

## 점성유동 수치해석법에 의한 선박용 추진기 단독성능 해석

김덕수\*, 김형태\*\*

Analysis of Open-Water Characteristics of Marine Propeller  
by Computational Method for Viscous Flow

Dug Soo Kim\* and Hyoung Tae Kim\*\*

### 요 약

RANS 방정식의 수치 해법을 사용해서 선박용 추진기 주위의 점성 유동을 계산함으로써 모형 프로펠러 3개(P4119, P4842, KRISO 포드 프로펠러)의 단독 성능을 해석하였다. 프로펠러 단독 성능과 날개 압력 분포 그리고 프로펠러 근방의 평균 속도 분포에 대한 본 연구의 수치 해석 결과를 실험 결과와 비교하였으며, 대체로 두 결과가 서로 잘 일치하는 것이 확인되었다. 그러나, 프로펠러 날개 앞날의 압력과 포드 프로펠러의 단독 성능에 대한 본 연구의 결과는 실험 결과와 잘 맞지 않는 것으로 나타났다.

※Keywords: RANS equations (RANS 방정식), Marine propeller (선박용 추진기), P4119, P4842, Podded propeller(포드 프로펠러), Open-water characteristics (단독 성능)

### Abstract

In this paper, the computational analysis of open-water characteristics for three model propellers(P4119, P4842 and a podded propeller of KRISO) is done by using a viscous-flow method based on Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. The results are presented for open-water performances, blade-section pressures, and circumferentially-averaged velocity profiles for the all three propeller models. Overall close agreements with available experimental data are shown. However, some discrepancies are also found in the pressure near the leading edge of the propeller blade and the open-water performance of the podded propellers.

---

접수일자: 2002년 2월 5일, 승인일자: 2002년 5월 24일

\* 학생회원, 충남대학교 선박해양공학과 대학원 박사과정 (E-mail : cfd2000@cnu.ac.kr)

\*\* 정회원, 충남대학교 선박해양공학과 교수 (E-mail : h-tkim@cnu.ac.kr)

### 1. 서언

최근 수년 동안 선박용 프로펠러 주위 점성유동의 해석을 위해 RANS 방정식을 이용한 수치해법들이 비약적인 발전을 이루어 왔으며, 22차 ITTC Propeller RANS/Panel Method Workshop (1998)에서는 이 연구 분야의 현주소와 앞으로의 가능성을 잘 보여 주었다.

본 논문에서는 먼저, 개발된 RANS 코드를 사용하여 모형 프로펠러 P4119와 P4842에 대한 수치해석 결과를 단독 성능, 날개 표면 압력, 프로펠러 상류와 하류에서의 유속 등에 대한 Jessup(1989)의 실험 결과와 비교, 검증하였다. 또, 최근 새로운 선박용 추진 장치로 각광받고 있는 포드형 추진기(Karafiath/Lyons, 1999)에 적용할 수 있도록 RANS 코드를 수정하여 KRISO에서 예인수조시험을 수행한 tractor와 pusher 형식의 포드 추진기(Van, 2000)에 대한 수치해석을 수행하고, 이들의 단독 성능을 실험과 비교하였다. 수치해석은 스트럿은 제외하고 포드와 프로펠러만을 고려하여 단독 상태에 대해서 수행하였다. 또한, 본 논문은 김덕수(2002), 김덕수/김형태(2001), 김형태등(2000)의 연구 내용을 기반으로 한 것임을 밝혀둔다.

### 2. 해석방법

#### 2.1 수치 해법

본 연구에 사용한 수치해법(Kim/Stern, 1990과 Kim, 1993)에서는 프로펠러와 함께 회전하는 원통 좌표에서 기술된 비 압축성 유동에 대한 지배 방정식과 경계조건을 일반 곡선 좌표로 좌표변환하고, 변환된 방정식을 프로펠러 주위 점성 유동의 계산을 위해 생성한 격자에 대하여 유한해석법(Finite Analytic Method)을 사용해서 이산화한후, 얻어진 대수방정식의 해를 상중대각행렬 알고리즘을 사용하여 반복 계산함으로써 속도와 압력에 대한 수치해를 구한다. 비 교차 격자계를 사용하였고, 속도와 압력의 연성에는 PISO 알고리즘에 기초한 predictor-corrector 기법을 사용하였으며, 난류 모형으로는 Baldwin-Lomax 모형을 채택하였다.

#### 2.2 계산 영역 및 경계 조건

본 연구에서는 선박용 추진기가 균일 유동 중에서 작동하는 단독 상태를 해석하므로 프로펠러와 함께 각속도  $\Omega = (-\omega, 0, 0)$ 로 회전하는 원통 좌표  $(x, r, \theta)$ 에서 유동은 정상(steady)이고 날개 간격마다 주기적으로 반복된다고 가정할 수 있다.

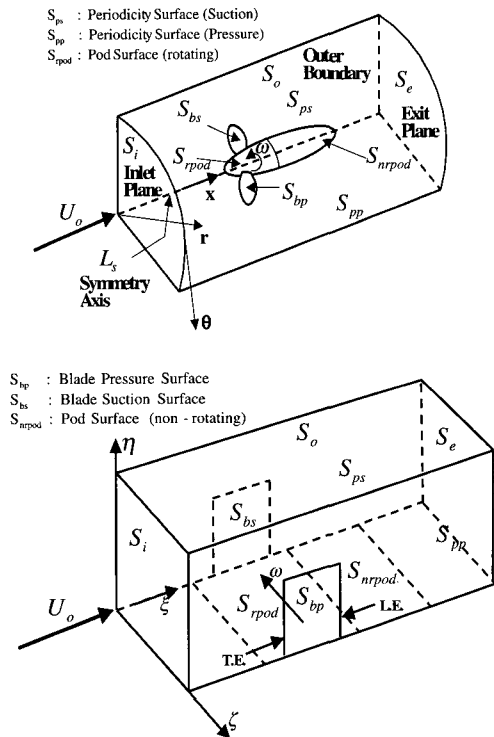
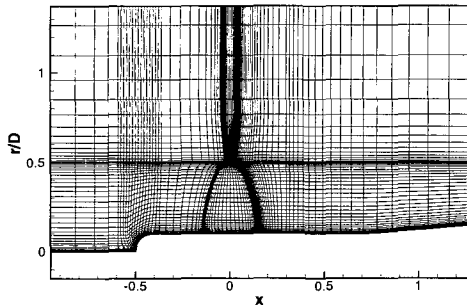


Fig. 1. Coordinate system and solution domain for podded propellers

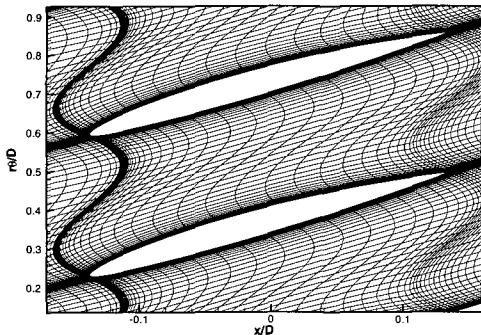
따라서, Fig. 1과 같이 날개와 날개 사이의 한 유동 영역만을 해석하였으며, 입구  $S_i$ 에는 균일 유동 조건을 적용하고, 포드(또는 허브 및 축)의 표면  $S_{rpod}$ ,  $S_{nrpod}$ 와 날개 표면  $S_{bs}$ ,  $S_{bp}$ 에는 비활(no-slip) 조건을 적용하였다. 날개 회전 방향의 경계에는 속도와 압력 등이 날개 간격을 주기로 반복된다는 주기(periodicity) 조건을 적용하였으며, 바깥경계  $S_o$ 에는  $U=1$ ,  $W=\omega r$ ,  $\partial p/\partial n=0$ 를 적용하고, 반경 방향 속도 성분  $V$ 는 연속 방정

식을 만족하도록 결정하였다. 포드(또는 허브) 상류와 하류의 회전축  $L_s$ 에는 반경 방향과 회전 방향 속도가 영 ( $V=W=0$ )이고 축 방향 속도와 압력의 반경 방향 기울기가 영 ( $\partial U/\partial r = \partial p/\partial r = 0$ )인 조건을 적용하였으며, 출구에는 속도와 압력의 기울기가 영이라는 조건을 적용하였다.

2.3 격자 생성



(a) x-r/D plane grid



(b) Blade-to-blade grid

Fig. 2. Plane view of grid system

계산 영역의 입구는 P4119와 P4842 경우에 공히 프로펠러 면(Propeller Plane)으로부터 프로펠러 직경의 3배만큼 상류 위치에 정하였고, 바깥 경계는 프로펠러 축으로부터 반경 방향으로 직경의 2배 떨어진 위치로 하였으며, 출구는 날개 기준선으로부터 직경의 4배 떨어진 하류 위치에 정하였다. 포드 프로펠러의 경우에는 포드 머리(nose)로부터 프로펠러 직경의 약 2.6배 상류에

입구를 정하였으며, 포드 꼬리(tail)로부터 3.5배 하류에 출구를 정하였다.

본 논문에서는 프로펠러의 허브와 포드 머리와 프로펠러 날개 부근, 특히 날개 앞날 부근의 격자의 질을 좋게 하기 위하여 transfinite 보간법에 의한 대수적 격자 생성법과 타원형 격자 생성법을 조합한 복합형(hybrid) 격자 생성법을 사용하였다. 본 연구의 수치해석을 위해서 생성된 격자를 살펴 보면 프로펠러 P4119와 P4842는 121×51×49 개의 격자 수를 가지며 포드 프로펠러는 포드의 꼬리 부분에서 하류 방향으로 20개의 격자를 더 분포하여 141×51×49 개이다.

3. 해석결과

3.1 해석 대상

본 연구에서는 모형 프로펠러 P4119와 P4842 그리고 KRISO 예인수조에서 모형시험을 수행한 포드 프로펠러에 대해 수치해석을 수행하였다. 후자의 경우에는 스트럿을 제외하고 포드와 프로펠러만을 고려하여 해석하였으며, 해석 결과를 바탕으로 tractor와 pusher 형식의 단독 특성을 연구하였다.

프로펠러 P4119는 직경이 12인치, 날개는 3개이고, 스쿠와 레이크가 모두 영인 단순한 기하학적 형상을 가지고 있으며, 설계 전진비는 0.833, 추력계수는 0.154 이다. 프로펠러 P4842는 현재 많이 사용되고 있는 선박용 프로펠러 형상을 가지고 있으며, 큰 허브 직경과 비 선형적인 스쿠 분포는 가변피치 프로펠러(OPP)의 전형적인 특징을 보여준다. 한편, 포드 프로펠러는 KRISO에서 설계한 고속선 프로펠러(KP593)를 채용하고 있다. 이들 프로펠러의 기하학적 특성은 Table 1에 정리하였다.

3.2 프로펠러 P4119 해석결과

수치해석은 P4119에 대한 실험 연구(Jessup, 1989)와 같은 조건을 선택하여, 전진비  $J=0.5, 0.7, 0.833, 0.9, 1.1$  그리고 실험 레이놀즈 수  $Re = 7.67 \times 10^5$ 에서 수행했으며, 레이놀즈 수는 균일 유동속도, 프로펠러 직경, 유체 점성 계수를

Table 1. Geometry of propellers

Propeller Name	P4119	P4842	KP593
Diameter (m)	0.305	0.3717	0.225
No. of blades	3	5	4
Rotation(Looking upstream)	Right hand	Right hand	Right hand
Hub-diameter ratio	0.2	0.323	0.293
Section thickness form	NACA66 (DTRC modified)	NACA66 (DTRC modified)	NACA66 (DTRC modified)
Section meanline form	NACA a=0.8	NACA a=0.8	NACA a=0.8
Skew (°)	0.0	25.42	31.47
Geometric rake	0.0	0.00684	0.0
P/D at 0.7R	1.084	1.488	1.6006
Design advance coefficient	0.833	0.905	about 1.05
Expand area ratio	0.6	0.725	0.68

사용하여 정의하였다. 실험에서는 날개에 천이영역이 존재할 수 있으나, 수치해석에서는 날개 전체 유동을 난류로 가정하였다.

Fig. 3은 설계 전진비 계수 0.833에 대한 추력 및 토크 계수의 수렴 과정을 보여준다. 2000번 정도면 수렴하는 것으로 판단되어, 이후 단독성능 계산에서는 반복계산 2000번으로 제한하였으며, 계산 시간은 인텔 펜티엄-3에서 약 10시간 소요되었다.

Fig. 4에는 단독성능 곡선을 도시하였고, 구체적 수치는 Table 2에 제시하였다. 본 연구의 수치

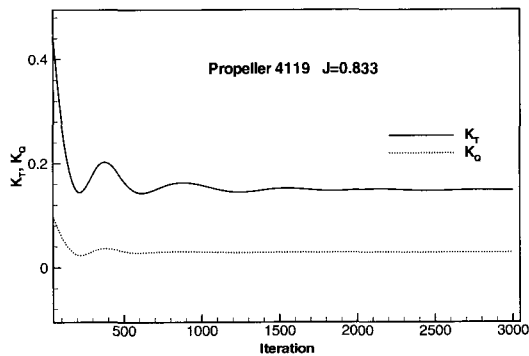


Fig. 3. Convergence of performance for P4119

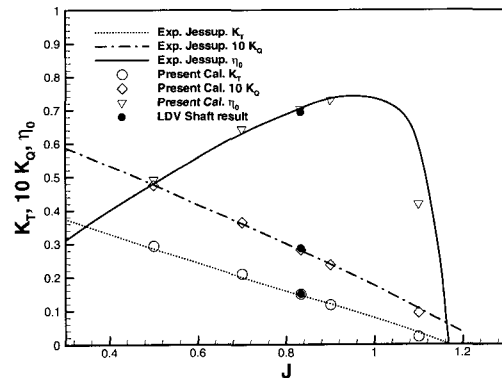


Fig. 4. Open water test result of P4119

Table 2. Comparison of performance (P4119)

J	KT		10KQ	
	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
0.5	0.285	0.2937	0.477	0.4751
0.7	0.200	0.2102	0.360	0.3638
0.833	0.146	0.1496	0.280	0.2821
0.9	0.120	0.1178	0.239	0.2369
1.1	0.034	0.0226	0.106	0.0946

해석을 통해 얻어진 프로펠러 추력 및 토크 계수는 실험과 대체로 잘 일치하나, 전진비 1.1에서 프로펠러의 추력과 토크 계수 그리고 단독 효율이 조금 낮게 추정된 것을 볼 수 있다.

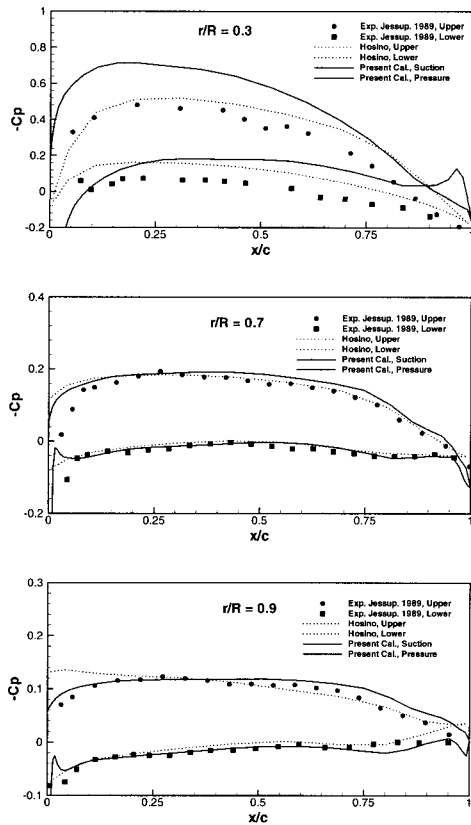


Fig. 5. Blade section pressure distribution of P4119(J=0.833)

Fig. 5는 설계 전진비(J=0.833)에서 계산된 날개 단면의 압력 분포를 실험에서 측정된 속도로부터 추정된 값과 비교하여 보여준다. 단면 r/R=0.3에서는 계산이 실험과 큰 차이를 보이며, 그 원인은 파악하지 못하였다. 단면 r/R= 0.7, 0.9에서 계산 결과는 실험과 근사하나, 앞날 부근 압력면의 압력이 매끄럽지 못하며, 실험과 차이가 커지는 경향을 보이는데, 이는 날개 앞날 부근 격자의 해상도 및 직교성이 나쁘기 때문으로 생각된다.

Fig. 6은 프로펠러 근방의 전후방에서 회전 방

향으로 평균한 속도 분포를 보여준다. 프로펠러 주위 유동의 특성, 예를 들면, 축 방향 속도성분의 가속, 프로펠러 부근의 유선 수축에 따른 반경방향 속도성분의 발달, 프로펠러 회전방향 속도성분의 발달 그리고 프로펠러 전후 압력차 등을 잘 나타내고 있다. 그러나, 본 연구의 해석 결과는 실험과 약간의 정량적 차이를 보이며, 이러한 차이는 주로 불완전한 수치 격자와 난류 모형의 사용과 같은 수치 해법의 부정확성 때문인 것으로 생각된다. 또, 회전방향 속도성분과 함께 순환 ( $\Gamma/2\pi R U_0 = rV_\theta/nRU_0$ )을 나타냈는데, 허브 근처에서 회전방향 속도성분의 차이에 비해 순환이 실험과 비교적 잘 맞는 것처럼 보이는 것은, 회전방향 속도성분에 반경방향 거리를 곱한 것과 순환 상대적 크기가 작기 때문이다.

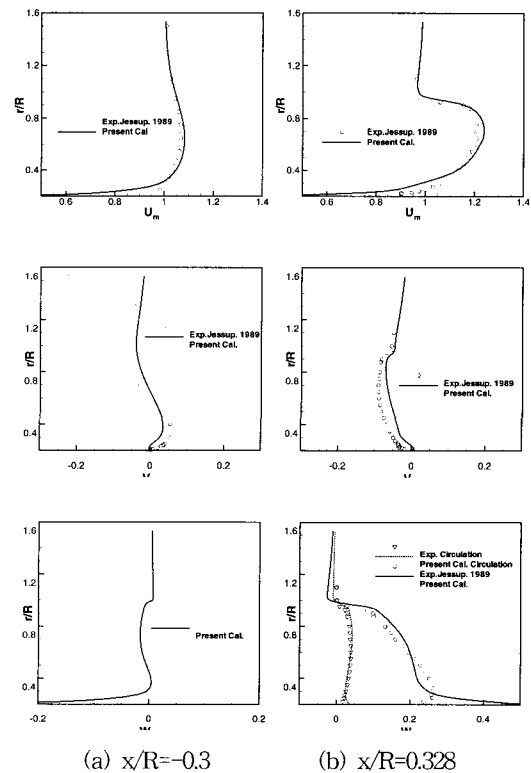


Fig. 6. Circumferentially-averaged velocity profiles of P4119(J=0.833)

3.3 프로펠러 P4842 수치해석 결과

수치 해석은 전진비  $J=0.5, 0.7, 0.905, 1.1, 1.3$  그리고 레이놀즈 수  $R_e=6.45 \times 10^5$ 에서 수행하였다. 또, 유일한 실험 결과인 프로펠러 하류의 축 방향, 반경 방향, 회전 방향 속도에 대한 비교를 위해서 전진비 0.886에 대한 계산도 수행하였다.

Fig. 7에는 여러 전진비에서 수치 해석을 통해 추정된 단독 성능을 실험 결과와 함께 도시하였다. 추력 계수는 실험과 잘 맞고 있으나, 토크 계수가 약간 낮게 추정되었고, 결국 단독 효율은 좀 높게 추정된 것을 볼 수 있다. 계산과 실험의 단독 성능에 대한 정확한 수치는 Table 3에 제시하였다.

Fig. 8은 전진비가 0.886 일 때, 프로펠러 후방 위치( $x/R=0.334$ )에서 회전방향 평균 속도를 보여준다. 계산된 축 방향 속도는 대체로 실험과 근사

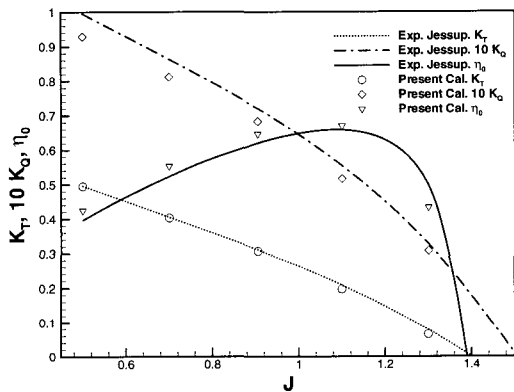


Fig. 7. Open-water test result of P4842

Table 3. Comparison of performance (P4842)

J	KT		10KQ	
	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.
0.5	0.496	0.4949	0.995	0.9248
0.7	0.405	0.4028	0.863	0.8116
0.905	0.310	0.3063	0.720	0.6830
1.1	0.208	0.1973	0.554	0.5159
1.3	0.078	0.0642	0.326	0.3072

하지만 허브 근처에서 차이가 크고, 반경방향 속도는 전반적으로 작으며, 회전방향 속도는 0.6R 이하 반경에서 국부적으로 작게 추정되었다. 회전방향 속도로부터 추정된 순환(circulation) 분포는 계산과 실험 결과가 비교적 근사하게 나타났다.

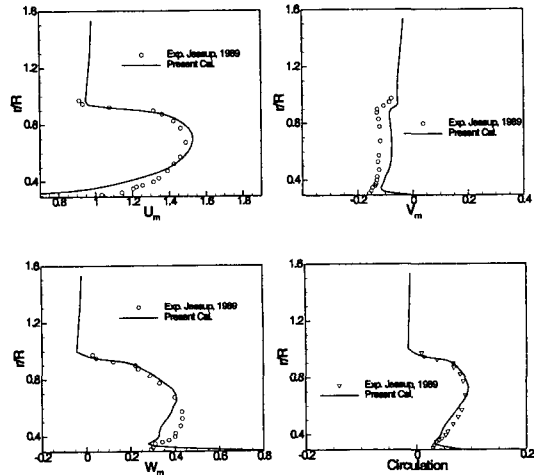


Fig. 8. Circumferentially-averaged velocity profiles of P4842( $J=0.886, x/R=0.334$ )

3.4 포드 프로펠러 수치해석 결과

포드형 전동 추진기에 대한 수치 해석의 대상은 최근, KRISO 예인수조에서 단독 시험을 수행한 모형 프로펠러(KP593)로서, 프로펠러의 기하학적 특성은 Table 1에 요약되어 있다.

수치 해석은 전진비 0.7, 0.85, 1.0, 1.15, 1.25, 그리고  $R_e=6.77 \times 10^5 \sim 7.42 \times 10^5$ 에서 수행하였으며, Fig. 9는 전진비 1.25인 tractor에 대한 추진계수의 수렴 과정을 보여준다. 날개와 포드에 작용하는 힘에 대한 수렴을 따로 표시하였는데, 포드 항력이 날개 추력에 비해 변화가 크고 수렴이 느리게 나타났다.

Fig. 10은 tractor와 pusher에 대한 단독 성능 추정 결과를 KRISO의 실험 결과와 비교한 것이다. 그러나, 본 수치 해석은 스트럿이 없는 상태에 대해 수행된 반면에, 실험은 스트럿이 부착된 상태로 수행되었고, 스트럿이 프로펠러 성능에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있기 때문에 직접 비교는 불가능하다. 또, KRISO 예인수조시험에서 스

트러트와 시험 장비에 의한 자유수면의 교란이 프로펠러 단독성능에 상당한 영향을 주었을 가능성도 배제할 수 없다.

계산에서는 tractor와 pusher의 추력 계수가 거의 같게 추정되었으나, 실험에서는 전진비가 1.05보다 작은 경우는 tractor의 추력 계수가 크고, 전진비가 1.05보다 큰 경우는 pusher의 추력 계수가 크게 나타났다. Tractor의 토크 계수는 pusher보다 작은 값으로 계산되었으나, 실험에서는 전진비에 따라서 토크 계수의 우위가 달라지며, 그 차이가 계산보다 작게 나타났다. 결국, 계산에서는 tractor의 단독 효율이 pusher보다 항상 높게 추정되었으나, 실험에서는 전진비 계수가 1.1보다

작은 경우에만 tractor의 효율이 pusher보다 높게 나타났다.

Fig. 11에는 포드와 스트러트에 작용하는 힘을 제외한 프로펠러 날개만의 추력과 토크를 비교해 보았다. 또한, 동일한 프로펠러를 포드 대신 shaft에 장착하고 수행한 단독시험 결과도 함께 비교하였다.

날개 추력 계수는 pusher가 tractor보다 조금 크게 계산되었으며, pusher 날개에 입사하는 축방향 유속이 tractor보다 작아서, 유효전진비가 감소할 것을 고려하면 두 경우의 날개 추력 계수는 좀더 근접하게 될 것이다. 그러나, 실험에서는 tractor의 날개 추력 계수가 pusher나 shaft 프로펠러보다 훨씬 크게 나타났다. Tractor와 pusher의 날개 토크 계수는 Fig. 10의 전체 유닛과 거의 동일하다. 결국, 계산에서는 tractor와 pusher의 날개 단독 효율이 거의 동일하게 추정되었지만, 실험에서는 tractor의 날개 효율이 pusher보다 상당히 높고, shaft 프로펠러는 pusher와 유사하게 나타났다.

Fig. 12는 본 수치 해석을 통해 추정된 tractor와 pusher의 전체 추력에서 포드와 날개가 기여한 부분을 분리해서 보여준다. Pusher의 경우, 유효전진비가 감소해서 tractor보다 큰 날개 추력이 발생하나, pusher 포드의 항력이 tractor보다 커서 결국 tractor와 거의 동일한 추력이 발생한

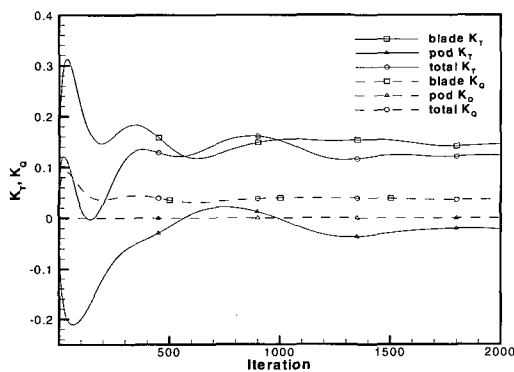


Fig. 9. Convergence of performance for podded propeller

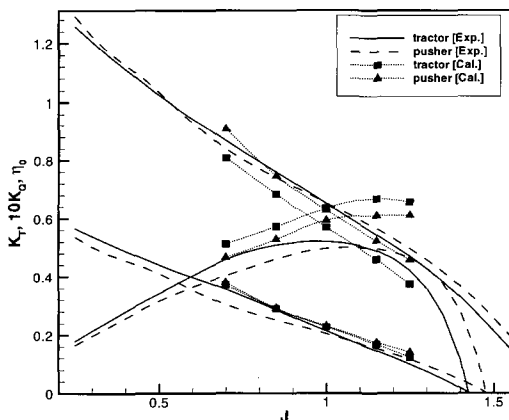


Fig. 10. Open-water performance of podded propeller units

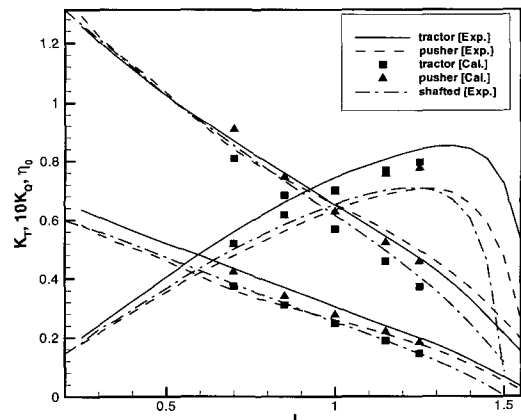


Fig. 11. Open-water performance of podded propeller blades

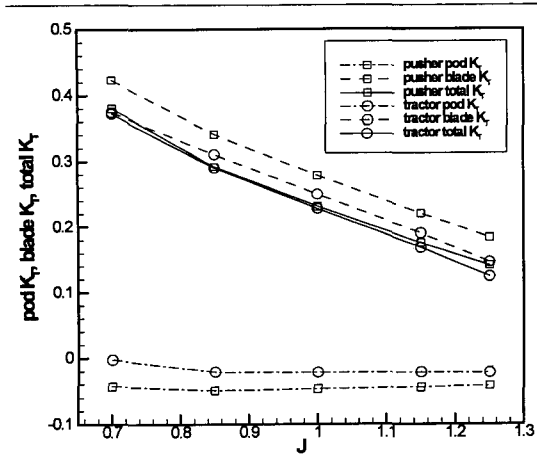


Fig. 12. Thrust components of podded propellers

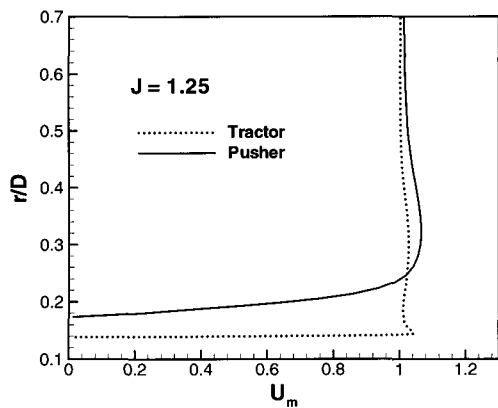
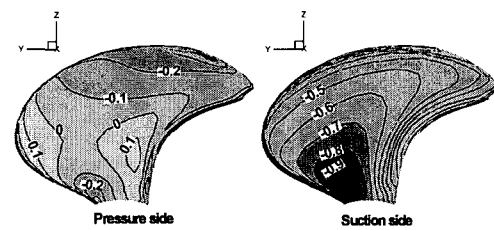


Fig. 13. Circumferentially-averaged axial velocity profiles ( $x/R=-0.292$ )

것을 알 수 있다. 결론적으로 본 수치해석 결과는 동일한 날개를 갖는 tractor와 pusher의 단독성능에 포드형상이 중요한 영향을 미친다는 것을 보여준다.

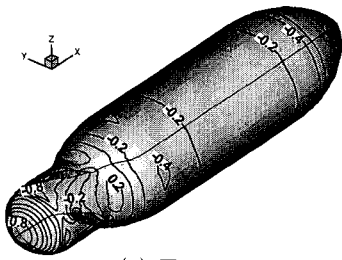
Fig. 13은 전진비 1.25일 때, 각 포드 프로펠러 날개앞날 바로 앞( $x/R=-0.292$ )에서 프로펠러에 입사하는 축 방향 속도 성분을 보여준다. Tractor에서는 포드 단면적의 증가와 표면의 종방향 곡률로 인한 국부적인 유동가속이 발생하지만, 경계층의 두께가 매우 얇아서 결과적으로 균일 유동에 가깝다. Pusher의 경우, 축 방향 속도에서는 포드

표면을 따라서 발달한 비교적 두꺼운 경계층의 형성과 프로펠러에 의한 가속 효과가 두드러진다. Tractor와 pusher에 대하여 계산된 평균 속도는 각각 1.013과 0.973이고, 이에 해당되는 유효 전진비는 1.27과 1.22가 된다. 이는 프로펠러 유기속도가 포함되어 있는 결과이지만, pusher 프로펠러가 tractor보다 실제로는 낮은 유효 전진비에서 작동하는 것을 확인하기에는 충분하다.

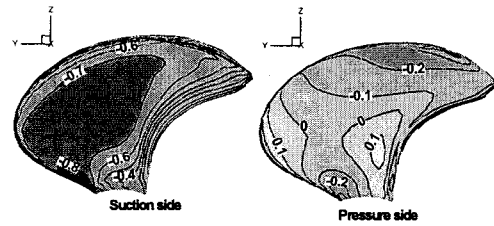


Pressure side

Suction side

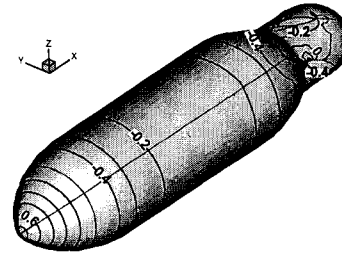


(a) Tractor



Suction side

Pressure side



(b) Pusher

Fig. 14. Surface pressure distribution for podded propellers



Fig. 14는 전진비 1.25에서 tractor와 pusher 프로펠러의 표면 압력 분포를 보여준다. 그림에 표시된 압력 계수는 균일 유동 속도로 무차원화한 것이며, 왼쪽에는 날개 흡입면, 오른쪽에는 압력면, 그 아래쪽에는 포드 표면의 압력을 나타냈다. 프로펠러 날개의 형상과 전진비가 동일함에도 불구하고 tractor와 pusher 프로펠러의 전반적인 압력 분포는 상당한 차이를 나타내며, 특히, 흡입면의 압력은 서로 큰 차이를 보인다. Tractor의 경우에는 날개와 포드의 접합부 그리고 날개 흡입면 안쪽 반경에서 낮은 압력이 발생하고, 날개 끝과 뒷날 쪽으로 가면서 압력이 점차 높아진다. 압력면의 압력은 흡입면 보다 대체로 높고 균일하며, 날개중앙하부 앞날 부근에서 압력이 높다. Pusher의 경우에는 날개 흡입면에 낮은 압력이 고르고 상당히 넓게 분포하고 날개 뒷날과 끝 부근에서 압력이 높다. 반면에 압력면의 압력 분포는 tractor와 거의 유사한 특징을 나타낸다. 이와 같은 tractor와 pusher의 날개표면압력의 차이는 날개앞날 및 날개끝 보텍스의 형성에 큰 영향을 주며, pusher에서 더 크고 강한 날개앞날 및 날개끝 보텍스가 형성될 것을 시사한다. Tractor와 pusher 포드의 표면 압력은 포드 형상과 프로펠러의 유동 가속으로 인한 압력 분포의 차이를 잘 보여주며, 이러한 압력분포의 차이는 결국 tractor와 pusher 포드의 항력 차이로 나타난다.

#### 4. 결과 및 고찰

본 연구의 수치 해석에 의한 프로펠러 P4119와 P4842의 단독성능 추정 결과는 프로펠러 P4842의 토크 계수가 조금 낮게 추정된 것을 제외하고는 대체로 실험과 잘 일치하고 있다. 이로부터, 본 연구에서 사용한 수치해석법으로 P4119와 같이 스큐와 레이크가 없는 연구용 프로펠러 뿐 아니라, 스큐와 레이크가 모두 있고 현재 선박에 실제로 사용되고 있는 프로펠러 형상인 P4842에 대한 단독성능도 정확하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

또한, 포드형 전동추진기에 대한 수치해석 결과, tractor와 pusher 추진기의 프로펠러 날개와

포드에 작용하는 추력과 토크 등, 기본적인 추진 특성을 파악하는데 유용한 결과를 얻을 수 있었지만, 해석 결과는 실험과 상당한 차이를 보이고 있다. 현재로서는 이에 대한 원인을 명쾌하게 설명할 수 없지만, 첫째, 수치 해석에 고려되지 못한 스트럿이 포드 프로펠러 단독특성에 큰 영향을 미칠 수 있고, 둘째, 자유수면의 영향이 컸던 예인수 조사형 조건과 수치해석 조건의 차이가 주된 원인이라고 생각된다. 따라서, 앞으로 격자 블록간의 상대운동을 처리하는 sliding-mesh 기법을 적용함으로써 스트럿을 포함시킨 포드 추진기에 대한 비정상 유동을 수치해석 할 필요가 있으며, 실험 자료가 있는 다른 포드 프로펠러에 대한 수치해석을 수행할 필요도 있다.

앞으로 점성유동 수치해석법을 선박용 추진기의 설계와 성능추정에 사용하기 위해서는 수치해석 결과의 정확도를 좀더 개선하고 신뢰성을 확보해야 할 것이다. 이를 위해서는 다블록 격자 생성(김정중/김형태 1999)을 통해서 격자의 질을 개선하고, 프로펠러 유동 특성에 적합한 난류모형을 사용해야하며, 다양한 격자의 사용이 용이한 유한체적법을 기반으로 한 수치 해석법의 개발이 바람직하다. 이와 함께 날개앞날 및 날개끝 보텍스와 같은 국부유동에 대한 해석결과를 프로펠러의 성능 및 효율 개선에 활용하는 방법을 연구하고, 프로펠러 캐비테이션을 해석할 수 있는 수치해석법을 연구, 개발할 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- 김덕수 2002 “점성유동 수치해법에 의한 선박용 추진기 단독성능 해석”, 석사 논문, 충남대학교.
- 김덕수, 김형태 2001 “트랙터 및 푸셔 방식의 포드 프로펠러 추진 특성에 대한 수치 해석적 연구”, 대한조선학회 2001년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 161-164.
- 김정중, 김형태 1999 “박용 프로펠러 주위의 점성유동 계산용 다중 블록 격자계”, 대한조선학회 1999년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 188-191.
- 김덕수, 김형태, 김정중 2000 “Pod형 전동 추진기 주위 점성유동 계산”, 대한조선학회 2000년도

추계 학술대회 논문집, pp. 204-207.

- 반석호 2000 "private communication"
- ITTC 1998, Proc. of 22nd ITTC Propulsion Committee Propeller RANS/Pannel Method Workshop, Grenoble, France.
- Jessup, S.D. 1989, "An Experimental Investigation of Viscous Aspects of Propeller Blade Flow," Ph.D. Thesis, The Catholic University of America.
- Karafiath G. and Lyons D. 1999, "Pod Propulsion Hydrodynamics - U.S. Navy Experience", Proc. FAST'99, pp. 119-135.
- Kim, H.T. 1990, "Numerical Calculation of the Viscous Flow Around a Rotating Marine Propeller", Proc. 2nd Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Osaka, Japan, pp. 9-22.

- Kim, H.T. and Stern, F. 1993, "Viscous Flow Around a Propeller-Shaft Configuration with Infinite-Pitch Rectangular Blades", AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 6, No. 4, pp. 434-444.



< 김 덕 수 >



< 김 형 태 >