

## 와류격자법에 의한 프로펠러 성능추정 향상을 위한 제안

서성부\*

\*동의대학교 조선해양공학과

### Proposal for Improvement in Prediction of Marine Propeller Performance Using Vortex Lattice Method

Sung-Bu Suh\*

\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dongeui University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Propeller design 프로펠러 설계, Open water characteristics 단독특성, Vortex lattice method 와류격자법, Lifting surface theory 양력면 이론, Advanced velocity 전진속도, Trailing wake modeling 후연 반류 모델링

**ABSTRACT:** Current trends in propeller design have led to the need for extremely complex blade shapes, which place great demands on the accuracy of design and analysis methods. This paper presents a new proposal for improving the prediction of propeller performance with a vortex lattice method using the lifting surface theory. The paper presents a review of the theory and a description of the numerical methods employed. For 8 different propellers, the open water characteristics are calculated and compared with experimental data. The results are in good agreement in the region of a high advanced velocity, but there are differences in the other case. We have corrected the parameters for the trailing wake modeling in this paper, and repeated the calculation. The new calculation results are more in agreement with the experimental data.

#### 1. 서 론

선박의 엔진 마력 특성에 맞는 프로펠러의 성능 및 캐비테이션 특성에 대한 신뢰도 높은 추정을 위해서, 프로펠러 날개 주위의 유동을 정도 높게 예측할 수 있는 양력면(Lifting surface) 이론과 양력판(Lifting panel) 이론 등에 의한 이론적 성능해석 기법이 개발되어져 왔다. 양력면 이론에 의한 와류격자법(Vortex Lattice Method, VLM)은 프로펠러 날개를 격자로 분할하고 미지의 집중 와류를 캠버(Camber) 면에 직접 분포하여 해석하는 방법으로, 프로펠러 성능추정을 통한 설계에 성공적으로 적용되었다(Kerwin and Lee, 1978; Greeley and Kerwin, 1982). 이러한 양력면 이론은 선형이론에 근거하여 날개의 두께문제와 양력문제를 분리함으로써 최근까지 실용적 가치를 인정받고 있다. 그러나 선형화의 한계 때문에 앞날(Leading edge) 근처에서 실제 현상과는 거리가 먼 음의 무한대 압력 특이거동 현상이 발생하게 되는 문제점이 있다. 특히 캐비테이션이 발생하는 문제에서 앞날 부근에서의 캐비테이션 초기발생과 압력 특이거동이 긴밀한 관계가 있음을 생각하면, 앞날 부근에서의 계산 정도의 향상 없이는 정확한 캐비테이션 유동의 해석이 불가능하다. 따라서 앞날 근처에서의 정확한 해석을 위해 날개 두께의 영향을 정확히 고려해줄 수 있는 양력판 이론에 의한 포텐셜 기저(Potential based) 패널법(Surface panel method)을 도입하게 되었다(Lee, 1987). 이 방법은 프로펠러 날개 표면을 패널로 분할하고 각 패널에서의 포텐셜이 일정하다고 가정하는 것으로, 프로펠러 날개 주위의 유동 추정에 대한 오차를 낮추는 결과를 가져왔다(김영기 등, 1993; 문일성 등, 1996). 최

근에는 기존의 저차(Low order) 패널법 혹은 경계요소법(Boundary Element Method, BEM)의 단점을 보완한 고차 경계요소법에 의한 프로펠러 주위에 대한 유동해석도 수행하고 있다(백광준 등, 2001; 김진도와 이창섭, 2005).

한편 국내에서의 프로펠러 설계는 MAU 프로펠러 단독특성의 수식표현(서정천과 이창섭, 1984) 등을 이용한 계열(Series) 차트에 의한 초기설계 과정과, 양력면 이론 및 양력판 이론 등에 의한 성능추정을 통한 상세설계 과정으로 구분하여 수행하고 있다. 상세설계 과정에서의 양력판 이론에 의한 프로그램 사용이 앞서 지적했듯이 좀 더 정확한 프로펠러 성능 예측을 위해서는 유리하지만, 조선소 현업에서는 아직도 양력면 이론에 의한 와류격자법 프로그램이 가장 널리 사용되고 있는 실정이다(백광준 등, 2000; 장현길 등, 2010). 이는 양력판 이론에 의한 프로그램에서도 날개 앞날 및 뒷날(Trailing edge)에서는 여전히 개선의 여지가 남아 있어, 양력면 이론 프로그램과 비교하여 전문적인 사용 경험과 많은 계산시간을 필요로 하고 있기 때문으로 보인다.

따라서 본 논문에서는 국내에서 주로 사용하고 있는 와류격자법 프로그램인 KPA4b(이창섭 등, 1990)에 의한 프로펠러 성능추정 결과의 문제점을 제시하고, 고찰을 통해 프로그램 정도 향상을 위한 간단한 개선방안을 제안하고자 한다. 경계치 문제의 정식화는 최근 와류격자법에 의한 프로펠러 성능추정에서 Suh (2002)도 사용한 일반적인 방법을 기준으로 비교 정리하였고, 2개 선종별 4개의 실적선 프로펠러들에 대하여 단독특성 계산을 수행하였다. 그 결과를 예인수조의 모형시험 결과와 비교하였을 때, 대부분의 경우 비교적 잘 일치하고 있었고 MAU 계열 차트를 이

용한 결과보다는 추정 정도가 훨씬 높은 것을 확인하였다. 그러나 프로펠러의 하중이 작은 경우에는 실험결과와의 차이가 많이 발생하는 문제점이 있어 그 원인들을 고찰하고, 프로펠러 평균 피치비(Mean pitch ratio)의 값에 따라 후연 반류 모델링의 파라미터들 일부를 변화시키는 방법 등을 개선 방안으로 제안하였다.

## 2. 와류격자법에 의한 프로펠러 성능추정

### 2.1 경계치 문제의 정식화

임의의 물체주위의 유동을 비압축성과 비점성 유체 그리고 비회전 유동으로 가정한 포텐셜 유동이론을 바탕으로 하여 해석할 수 있다. 해석 대상이 되는 물체가 양력체인 경우, 유동장의 교란 속도포텐셜을  $\phi$ , 양력체 경계면과 후류 경계면을  $S_B$ 와  $S_W$ 로, 물체를 둘러싸고 있는 무한한 영역의 경계면은  $S_\infty$ 로, 양력체에 유입되는 속도를  $\vec{V}_\infty$ 로, 유동장으로 향하는 경계면의 법선 방향의 단위벡터를  $\vec{n}$ 로 표시하면, 유동장의 지배방정식은 다음의 Laplace 방정식이 된다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

물체의 경계면은 강체이며 유체가 침투하지 못한다는 조건으로서의 운동 역학적 경계조건은 다음과 같다.

$$(\nabla \phi) \cdot \vec{n} \Big|_{S_B} = - \vec{V}_\infty \cdot \vec{n} \Big|_{S_B} \quad (2)$$

프로펠러의 날개 뒷날에서 무한 원방으로 흘러가는 후류면은 다음과 같이 속도포텐셜의 차이는 허용하면서 후류면의 윗면과 아랫면의 속도포텐셜의 플러스차와 압력차는 없다는 조건이 만족되어야 한다. 즉 날개 뒷날에서의 부하가 0이어야 한다.

$$p^+ - p^- = 0$$

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)^+ - \left( \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)^- = 0, \quad \text{on } S_W \quad (3)$$

여기서 윗첨자 +, -는 각각 후류면의 윗면과 아랫면을 나타낸다. 후류면에서의 속도 포텐셜의 차이를 유일한 값으로 결정하기 위해서는 날개 뒷날에서의 다음의 Kutta조건(Lee, 1987)을 만족시켜야 한다.

$$|\nabla \phi|_{\text{trailing edge}} < \infty \quad (4)$$

물체를 둘러싸고 있는 무한히 멀리 떨어져 있는 경계면에서는 물체주위에서 교란된 유동의 영향은 없어야 한다는 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$\nabla \phi \rightarrow 0, \quad \text{as } S_\infty \rightarrow \infty \quad (5)$$

와류격자법에 사용되는 적분방정식은 속도 기저법에 의한 것으로, 포텐셜 기저법보다 미분 차수가 높은 방법으로 물체 경계조건을 포텐셜 기저법과는 다르게 직접적으로 식 (2)를 만족시키는 방법이다. 유도된 다양한 포텐셜 기저 적분방정식에서 속도 기저 적분방정식을 유도할 수 있다. 대표적으로 간략히 서술하면 혼합 소오스 다이폴 분포법(Mixed source and dipole distribution method), 다이폴 분포법(Dipole distribution method) 및 와류 분포법(Vortex distribution method)으로 나눌 수 있다. 전체 속도 포텐셜 기저 적분방정식을 물체표면에서 법선 방향으로 미분하면 다음의 속도 기저 적분방정식으로 된다.

본 논문에서 계산에 사용된 KPA4b 프로그램에서는 날개 캠버면 위에 이산화된 와류 및 소오스선의 격자를 분포함으로써 프로펠러 주위의 유동을 선형이론에 근거하여 표현하였으며, Greeley and Kerwin(1982)의 후연 반류 모델을 채택하여 후연 와류 반류면에 의해 프로펠러 날개면에 유기되는 속도 계산의 정도를 향상시켰다. 날개 단면의 두께는 얇다는 가정하에 날개 표면상의 분포 대신에 캠버면 위의 분포로 근사화하고 또한 문제의 선형화를 이용하여 소오스 세기는 날개 단면 분포와 비례하게 근사적으로 구하고 오직 와류 세기를 미지수로 하는 수치기법을 이용하였다. 따라서 프로펠러의 날개 두께 및 날개에 걸리는 하중 등은 날개의 캠버면이나 방출 반류면에 소오스나 와류 등의 특이점들을 적절히 분포함으로써 표현할 수 있다. 이때 질량보존의 법칙은 특이점이 놓여있는 특이면을 제외한 모든 유체영역에서 자동 만족된다. 특히 무한 원방에서의 교란 정지 조건은 교란 속도가 특이점에서 떨어진 거리에 반비례하는 특이점의 특성에 의해 자동 만족되므로, 나머지 경계조건에 의해 연결되어진 적분방정식이 얻어진다. 적분방정식은 연속 분포의 특이점을 이산된 집중 특이점의 격자로 치환하고, 적절히 선정된 제어점에서 경계조건을 만족하도록 연립방정식을 형성한 후 수치해석 방법을 적용하여 해를 구할 수 있다.

### 2.2 프로펠러 시스템의 수학적 모형화

프로펠러 기하학적 문제는 날개 캠버면 위의 어떤 지점에서 좌표를 정하기 위한 것으로, 프로펠러의 성능 해석에 적합한 프로펠러의 기준 날개에 고정된 우수 직교 좌표계를 생각한다. Fig. 1에 보인 것처럼 프로펠러의 축 중심에 x축을 위치시키고, 하류 방향을 양으로 하며 원점은 프로펠러 면으로 한다. y축은 연직 상방을 향하도록 하며 원점은 프로펠러 축상에 놓는다. z축은 나머지 두 축과 우수 좌표계를 형성하도록 정의한다. 원통 좌표계는 통상적인 방식으로 정의하여, 하류 쪽을 향하여 y축으로부터 시계방향으로의 각을  $\theta$ 라 하고 반경 좌표를 r이라 하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{z}{y} \right) \quad (6)$$

$$r = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (7)$$

프로펠러는 하류를 향할 때 반시계 방향으로 회전한다.

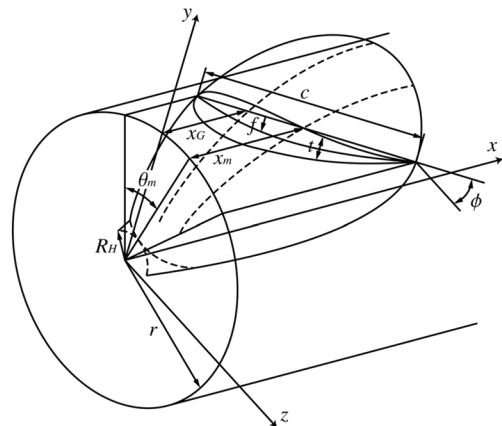


Fig. 1 Propeller geometry and cylindrical section of blade

앞에서 정의한 프로펠러 고정 직교 좌표계와 원통 좌표계를 사용하여 프로펠러 날개의 표면을 정의하도록 한다. 프로펠러 날개는 통상 반경 위치  $r$ 인 원통 면에서의 단면 자료의 집합으로 정의한다. 날개 캠버면의 3차원 공간에서의 정확한 위치 표현을 위하여 각 반경 위치에서 코드(Chord) 길이로 무차원화 된 좌표  $s$ 를 날개 앞날에서 0이고 뒷날에서 1이 되도록 도입한다. 날개 단면의 캠버 함수를  $f(s)$ 라 표현하면, 캠버 함수  $f(s)$ 는 반경  $r$ 인 원통 표면에서 코-꼬리선(Nose-tail line)과 일치하는 나선선에 수직하도록 정의된다. 반경  $r$ 에서 날개 표면의 직교 및 원통 좌표계에서의 위치는 각각의 반경 위치에서의 스큐각(Skew angle)  $\theta_m$ , 레이크(Rake) $x_C$ , 코드 길이  $c$ , 캠버 및 두께의 값으로 3차원 공간에서의 정확한 표현이 가능하다.

KPA4b 프로그램에서는 프로펠러 날개의 캠버면에 연속적으로 분포된 특이점들을 격자모양으로 집중시켜 놓은 직선 선분 요소들의 특이선으로 대체한다. 각 요소의 끝점들은 정확하게 날개 캠버면 위에 위치하게 되고, 반경 방향 및 코드 방향으로의 분할 방법은 등간격 배치를 채택하였으며 Fig. 2에 그 예를 보였다.

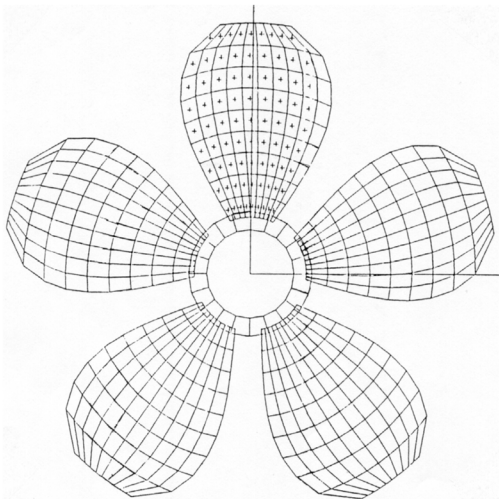


Fig. 2 Illustration of discrete singularity elements and control points on blade

프로펠러 후연 반류면은 수축과 변형이 일어나는 천이(Transition) 영역과 날개 수 개수의 집중된 날개끝 나선 와류들과 하나의 rolled-up 허브 와류로 구성되는 궁극(Ultimate) 영역의 두 부분으로 나누어진다. 후연 반류면을 나타내는 기하학적 형상은 다음의 파라미터들에 의해 정의된다. 프로펠러 날개 끝 및 허브에서 방출된 반류의 최종적인 수축반경을 나타내는  $rrp$ 와  $hrp$ , 천이 반류 영역의 길이를 나타내는  $xrp$ , 날개 끝에서의 수축각을 나타내는  $dcd$  등이다.

2.3 단독특성 계산 대상 프로펠러

최근 각종 선박 특히 컨테이너선이 대형화 고속화됨에 따라 양력면 및 양력관 이론에 근거한 고정도의 프로펠러 설계 및 성능 해석 프로그램 등이 개발되고 있지만 모형시험 및 실선 시운전 시험 결과와는 아직도 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 차이를 극복하기 위해서는 정도 높은 새로운 프로그램 개발을 위한 계속적인 연구도 필요하지만, 조선소별 주력 선종별 선형 특성에 따른

실적선 프로펠러의 데이터베이스를 바탕으로 계산 과 실험값의 상관관계 정립 또한 중요하다고 판단되어진다.

본 논문에서는 기존 실적선 프로펠러와 관련된 자료들을 수집 정리하고, 선종별로 구분 선정된 일부 프로펠러에 대해 양력면 이론에 의한 와류격자법 성능추정 프로그램인 KPA4b를 이용하여 단독특성 해석을 수행하였다. 대상 프로펠러 선정 기준 및 자료 수집 방법은 모형시험 결과 자료의 불확실성 배제 및 일관성을 중시 하였다. 컨테이너선 4척과 벌크선 4척 등 총 8개의 실적선 프로펠러를 본 연구의 대상으로 선정하였다. 컨테이너선 4척의 실적선 프로펠러의 주요 제원 및 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 Principal characteristics of container ship propellers

Container ship	Propeller		Design point	
	$(P/D)_{mean}$	$A_E/A_O$	$J_A$	$K_T^M$
2700 TEU	0.945	0.598	0.7093	0.173
1400 TEU	0.902	0.631	0.6239	0.187
650 TEU	0.763	0.672	0.5301	0.154
400 TEU	0.634	0.606	0.3877	0.161

여기서 TEU는 컨테이너선의 적재량을 나타내는 단위이고,  $(P/D)_{mean}$ 는 프로펠러의 주요 제원인 평균 피치비,  $A_E/A_O$ 는 확장면 적비(Expanded area ratio)를 표시하고 있다.  $J_A = V_A/nD$ 는 대상 선박의 프로펠러 설계점(Design point)에서의 프로펠러 전진계수를,  $K_T^M = T/\rho n^2 D^4$ 는 추력계수(Thrust coefficient)를 표시하고 있다(본 논문에서는 예인수조에서의 모형시험 결과 값을 프로펠러 설계점에서의 추력계수로 가정하고 있음).  $V_A$ 는 프로펠러의 전진속도,  $n$ 은 회전수,  $D$ 는 직경(Diameter),  $T$ 는 추력을 각각 나타낸다. 다음으로 벌크선 4척의 실적선 프로펠러의 주요 제원 및 특성은 Table 2와 같다. 여기서 K는 벌크선의 재화중량 1,000톤을 나타내는 단위이다.

Table 2 Principal characteristics of bulker carrier propellers

Bulk carrier	Propeller		Design point	
	$(P/D)_{mean}$	$A_E/A_O$	$J_A$	$K_T^M$
126K	0.716	0.439	0.4739	0.165
43.5K-a	0.696	0.481	0.4331	0.162
43.5K-b	0.694	0.450	0.4339	0.164
27K	0.680	0.474	0.4535	0.139

3. 문제점 고찰 및 제안

양력면 이론에 의한 와류격자법으로 프로펠러 단독특성 계산은, 실적선 대상 프로펠러 전부를 전 속도 범위에서 동시에 수행할 수 있도록 KPA4b 프로그램을 수정하여 사용하였다. 계산 결과를 프로펠러 초기설계 단계에서 이용하는 MAU 계열 차트에 의한 결과 및 예인수조에서 얻은 모형시험 결과와 비교한 결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

여기서 실선은 추력계수를, 일점쇄선은 10배수의 프로펠러 토크계수(Torque coefficient)  $K_Q = Q/\rho n^2 D^5$ 를 도시하고, Q는 토크를 나타내고 있다. Fig. 3과 Fig. 4로부터 와류격자법에 의한

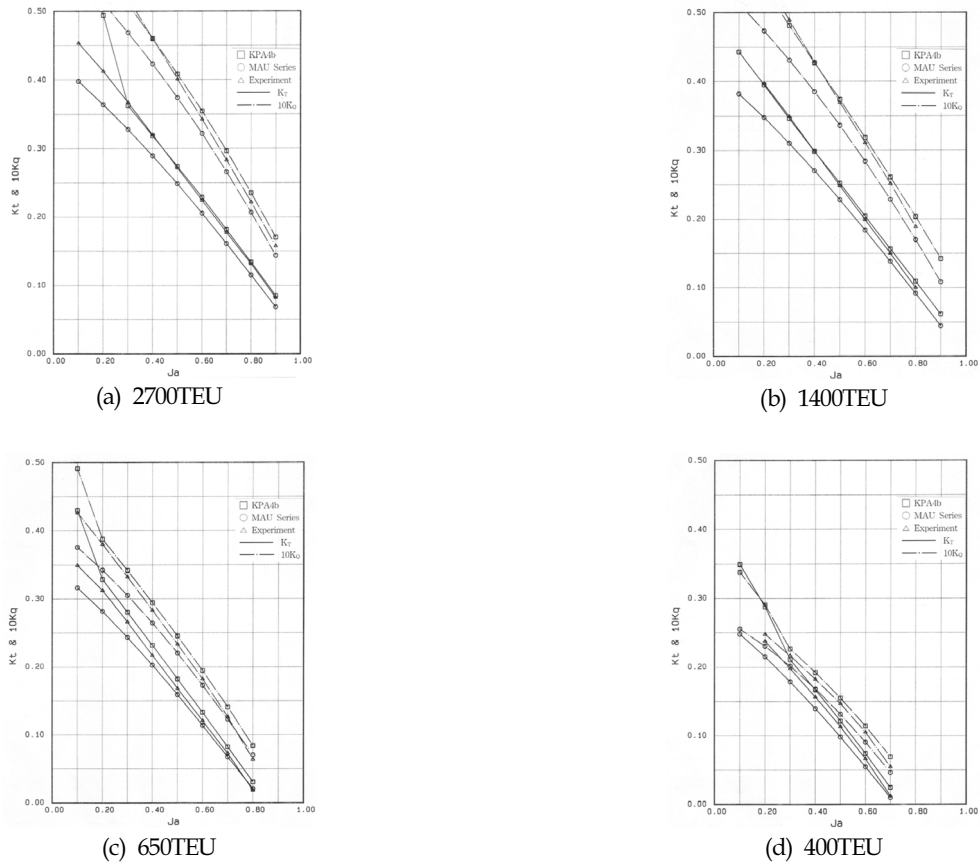


Fig. 3 P.O.W characteristics of the propeller for a container ship

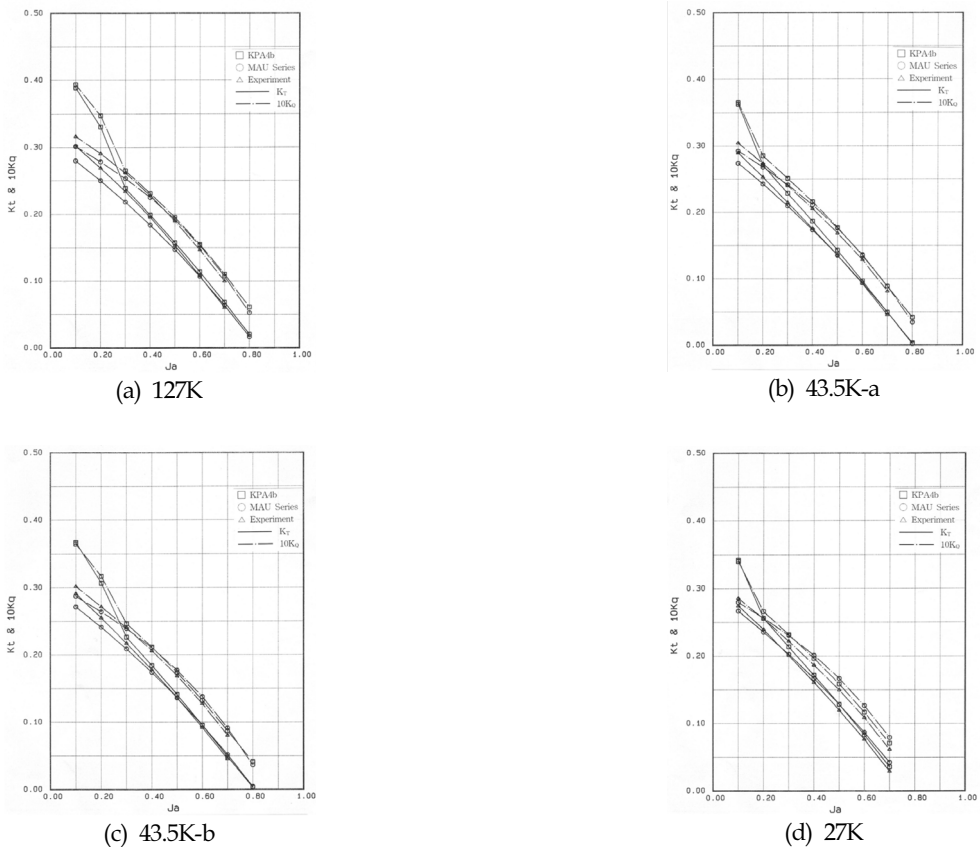


Fig. 4 P.O.W characteristics of the propeller for a bulk carrier

프로그램 KPA4b의 계산 결과는 예인수조의 모형시험 결과와 비교하여 비교적 잘 일치하고 MAU 계열 차트를 이용한 경우 보다는 추정 정도가 훨씬 높은 것을 확인할 수 있다.

전진계수 0.2 이하에서의 신뢰성이 없어 보이는 계산결과는 천이 반류 영역에서의 후연 반류의 기하학적 모형이 불완전한 상태에서의 계산 결과를 보이기 때문으로 추정 된다. 또한 대상선의 프로펠러 하중이 작은 경우, 즉 선종별 평균 피치비가 가장 작은 경우인 400TEU 컨테이너선박과 27K 벌크선박에서도 실험값과의 차이가 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이창섭 등(1990)의 연구에서는 후연 반류 모델링을 위한 파라미터 중 최종적인 수축반경 rrp의 영향이 최종 결과에 미치는 영향은 상당히 중요함을 보였으나 상대적으로 천이반류 영역의 길이 xrp의 길이는 계산 결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 추정하고 있다. 그러나 이 계산에 사용된 프로펠러의 경우, 설계점에서의 피치비가 0.889로 비교적 큰 값을 가지고 있었기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 이는 곧 낮은 전진계수 혹은 평균피치비를 갖는 프로펠러의 성능추정을 위해서는 rrp의 조정 외에도, xrp의 추가 조정도 필요로 한다는 것으로 해석할 수 있다. 더불어 후연 와류 반류에 의해 날개 위에 유기되는 속도는 그 세기와 기하학적 형상의 함수이므로, 후연 반류면의 기하학은 유기 속도 계산의 정확도에 큰 영향을 미친다는 것도 확인할 수 있었다.

근래에 모든 유동성분 및 Roll-Up 현상을 포함해 후류면의 위치를 구하는 FLAG(FLow Adapted Grid) 기법이 많은 계산 시간이 필요하기 하여도 정도 높은 계산결과를 보여주고 있다 (Pyo and Kinna, 1997). 또한 프로펠러 주위의 유동계측과 관련된 많은 모형시험 결과들도 발표되고 있다(김기섭 등, 2000; 백부근 등, 2005; 백부근 등, 2010; 서성부와 김기섭, 2010). 본 논문에서는 이러한 자료 등을 참조하여, 후연 반류를 정의하는 파라미터 중 최종적인 수축 반경비(rrp)를 기존의 0.83에서 0.87로, 천이반류 영역의 길이비(xrp)를 대상 프로펠러의 평균 피치비로 조정하고 각 대상선 프로펠러의 설계점에서의 단독특성 계산을 수행하여 보았다.

이러한 계산결과를 Table 3과 Table 4에 각각 컨테이너선박 벌크선 프로펠러를 대상으로 하여, 후연 반류 모델링 파라미터 조정 전의 계산 값  $K_T$ 와 프로펠러 설계점에서의 추력계수로 가정한

예인수조에서의 모형시험 결과  $K_T^M$ 값 등과 비교하여  $K_T^*$ 로 나타내었다.

그 결과, 대상선 프로펠러의 대부분이 실험값과의 차이가 현저히 줄어들었고, 최대 약 30% 정도의 불일치 비율 감소라는 예상보다 좋은 결과를 나타내고 있다. 그러나 여전히 매우 낮은 전진비와 이에 준하는 평균피치비의 프로펠러의 경우에는 아직도 차이가 적지 않음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 프로펠러 반경방향별 최대 캠버 분포를 포함한 피치비의 변화를 충분히 고려하지 못한 xrp 조정 방법의 제안이라고 판단되어, 후연 반류를 더욱 정밀한 수치 모형으로 표시하여야 보다 정확한 계산 값을 얻을 수 있으리라 판단된다. 그 외에 프로펠러 두께에 대한 비선형적인 영향 및 점성효과 등도 계산 값과 실험값의 차이를 있게 할 것으로 추정할 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 와류격자법에 의한 프로펠러 단독특성 추정에서의 정도 향상을 위한 연구를 수행하였다. 우선 국내에서 주로 사용하고 있는 와류격자법에 의한 프로펠러 성능추정 프로그램인 KPA4b를 사용하여, 컨테이너선 및 벌크선별 4개의 실적선 프로펠러들을 대상으로 단독특성을 계산하였다. 계산 결과는 예인수조의 모형시험 결과와 비교하여 비교적 잘 일치하고 MAU 계열 차트를 이용한 경우보다는 추정 정도가 훨씬 높았으나, 프로펠러의 하중이 작은 경우에는 실험값과의 차이가 많이 발생하는 문제점을 확인할 수 있었다. 이러한 원인은 대상 선종별 및 프로펠러 주요 제원별 하중 특성 변화에 대한 비교 검토를 통하여, 프로펠러 하중 변화에 따라 후류에서의 유동도 변화하기 때문임을 확인할 수 있었다. 이에 따라 프로펠러의 하중 변화에 따라 가장 큰 영향을 주는 평균 피치비의 값에 따라 후연 반류의 모델링 파라미터들 일부를 적절하게 변화키면서, 대상 프로펠러들의 각 설계점에서 단독특성 계산을 새로이 수행하였다. 그 결과, 실험값과의 차이가 최대 약 30%가 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 와류격자법 프로그램을 이용한 성능추정을 통하여 프로펠러 설계를 수행할 때, 프로펠러 하중분포 등을 충분히 고려할 필요가 있고 또한 후연 반류 모델링의 파라미터를 변화시키는 간단한 방법의 시도도 해 보기를 제안하고자 한다.

### 참 고 문 헌

김건도, 이창섭 (2005). “프로펠러 단독특성 향상을 위한 고차패널 법의 적용”, 대한조선학회논문집, 제42권, 제2호, pp 113-123.  
 김기섭, 김경열, 안중우 (2000). “예인수조와 캐비테이션 터널에서 프로펠러 단독특성의 실험적 상호관계 해석”, 대한조선학회 논문집, 제37권, 제1호, pp 26-39.  
 김영기, 이진태, 이창섭, 서정천 (1993). “포텐셜을 기저로 한 패널 법에 의한 프로펠러의 정상성능해석”, 대한조선학회논문집, 제 30권, 제1호, pp 73-86.  
 문일성, 김영기, 이창섭 (1996). “포텐셜을 기저로 한 패널법에 의한 프로펠러의 비정상유동해석”, 대한조선학회논문집, 제 33권, 제1호, pp 9-18.  
 백광준, 서성부, 전호환 (2000). “와류격자법에 의한 정상유동중의

**Table 3** Computation results (KT) of container ship propellers

Container ship	Computation		Design point	
	$K_T$	$K_T^*$	$J_A$	$K_T^M$
2700 TEU	0.1773	0.1751	0.7093	0.173
1400 TEU	0.1930	0.1899	0.6239	0.187
650 TEU	0.1682	0.1648	0.5301	0.154
400 TEU	0.1721	0.1678	0.3877	0.161

**Table 4** Computation results (KT) of bulker carrier propellers

Bulker carrier	Computation		Design point	
	$K_T$	$K_T^*$	$J_A$	$K_T^M$
126K	0.1687	0.1652	0.4739	0.165
43.5K-a	0.1718	0.1680	0.4331	0.162
43.5K-b	0.1702	0.1657	0.4339	0.164
27K	0.1492	0.1455	0.4535	0.139

- 상반회전 프로펠러 성능해석”, 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 36-43.
- 백광준, 서성부, 전호환 (2001). “고차경계요소법을 이용한 정상유동중의 프로펠러 해석”, 대한조선학회논문집, 제38권, 제3호, pp 31-40.
- 백부근, 김진, 박영하, 김기섭, 김경열 (2005). “캐비테이션 터널에서 PIV를 이용한 프로펠러 후류 보오텍스 유동계측 및 거동해석”, 대한조선학회논문집, 제42권, 제6호, pp 619-630.
- 백부근, 김경열, 김기섭, 이정엽, 이상준 (2010). “POD 방법을 이용한 불안정한 프로펠러 후류 해석”, 대한조선학회논문집, 제47권, 제1호, pp 20-29.
- 서성부, 김기섭 (2010). “중형 공동수조에서의 프로펠러 단독특성에 대한 위벽효과 보정 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제34권, 제5호, pp 718-724.
- 서정천, 이창섭 (1984). “MAU 프로펠러 단독특성의 수식표현”, 한국기계연구소 소보, 제11집, pp 95-101.
- 이창섭, 서성부, 이진태 (1990). “양력면 이론에 의한 프로펠러 성능해석”, 선박해양기술, 제4호, pp 75-90.
- 장현길, 안병권, 문일성, 이창섭 (2010). “인터넷 기반 선박용 프로펠러 설계 및 해석 시스템 개발”, 한국해양공학회지, 제24권, 제4호, pp 66-71.
- Greeley, D.S. and Kerwin, J.E. (1982). "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow", Trans. SNAME, Vol 90, pp 415-453.
- Kerwin, J.E. and Lee, C.S. (1978). "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory", Trans. SNAME, Vol 86, pp 218-253.
- Lee, J.T. (1987). A Potential Based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow, Ph. D. thesis, MIT, USA.
- Pyo, S.W. and Kinnas, S.A. (1997). Propeller Wake Sheet Roll-up Modeling in Three Dimensions, J. of Ship Research, Vol 41, No 2, pp 81-92.
- Suh, S.B. (2002). Analysis of a Propeller Performance by a Higher Order Boundary Element Method, Ph. D. thesis, BNU, KOREA.

---

2011년 8월 9일 원고 접수

2011년 8월 9일 심사 완료

2011년 8월 16일 게재 확정