



프로펠러-축대칭 포드의 추진 특성에 대한 수치 해석적 연구

Computational Study on Propulsive Characteristics of Propeller Axisymmetric Pod Configuration

김 덕 수 1), 김 형 태 2)

Dug-soo Kim, Hyung-tae Kim

요 약

RANS 방정식의 수치해법을 사용해서 tractor와 pusher 방식의 포드 프로펠러 주위 점성유동을 계산함으로써 포드형 전동 추진기의 추진 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에 사용한 수치해석 방법을 검증하기 위하여 최근 국내에서 모형 실험이 수행된 포드 프로펠러 형상에 대해 수치계산을 수행하고, 계산으로부터 얻어진 tractor와 pusher 방식의 포드 프로펠러에 대한 단독 성능을 실험 결과와 비교하였다. 또한, 포드에 작용하는 압력 및 프로펠러 날개 주위의 유동을 분석함으로써, 포드가 프로펠러의 추진 성능에 미치는 영향과 tractor와 pusher 추진 방식의 특성을 살펴보았다.

1. 서론

최근 들어 고기능성 저소음 추진장치로서 포드(pod)형 전동 추진기에 대한 관심이 높아지고 있다. 삼성중공업(주)은 최근에 건조한 여객선에 포드형 전동 추진장치를 실제로 적용하였으며, KRISO에서는 포드 프로펠러에 대한 모형 실험을 수행한 바 있다. 포드 프로펠러에는 프로펠러를 포드의 앞부분에 장착하는 tractor 형식과 포드 뒷부분에 장착하는 pusher 형식이 있으며, 프로펠러를 구동하는 전동 모터를 설치하기 위해 큰 직경의 포드가 사용되고, 또한 포드를 선체에 지지하기 위해 상당히 두꺼운 스트럿이 사용되기 때문에, 포드와 스트럿이 추진 장치의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. Tractor의 경우, 프로펠러에 유입하는 유속 분포는 거의 균일하나 포드와 스트럿에 의한 프로펠러 후류(slipstream) 변화가 추진 성능에 영향을 미치게 되고, pusher의 경우에는 포드의 경계층과 스트럿 반류가 프로펠러에 유입하는 유속을 변화시키고, 작용하는 항력이 추진 성능 및 효율에 직접적인 영향을 주게 되므로 프로펠러와 이들 사이의 상호작용을 해석하는 것이 매우 중요하다. 지금까지 포드형 전동 추진기의 추진특성 해석과 유체역학적 설계 기술에 관한 연구는 유럽과 미국에 의해서 이루어졌으며, 그 내용은 주로 실험을 바탕으로 한 것이었다[1,2,3,4]. 최근에는 포텐셜 유동이론을 사용한 연구[5]와 RANS 방정식의 수치해법을 사용한 수치 해석적 연구들[6,7]도 수행된 바 있으나, 하지만 국내에서는 KRISO에서 모형실험을 통한 기초연구가 수행된 것[8]과 본 저자들에게 의한 수치 해석적 연구[9]가 수행된 것이 전부로서, 이를 국내의 기술로 실용화하기 위해서는 좀더 활발한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 최근 KRISO에서 모형 실험을 수행한 tractor 형식과 pusher 형식의 포드 추진기 주위 점성 유동을 계산하고, 이를 통해 얻어진 tractor와 pusher의 추진 성능을 실험 결과와 비교하였다. 수치계산은 정상유동의 가정 하에서 스트럿은 제외하고 포드와 프로펠러만을 고려하여 단독 상태에 대해서 수행하였으며, tractor와 pusher에 대한 수치해석 결과를 바탕으로 각 추진 방식의 특성을 연구하였다.

1) 충남대학교 선박해양공학과 대학원

2) 충남대학교 선박해양공학과 (305-764 대전시 유성구 궁동 220 Tel : 042-821-6629)



2. 해석 방법

2.1 수치 해법

본 연구에 사용한 점성유동 해석법에서는 프로펠러와 함께 회전하는 원통 좌표계에서 기술된 비압축성 유동에 대한 지배 방정식과 경계조건을 일반 곡선 좌표계로 좌표변환하고, 변환된 방정식을 pod와 프로펠러 주위의 점성유동 계산을 위해 생성한 격자에 대하여 유한해석법을 사용해서 이산화한 다음, 얻어진 대수방정식의 해를 삼중대각행렬 알고리즘을 사용하여 반복 계산함으로써 속도와 압력에 대한 수치해를 구한다. 비교차 격자계를 사용하였고, 속도와 압력의 연성에는 PISO 알고리즘에 기초한 predictor-corrector 기법을 사용하였으며, 난류모형으로는 Baldwin- Lomax 모형을 채택하였다.

2.2 계산 영역 및 경계 조건

본 연구에서는 문제의 간략화를 위해 스트럿을 제외한 축대칭 회전체인 포드와 회전하는 프로펠러로 구성된 포드형 전동 추진기가 축방향 균일 유동 중에서 작동하는 단독 상태를 고려하므로 프로펠러 각속도 $\Omega = (\omega, 0, 0)$ 로 회전하는 원통좌표계 (x, r, θ) 에서 유동은 정상 상태이고 날개 회전 방향으로 유동이 날개 간격에 대하여 주기적으로 반복된다고 가정할 수 있기 때문에 날개와 날개 사이의 한 유동 영역만을 계산 영역으로 하고 회전 방향 경계면에 주기 조건을 적용하였다.

2.3 격자 생성

격자의 생성은 transfinite 보간법에 의한 대수적 방법으로 전 계산영역에 대한 수치 격자를 생성한 다음, 포드 머리와 꼬리 그리고 날개 앞날 부분에 대하여 타원형 격자 생성법을 사용해서 국부적으로 직교성이 개선된 격자를 다시 생성하여 바꾸어 끼워 넣는 방법을 사용하였다.

3. 해석 결과

3.1 해석 대상 및 계산 조건

이하에서는 모든 길이는 프로펠러 직경을 기준으로 무차원화된 값을 사용하기로 하며, 수치 계산에 사용된 포드와 프로펠러 날개의 형상은 KRISO에서 실험한 모형을 채택하였다. 포드는 길이가 1.77이고 최대 직경은 0.44이며, 전체 형상은 Fig. 1에 보인 바와 같다. Fig. 2에서는 수치 계산에 사용된 tractor 방식의 포드 추진기의 형상과 표면격자 분포를 보여주고 있고, 프로펠러의 주요특성은 Table 1에 수록되어 있다.



Fig. 1 Shape of pod

Table 1 Geometric particulars of Propeller

Diameter(m)	0.225
No. of blade	4
Rotation (Looking upstream)	Right hand
Hub-diameter ratio	0.293
Section thickness form	NACA(DTRC modified)
Section meanline	NACA a=0.8
Eff. Skew(Degree)	31.470
Rake	None

수치 계산은 전진비 0.7, 0.85, 1.0, 1.15, 1.25에 대해서 수행하였으며, 레이놀드 수는 각 전진비에 대해 6.77, 6.92, 7.09, 7.28, 7.42($\times 10^5$)을 적용하였다. 이는 프로펠러를 shaft에 달아 단독 시험을 한 경우와 같게 적용한 것이다. 계산 영역은 포드 코(nose)로부터 약 2.6 정도 상류에 입구를 정하였으며, 포드 꼬리(tail)로부터 3.5 정도 하류에 출구를 정하였다. Tractor의 경우, 축 방향 격자 점의 수가 141개로서, 이중 14개는 입구로부터 pod 코의 앞쪽, pod 코에서 날개 앞날(leading edge) 사이에는 26개, 프로펠러 날개 코드에 31개, 날개 뒷날부터 pod 꼬리(tail)까지 50개를 분포하였고, pod의 꼬리에서 출구까지 20개의 격자를 분포 시켰다. Pusher의 경우, pod 코에서 날개 앞날까지 56개, 날개 뒷날부터 pod 꼬리까지 20개를 분포하였고, 다른 영역의 격자 수는 동일하게 분포하였다. 또한, 반경 방향의 격자 수는 51개, 날개 스패에 31개를 분포하였다. 날개와 날개 사이에는 49개의 격자를 회전방향으로 분포시켰다.

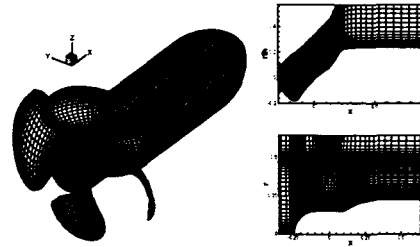


Fig. 2 Surface and field grid of podded propeller

3.2 유동 해석

전진비가 1.25일 때, tractor에 대한 수치계산으로부터 얻어진 추력 계수 K_T 와 토크 계수 K_Q 의 수렴 과정은 Fig. 3에 보인 바와 같다. 추력 및 토크에 기여하는 프로펠러 날개와 포드에 작용하는 힘의 수렴 과정이 따로 표시되어 있는데, 포드에 작용하는 항력이 날개의 추력에 비해서 변화가 크고 수렴이 느려서 전체 추력의 수렴에 큰 영향을 준다. 포드에 작용하는 토크는 거의 영이고 날개의 토크도 매우 빨리 수렴하였다.

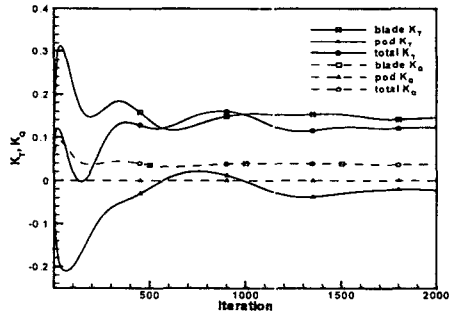


Fig. 3 Convergence history

Fig. 4는 프로펠러 날개에 작용하는 추력과 토크를 단독 시험에서 계측된 값들과 비교해 보여준다. 또, 이 그림에는 포드 대신 shaft에 동일한 프로펠러를 달고 단독시험을 수행하여 얻은 실험 결과도 함께 비교하였다. 계산 결과는 pusher 형식 프로펠러의 날개가 tractor 프로펠러 경우보다 더 큰 추력을 발생시키는 것을 보여주고 있다. 또한 Pusher 날개의 토크 계수 또한 tractor보다 더 크게 계산되었는데, pusher 포드의 경계층 때문에 날개에 유입되는 평균 유속이 감소한 것을 고려하면 계산 결과는 일반적으로 예상할 수 있는 결과이다. 계산에서 날개의 단독 효율은 전진비가 큰 경우에 tractor가 pusher보다 조금 높으나 대체로 거의 비슷한 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 4는 프로펠러의 날개에만 작용하는 추력 성분과 토크를 이용하여 나타낸 것으로 실험 조건과 동일한 스트럿과 포드에 의한 유동의 변화를 고려한다면 상당히 다른 결과를 보여 줄 것으로 예상된다. 본 계산에서는 스트럿을 포함하고 있지 않기 때문에 스트럿을 제외한 포드가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 5에서는 계산으로부터 얻어진 tractor와 pusher의 추력에 대한 포드와 날개의 기여분을 분리하여 나타내었다. 앞에서 이미 설명한 바와 같이, pusher의 경우 프로펠러에 입사하는 유속이 작아지고 프로펠러 날개의 받음각이 증가하게 되어 tractor보다 더 큰 날개 추력을 발생하고 있으나 포드의 항력 증가로 인한 추력 손실로 인하여 결과적으로 tractor와 거의 같은 추력을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

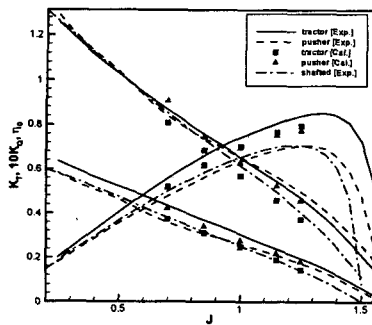


Fig. 4 Open-water performance

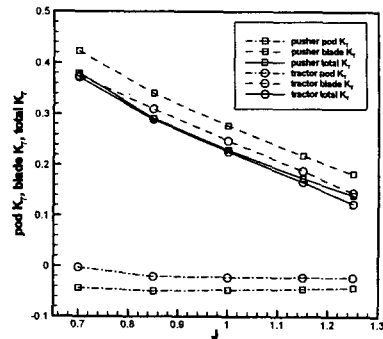
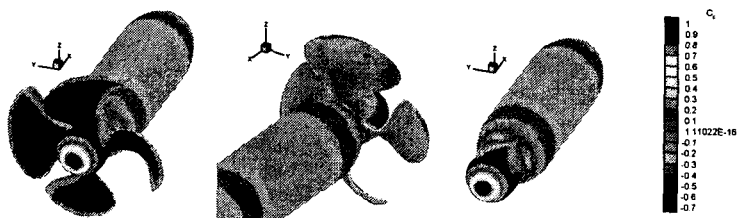


Fig. 5 Thrust component

Fig. 6은 tractor와 pusher의 프로펠러 날개 및 포드 표면의 전반적인 압력 분포를 보여주고 있다. 압력 계수는 균일 유동의 속도로 무차원화 된 것으로 pod의 코와 날개 앞날 부근에서 정체 압력이 나타나고 있다. 왼쪽부터 흡입면, 압력면, 포드의 압력을 표시 한 것으로, 날개의 압력 분포를 살펴보면 tractor의 흡입면의 경우 날개와 포드의 접합부와 앞날 부근으로부터 낮은 압력을 보이고 있다. 날개 끝으로 가면서 압력이 높아지는 것을 볼 수 있으며, 뒷날 부근에 압력 회복으로 인한 상대적으로 높은 압력을 보이고 있지만, 전반적으로 낮은 압력을 보이고 있다. 한편, 압력면은 흡입면에 비해 높은 압력 분포를 보이지만 날개 끝에서는 흡입면 보다 더 낮은 압력이 국부적으로 발생한 것을 알 수 있다. tractor와 pusher의 경우가 거의 유사한 압력 분포를 보이고 있으나, pusher의 경우 날개와 포드의 접합부 부근에 상대적으로 강한 3차원 보텍스 유동이 형성되어 tractor의 경우와는 상이한 압력 분포를 보이고 있다. 포드의 압력 분포를 살펴보면, tractor의 경우에는 날개 바로 앞에서 매우 낮은 압력을 나타내고 날개 뒤 경사면에서 압력이 높아졌다가 경사면 다음에 평행부가 시작 되는 곳에 다시 낮은 압력이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또, 포드의 꼬리 부근으로 가면서 낮은 압력을 보이다가 압력이 다시 높아져서 꼬리에서 높은 압력이 나타나고 있다. Pusher의 경우에는 날개 앞의 평행부가 끝나는 곳에서 낮은 압력을 나타내고 경사면에서 압력이 회복되다가 날개 뒤쪽의 포드 꼬리 부근에서 다시 낮은 압력을 나타내고 있으며, 꼬리 부근의 압력은 각 날개의 가속 효과로 인한 3차원 유동 특성을 보이고 있다.



(a) Surface pressure distribution for Tractor type

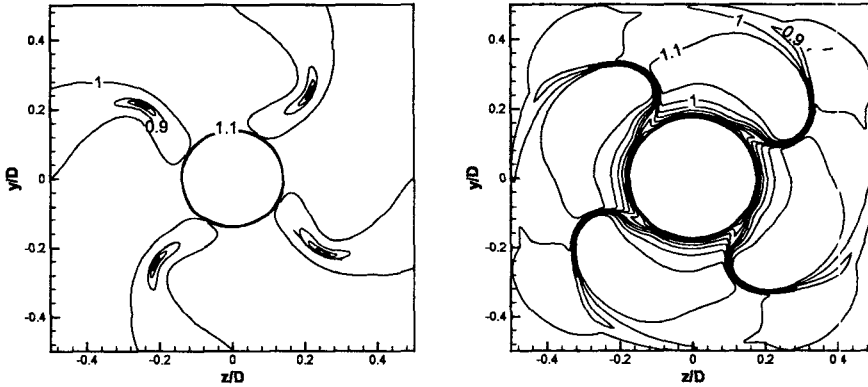


(b) Surface pressure distribution for Pusher type

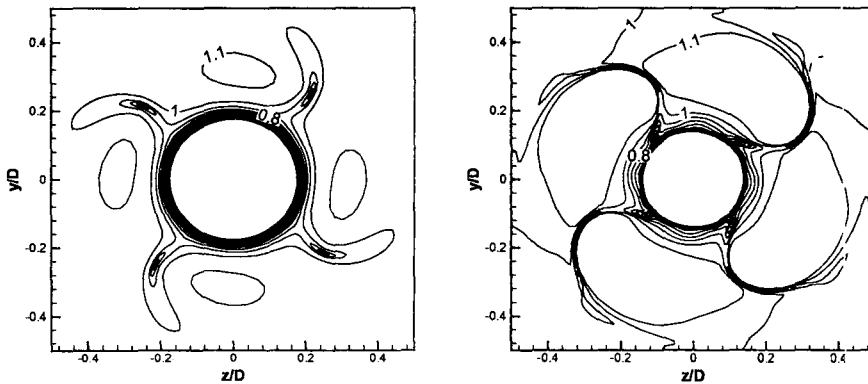
Fig. 6 Surface pressure distribution of podded propeller



Fig. 7은 tractor와 pusher에 프로펠러 제작 기준선으로부터 0.146 만큼 떨어진 횡단면에서의 축 방향 속도를 보여준다. 프로펠러 앞의 속도 분포는 포드 경계층의 형성과 날개 형상의 영향에 의한 속도 변화를 보이고 있으며 tractor와 pusher의 경계층 두께 그리고 프로펠러의 작동으로 인해 가속된 속도의 분포를 보여주고 있다. Tractor의 경우 거의 균일 유동이 유입되는 반면에, pusher의 경우는 상대적으로 두꺼워진 포드 경계층 유동이 프로펠러에 유입되는 것을 볼 수 있으며, 프로펠러의 뒷면에서의 속도 분포의 경향은 거의 유사하지만, pusher의 경우 날개에 의해 가속된 속도가 좀더 고르게 발달되는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 프로펠러가 작동하는 부근의 포드 형상의 영향 때문으로 생각되는데, tractor의 경우에는 프로펠러 뒤쪽에서 포드의 직경이 늘어나는 반면에, pusher의 경우는 프로펠러 뒤쪽에서 직경이 줄어들어 포드 꼬리를 형성하며, 따라서 날개에 의한 가속 효과로서 달라진 것으로 판단된다.



(a) $J=1.25$, $x = -0.146, 0.146$ from generator line, Tractor type



(b) $J=1.25$, $x = -0.146, 0.146$ from generator line, Pusher type

Fig. 7 Axial velocity contour



4. 결론

RANS 방정식의 수치해법에 기초하여 개발된 프로펠러 유동 해석법을 사용해서, KRISO의 예인 수조에서 모형시험을 수행한 포드형 전동 추진기에 대하여 점성유동 계산을 수행하고, 수치해석 결과를 바탕으로 tractor와 pusher에 대한 단독 성능을 실험 결과와 비교하였으며, 포드와 프로펠러 주위의 기본적인 유동과 압력 분포를 확인하였다.

본 연구의 수치해석 결과, tractor와 pusher 추진기의 프로펠러 날개와 포드에 작용하는 추력과 토크 등, 포드형 전동 추진기의 기본적인 추진 특성을 파악하는데 유용한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 본 계산에는 실험과 달리 스트럿이 포함되어 있지 않기 때문에 포드 프로펠러의 추진 성능을 직접 적으로 비교하는데 어려움이 있었다. 또, 현재로서는 실험 자료가 없기 때문에 국부 유동이나 압력 분포를 비교하지는 못하였다. 앞으로 multiblock, sliding mesh 기법 등을 적용하여 스트럿을 포함한 포드 추진기에 대한 비정상 유동해석이 가능하도록 수치해법을 확장할 필요가 있으며, 이와 함께 개발된 수치해법을 검증하는데 사용할 수 있는 실험 자료를 확보하기 위한 연구도 있어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] K.J. Minsaas and E. Lehn, "Hydrodynamical Characteristics of Rotatable Thrusters", NSFI Report R-69.78, 1978.
- [2] D.A. Rains, D.J. Vanlandingham, H.C. Schlappi, C.C. Hsiung and K.L. Kirkman, "Hydrodynamics of Podded Ship Propulsion", Journal of Hydronautics, Vol. 14, pp. 18-24, 1981.
- [3] R. Kurimo, A.V. Poustosiny and E.N. Syrkin, "Azipod Propulsion for Passenger Cruisers: Details of the Hydrodynamic Development and Experience on the Propeller Design for "Fantasy"-Class Cruise Liners", Nav'97, Sorrento, 1997.
- [4] G. Karafiath and D. Lyons, "Pod Propulsion Hydro- dynamics-U.S. Navy Experience", Proc. FAST'99, pp. 119-135, 1999.
- [5] H. Ghassemi and A. Allievi, "A Computational Method for the Analysis of Fluid Flow and Hydrodynamic Performance of Conventional and Podded Propulsion Systems", Oceanic Engineering International, Vol. 3, No. 1, pp. 101-115, 1999.
- [6] R. Korprus, et al., "Hydrodynamic Design of Integrated Propulsor/Stern Concepts by Reynolds-Averaged Navier-Stokes Techniques, Proc. Practical Design of Ships and Mobile Units, Elsevier Science, pp. 663-669, 1998.
- [7] A. Sanchez-Caja, P. Rautaheimo, E. Salminen and T. Siikonen, "Computation of the Incompressible Viscous Flow around a Tractor Thruster Using a Sliding-Mesh Technique", Proc. 7th Int'l Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, France, pp. 3.2-1-3.2-12, 1999.
- [8] 반석호, "private communication"
- [9] 김형태, 김덕수, 김정중, "Pod형 전동 추진기 주위 점성유동 계산", 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 204-207, 2000.