, 프로펠러의 피치분포 및 코드방향의 캠버분포 등과 같은 3-차원형상을 정밀하게 결정하기 위하여는 양력면이론의 도입이 불가피해진다. 양력면이론 중에서도 보오텍스 분포법은 이론이 간단하고 수치계산의 정도가 높아 일찍부터 국내에 도입, 보급되고 있는 실정이다. 보오텍스 분포법은 MIT에서 Kerwin[1961]에 의해 발표된 이래 약20년에 걸쳐 Greeley and Kerwin[1982]에 이르기까지 그 정도를 계속 향상시켜 왔다. 국내에서는 일찍부터 Kerwin의 프로그램을 도입하여 활용해 온 바 있으며, 최근에는 김진현[1990]에 의해 Kerwin and Lee[1978]의 비정상 양력면 이론과 Greeley and Kerwin[1982]의 프로펠러 후류모형을 접목시킨 새로운 프로그램이 개발되어 보급되고 있다.

프로펠러 설계기법의 다음 연구 방향은 프로

펠러 날개의 두께 특히, 날개 앞날의 형상까지 정밀하게 결정되는 설계방법이 개발될 전망이다. 현재는 항공분야에서 비행익 날개의 3차원적인 설계가 시도되고 있는 정도이며, 국내에서는 김영기 등[1991]에 의해 포텐셜을 기저로 하는 새롭고 3차원 설계까지 확장 가능한 설계방법이 2-차원 날개단면의 개발에 적용 가능성이 발표된 바 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 1984, "Propeller Committee Report," 17th ITTC, Goteborg, Sweden.
- [2] 1987 "Propulsor Committee Report," 18th ITTC, Kobe, Japan.
- [3] 1990, "Propulsor Committee Report," 19th ITTC, Madrid, Spain.
- [4] SNAME, 1981, "Propeller '81 Symposium"
- [5] SNAME, 1984, "Propeller '84 Symposium"
- [6] SNAME, 1988, "Propeller '88 Symposium"
- [7] SNAME, 1991, "Propeller '91 Symposium"
- [8] 이창섭, 이진태, 서정천, 김영기, 1991, "프로펠러에 의해 유기된 선체표면 기진력 해석," 대한조선학회, 춘계연구발표회, pp.102~115.
- [9] Lauden, J., 1981, "The Influence of the Propeller on the Wake Distribution as Established in a Model Test," SNAME Propeller '81. pp.233~242.
- [10] Huang, T.T & Groves, N. C., 1980, "Effective wake; Theory and Experiment", 13th Symp. Naval Hydrodynamics, Tokyo, Japan, pp.651~673
- [11] Goodman, T.R & Breslin, J.P., 1982, "Theoretical and Experimental Induction Generated by a Propeller in an Axially-Symmetric Shear Flow," SIT Dept. of Ocean Eng'g Rpt. SITO E-82-2.
- [12] Falcao de Campos, J.A.C., 1983, "On the Calculation of Ducted Propeller Performance in Axisymmetric Flows," NSMB Pub. NO. 696.
- [13] Dyne, G., 1981, "A Design Method for Wake Vorticity Adapted Propellers in a Frictional Wake", Symp. on Advances in Propeller Research and Design, Gdansk.
- [14] Lee, C. -S., Song, I. -H., 1987, "Effective Wake and its influence upon propeller-induced pressure fluctuations," 3rd PRADS, Norway.
- [15] Lee, C.-S., 1988, "Theoretical Analysis of Sheared Flow behind a Hull," Chungnam Nat'l Univ. Report, pp.1~42.
- [16] 이창섭, 이진태, 1990, "선미후류-프로펠러 상호작용을 고려한 유효반류추정법," 대한조선학회지, 제27권2호, pp. 1~12
- [17] Lee, C. -S., Kim, Y.-G. & Lee, J-T., 1991, "A Potential-Based Panel Method for the Analysis of a Two-Dimensional Super-or Partially-Cavitating Hydrofoil," Cavitation '91 ASNE/JSME Fluid Eng. Conference, June, pp. 39~46
- [18] Lee, C. -S., Kim, Y. -G., Ahn, J. -W., 1991, "Interaction between a Propeller and the Stern Shear Flow," Korea-Japan Joint Workshop on Hydrodynamics in Ship Design, pp.16~29
- [19] 김영기, 이창섭, 이진태, 1991, "포텐셜을 기저로 한 양력판 이론에 의한 프로펠러의 정상 및 비정상 성능해석," 대한조선학회, 추계연구발표회, pp. 110~116.
- [20] Lee, C. -S., Kim, Y. -G., Ahn, J. -W., 1991, "Interaction between a Propeller and the Stern Shear Flow," Korea-Japan Joint Workshop on Hydridynamics in Ship Design, pp. 16~29.
- [21] 안성수, 이창섭, 1991, "선체-프로펠러-주기관 사이의 맞춤에 의한 선박추진 계통의 최적화," 대한조선학회, 추계학술발표회, pp.153~163.
- [22] Goodman, T.R., 1979, "Momentum Theory of a Propeller in a Shear Flow," J. of Ship Research, Vol. 23, pp 242~252.
- [23] Breslin, J.P., van Houten, R. J., Kerwin, J.E. & Johnsson, C.-A., 1982, "Theoretical and experimental propeller-induced hull pressure arising from intermitent blade cavitation, loading and thickness," Trans. SNAME, Vol. 90, pp.111~151.
- [24] Dyne, G., 1983, "Ship propulsion improvement-principles and a survey of alternative propulsion systems," 8th WEGEMT, Gothenburg, pp. 8/1~33.
- [25] Betz, A., 1919. "Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust," Nachr, Gesselsch. Wissensch. Gottingen, Math.-Phys., pp. 193~217.
- [26] Lerbs, H. W., 1952, "Moderately loaded propellers With a finite number of blades and arbitrary distribution of circulation," Trans. SNAME, Vol. 60.
- [27] Burrill, L. C., 1955, "The optimum diameter of marine propellers : A new design approach," Trans. NECIES, Vol.72.

- [28] van Manen, J.D., 1951, "Influence of the Non-Uniformity of the Wake of Ship Propeller," NSMB Pub. 100.
- [29] Loukakis, T & Politis, G., 1981, "On optimum propeller performance," SNAME Propeller '81 Symp.
- [30] Holden, K., 1983, "On Application of Skew Propellers to Increase Propulsive Efficiency," 5th Lips Propeller Symp., Drunen.
- [31] Brockett, T. E., Korpus, R. A., 1986, "Marine Propulsors for Minimum Shaft Horsepower," 21st ATTC, 9p.
- [32] Kerwin, J.E., Coney, W.B., Hsin, C. Y., 1986, "Optimum Circulation Distributions for Single and Multi Component Propulsors," 21st ATTC, Washington, DC.
- [33] Dyne, G., 1984, "On the propeller efficiency calculated by lifting-line theories," Int. Shipbuilding Progress, Vol. 31, No. 362, pp. 252~256.
- [34] Yamasaki, S., 1983, "Research on Highly Skewed Propellers," Ph. D Thesis, Hiroshima Univ., pp. 1~251.
- [35] Shin, C. -Y., 1990, "Development and Analysis of Panel Methods for Propellers in Unsteady Flow," Ph. D Thesis, MIT.
- [36] 김영기, 이창섭, 이진태, 1991, "양력판 이론에 의한 2차원 수중익의 초월공동문제 해석," 대한조선학회 논문집, 제28권, 제2호, pp. 159~173.
- [37] Johnsson, C.A., 1968, "On Theoretical Predictions of Characteristics and Cavitation Properties of Propellers," SSPA Pub. No.64.
- [38] van Oossanen, P., 1974, "Calculation of Performance and Cavitation Characteristics of Propeller including Effects of Nonuniform Flow and Viscosity," NSMB Pub. No. 457.
- [39] Geurst, J.A., 1961, "Linearized Theory of Two-Dimensional Cavity Flow," Thesis, Delft Tech. Inst., the Netherlands.
- [40] Lee, C. -S., 1980, "Prediction of the transient cavitation on marine propellers by numerical lifting surface theory," 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo, Japan, pp. 41~64.
- [41] Kinnas, S. A., 1991, "Leading-edge Corrections to the Linear Theory of Partially Cavitating Hydrofoils," J. of Ship Research, Vol. 35, No. 1.
- [42] Kerwin, J.E & Lee, C.-S., 1978, "Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting surface theory," Thrans, SNAME, Vol. 86, pp. 218~258.
- [43] Guermond, J. L., 1988. "About Collocation Methods for Marine Propeller Design," SNAME Propeller '88 Symp., pp.8/1~9.
- [44] Greeley, D. S & Kerwin, J.E., 1982, "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow," SNAME Trans. Vol. 90, pp. 415~453.
- [45] Lee, J. -T., 1987, "A Potential Based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow," Ph. D. Thesis, MIT, pp.1~150.
- [46] Kerwin, J. E., Kinnas, S. A., Lee, J. -T. & Hsin, C.-Y., 1987, "A surface panel method for the hydrodynamic analysis of ducted propellers," Trans. SNAME, Vol. 95.
- [47] Kerwin, J. E., Conney, W. B & Hsin, C. -Y., 1988, "Hydrodynamic Aspectd of Propeller/Wtator Design," SNAME Propeller '88 Symp., pp.3/1~12.
- [48] Yang, C. I & Jessup, S. D., 1988, "Benchmark Analysis of a Series of Propellers with a Panel Method," SNAME Propeller '88, pp. 17/1~10.
- [49] Groves, N. C. & Chang, M.S., 1985, "A Differential Prediction Method for Three-Dimensional Laminar and Turbulent Boundary Layers of Rotating Propeller Blades," 15th Symp. on Naval Hydrodynamics.
- [50] 이창섭, 1989, "양력판 이론에 의한 2차원 수중익의 부분 캐비티 문제해석," 대한조선학회지, 제26권 4호, pp.27~34.
- [51] Kim, Y. -G & Lee, C. -S., 1990, "Supercavitating Flow problems about two-dimensional symmetric strut," J. of SNAK, Vol. 27, No. 4, pp. 15~26
- [52] Kinnas, S. A and Fine, N. E. 1990, "Non-Linear Analysis of the Flow around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method," Proc. of IABEM-90 Symp. of the International Association for Boundary Element Methods, Rome, Italy.
- [53] [54] Eppler, R. & Shen, Y. T., 1979, "Wing Sections for Hydrofoils-Part 1 : Symmetrical Profiles," J. of Ship Research, Vol. 23.
- [54] Shen, Y. T. & Eppler, R., 1981. "Wing Sections for Hydrofoils-Part 2 : Nonsymmetrical Profiles," J. of Ship Research, Vol. 25.

- [55] Yamaguchi, H, & Kato, H., 1983, "Development of a Foil Section with Improved Cavitation Performance," J. SNAJ, No. 154.
- [56] 이창섭, 서정천, 송인행, 최홍수, 1984, "프로펠러 날개단면 개발을 위한 기초 연구" 한국기계(연) 연구보고서 UDC 629-114, 85p.
- [57] 이진태, 이창섭, 김문찬, 안중우, 김호충, 1989, "새로운 단면을 이용한 고효율 프로펠러 설계법," 대한조선학회지, 제26권, 제3호, pp.29~40.
- [58] 이진태, 김문찬, 안중우, 김호충, 1991, "새로운 날개단면을 이용한 KD-프로펠러 씨리즈 개발," 대한조선학회 논문집, 제28권, 제2호, pp.52~68.
- [59] 이진태, 김문찬, 안중우, 안석호, 김호충, 1991, "새로운 날개단면을 이용한 프로펠러 설계법-컨테이너선에 응용-", 대한조선학회 논문집, 제28권, 제2호, pp. 40~51.
- [60] Lee, J. -T., Kim, M. -C., Ahn, J. -W., Kim, K. -S. & Kim, H. -C., 1991, "Development of Marine Propellers with New Blade Sections for Container Ships," SNAME Propellers/Shafting '91 Symposium, 12p.
- [61] Jiang, C.-W., Huang, T.-T., Ng, R. & Shin, Y. S., 1991, "Propeller Hydrodynamic Loads and Blade Stress and Deflections during Backing and Crashback Operations," SNAME Propellers/Shafting '91 Symposium, 13p.
- [62] Atkinson, P. & Glover, E. J., 1988, "Propeller Hydroelastic Effects," SNAME Propeller '88 Symp., pp. 21/1~10.
- [63] Nho, I.-S., Lee, C.-S. & Kim, M.-C., 1989, "A Finite Element Dynamic Analysis of Marine Propeller Blades," PRADS '89, Varna.
- [64] 서정천, 이창섭, 1984, "MAU프로펠러 단독특성의 수식표현," 한국기계연구소 소보, 제11권, pp.95~101
- [65] 안중우, 이창섭, 현범수, 1985, "LDV를 이용한 프로펠러 주위유동의 실험 및 해석: 균일류중에서의 계측," 대한조선학회 춘계발표회, pp.330~347
- [66] 이진태, 김재근, 이창섭, 1980, "양력선 이론에 의한 추진기 초기설계에 대하여," 대한조선학회지, 제17권 3호, 대한조선학회, pp.5~17
- [67] Kerwin J. E., 1961, "The Solution of Propeller Lifting Surface Problems by Vortex Lattice Methods," Ph. D Thesis, MIT.
- [68] 김진현, 1990, "보오텍스 분포법에 의한 프로펠러 날개의 형상설계," 충남대학교 공과대학, 석사학위논문.
- [69] 김영기, 이창섭, 서정천, 1991. "2차원 수중 날개 단면의 설계를 위한 포텐셜을 기저로한 양력판 이론," 논문 준비중.

최근 발간된 국외저명 학술지의 목차입니다.
연구활동에 참고하시기 바랍니다.

Marine Technology
Volume 28, Number 4, July 1991

- 181 Explosive Ordnance Disposal SWATH Ship Design
by R. L. Schaffer, J. A. Kupersmith, R. Wilson, and T. J. Valsi
- 197 Ship of the Future
by K. Paetow
- 213 The Weight of Concrete Barge and Pontoon Hulls
by K. E. Harrington, R. Hamson, A. L. Marshall, and M. Hubert
- 224 Naval Force Levels: Theory and Practice, with Naval Engineering Challenges for the 1990s
by Jan Paul Hope
- 236 Design and Trials of a New River Towboat Propeller
by B. Christopoulos and R. Latorre
- 246 Forthcoming Events
- 247 Index of SNAME Publications for 1990

Journal of Ship Research
Volume 35, Number 3, September 1991

- 183 First- and Second-Order Wave Effects on a Submerged Spheroid
by C. H. Lee and J. N. Newman
- 191 A Review of the Kelvin Ship Wave Pattern
by Yong Kwun Chung and Jin Soo Lim
- 198 Analysis of the Flow Around Supercavitating Hydrofoils with Midchord and Face Cavity Detachment
by Spyros A. Kinnas and Neal E. Fine
- 210 Forces on Surface-Piercing Propellers with Inclination
by William S. Vorus
- 219 Oblique impact of Two Cylinders in a Uniform Flow
by Zhi Guo and Allen T. Chwang
- 230 Numerical Simulation of Unsteady Laminar Flow Over Vibrating Bodies (Planar Flow)
by N. Kolluru Venkat and Malcolm Spaulding
- 250 Discussion on Venkat & Spaulding: "Numerical Simulation of Nonlinear Free-Surface Flows Generated by a Heaving Body of Arbitrary Cross Section"
by Apostolos Papanikolaou
- 254 Beam Theories for Torsional-Bending Response of Ship Hulls
by P. Temdrup Pedersen
- 265 Addendum to Inōzū & Perakis: "Statistical Analysis of Failure Time Distributions for Great Lakes Marine Diesels Using Censored Data"
- 266 Modified Strip Model for Analyzing the Line Heating Method—Part 2: Thermo-Elastic-Plastic Plates
by Amiram Moshaiov and Jong Gye Shin