

수중 프로펠러의 유동특성에 관한 수치적 연구 Numerical Study of Flow Characteristics of Marine Propeller

*김용문¹⁾, 장진호²⁾, 박원규³⁾

Yong-Moon Kim, Jin-Ho Jang, Warn-Gyu Park

Abstract

The purpose of this paper is to develop the CFD code to consider the viscous flow features of the marine propeller. The flow of the marine propeller has been numerically analyzed by using three dimensional viscous incompressible Navier-Stokes equation. The model used in this study is Screw B with 4 blades whose pitch ratio is 1 in Ka-4-55 screw series. The result of the analysis was compared with panel method.

1. 서론

패널법[1,2]은 날개를 여러개의 패널로 나누어 포텐셜함수로 그 유동을 해석하는 방법으로 수중 프로펠러 주위의 유동해석에 있어서 지금까지 널리 적용되어 우수한 성능예측 결과를 보였다. 하지만 패널법은 유동해석에 있어 유체의 점성을 전혀 고려하지 않아 물리적으로 정확한 예측이 어렵고, 최근에는 수중 추진 장치가 매우 복잡한 3차원 점성유동의 특성을 포함하고 있으며 이에 대한 보다 정도 높은 해석이 요구됨으로써 그 실용성이 떨어지고 있다. 따라서 점성을 고려한 프로펠러 주위의 유동해석을 위한 코드개발이 필요하다.

본 연구에서는 Ka-4-55 Screw series에서 pitch ratio가 1인 Screw B를 모델로 하여 프로펠러 전 영역에 대해서 점성유동해석을 수행하였다.

2. 지배방정식 및 수치해석방법

2.1 지배방정식

3차원 비정상상태 비압축성 점성 유동의 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_v) = 0 \quad (1)$$

여기서, \bar{q} 는 유동벡터, \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} 는 대류항이며, \bar{E}_v , \bar{F}_v , \bar{G}_v 는 점성항을 의미한다. 식 (1)의 해를 구하기 위해 반복 시간행진 방법(Iterative Time Marching)[3,4] 사용하였다. 우선, 운동량 방정식만을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분방정식이므로 아래와 같이 시간행진 방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용한 후 국부적 선형화를 시키면 다음과 같은 식을 얻는다.

1) 부산대학교 기계공학과 대학원 (609-735 부산시 금정구 장전동 산30 Tel : 051-510-3064)

2) 부산대학교 기계공학과 대학원 (609-735 부산시 금정구 장전동 산30 Tel : 051-510-3064)

3) 부산대학교 기계공학과 (609-735 부산시 금정구 장전동 산30 Tel : 051-510-2457)



$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (2)$$

여기서 ω 는 완화계수(relaxation factor)이고 \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} 는 Jacobian 행렬로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_v); \quad \bar{B} = \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_v); \\ \bar{C} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_v) \end{aligned} \quad (3)$$

그리고, 여기서 $\bar{R}^{n+1,k}$ 는 잔류벡터라 불리는 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} &= -\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) - \\ &(\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k}) + \\ &(\delta_\xi \bar{E}_v^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}_v^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{E}_v^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

연속 방정식은 비압축성 유동해석의 효율적인 수행을 위해 MAC (Marker-and-Cell) 방법 [5]의 개념을 이용하면,

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} \equiv \Delta p = -\beta (\nabla \cdot V) \quad (5)$$

여기서 β 는 완화계수를 의미하며 난류 유동장 해석을 위한 Baldwin-Lomax 난류모델[6]이 사용되었다.

2.2 격자계

본 연구에 사용된 모델의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 수중 프로펠러 주위의 유동해석을 위한 격자는 프로펠러(105×35×68) 4개와 팁(81×5×44) 4개로 구성되어 있고 Fig. 2와 같다

3. 결과 및 고찰

유동해석은 관성좌표계(Inertial coordination system)를 사용하였다.

Fig. 3은 프로펠러의 끝에서의 속도분포를 나타낸 것인데, 각 블록간의 경계면에서 보간이 잘 되는 것을 볼 수 있으며, 속도벡터가 팁을 원활히

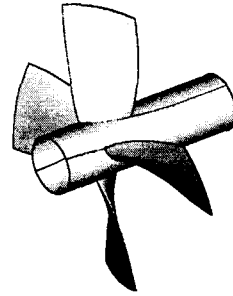
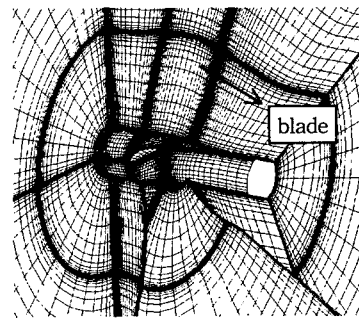
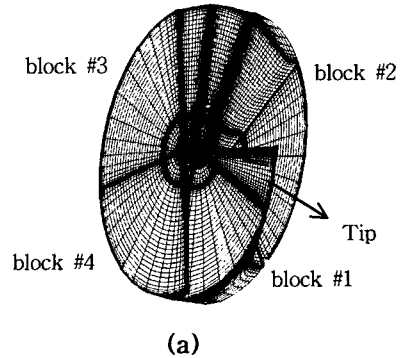


Fig. 1 Configuration



(b)
Fig. 2 Grid system

통과함으로써 팁부분과의 보간이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 r/R (반경비)=0.38되는 위치에서의 프로펠러 단면에서의 속도 분포를, (b)는 압력분포를 보여주고 있으며 (c)는 단면의 leading edge와 trailing edge부근에서의 유선의 형태를 보여주

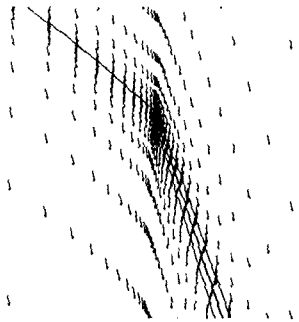
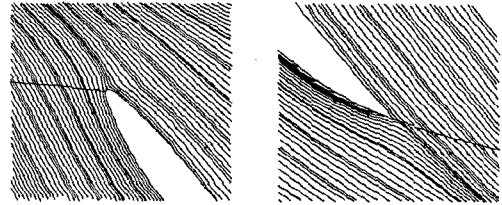


Fig. 3 Velocity distribution at tip

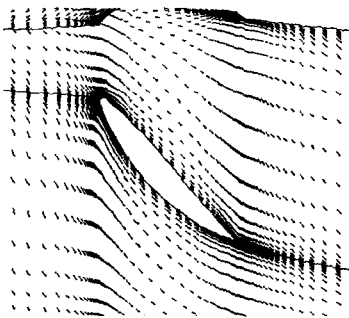
고 있다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6에서는 반경비가 각각 0.6, 0.82인 곳의 속도, 압력분포 그리고 유선의 형태를 보여주고 있다.



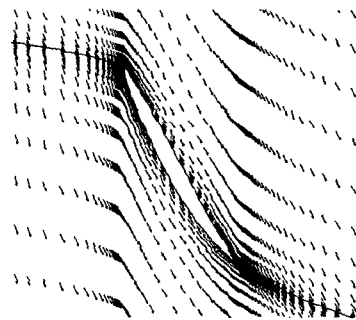
(c) Streamline

Fig. 4 Velocity, pressure contour, and streamline at $r/R=0.38$

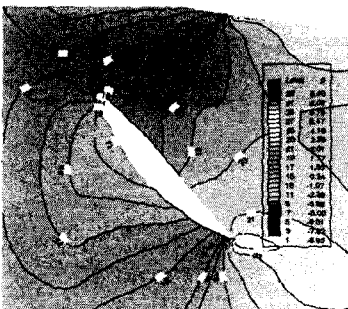
Fig. 5에서는 받음각이 커짐에 따라 leading edge의 suction side에서 유동의 박리가 생기고 압력이 급격히 감소하는 것을 볼수 있고, trailing edge에서도 vortex가 생기는 것을 관찰할 수 있다.



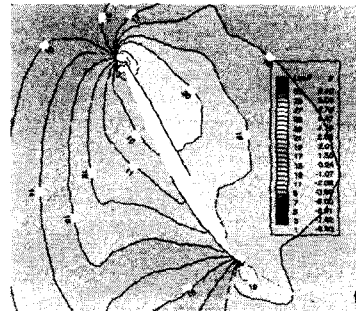
(a) Velocity



(a) Velocity

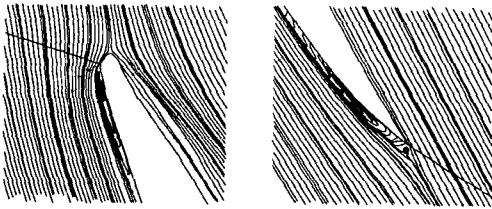


(b) Pressure contour

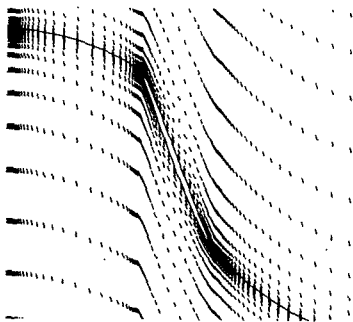


(b) Pressure contour

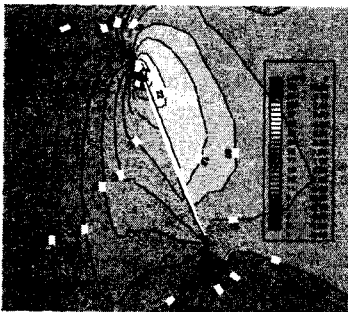
Fig. 5 Velocity, pressure contour, and streamline at $r/R=0.6$



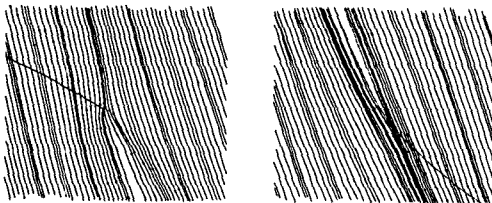
(c) Streamline
Fig. 5 Continued.



(a) Velocity



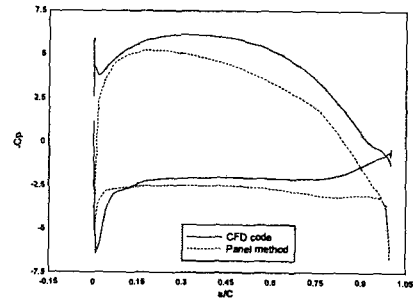
(b) Pressure contour



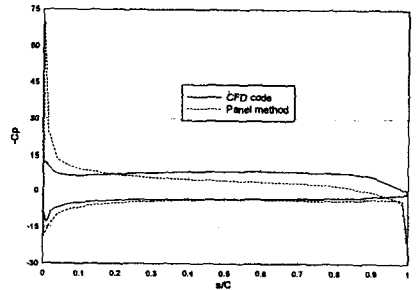
(c) Streamline

Fig. 6 Velocity, pressure contour, and streamline at $r/R=0.82$

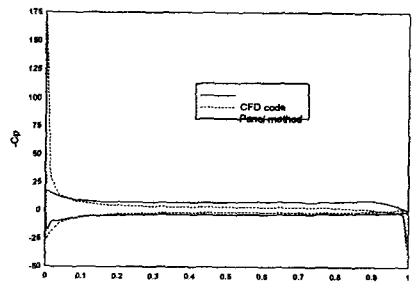
Fig. 7에서는 반경비가 0.38, 0.6, 그리고 0.82인 단면에서의 C_p 분포를 보여주고 있다. 실선으로 표시된 값은 점성을 고려한 유동 해석을 통해 얻어진 것이고 점선으로 표시된 것은 패널법으로 계산된 값이다.



(a) $r/R=0.38$



(b) $r/R=0.6$



(c) $r/R=0.82$

Fig. 7 C_p distribution

전체적으로 C_p 값이 비슷한 분포를 하고 있지만 패널법으로 계산된 결과값과 CFD code로 계



산된 결과값이 약간의 차이가 있다는 것을 확인할 수가 있다. 특히 반경비가 커짐에 따라 그 차이가 더욱 커짐을 볼 수가 있으며, 패널법으로 계산된 결과에서 leading edge에서는 그 값이 거의 무한대로 커져 포텐셜 유동의 한계를 확인할 수 있었다. trailing edge에서도 pressure side는 계산결과가 비슷하지만 suction side에서는 경계층 유동 현상에 의해 다소 차이가 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원, 점성, 비압축성 Navier-stokes 방정식을 이용하여 수중 프로펠러에 대해 점성유동을 해석하였다. Ka-4-55 Screw series에서 Screw B를 모델로 하여 유동을 해석하였으며, 그 결과 값을 포텐셜 유동으로 계산된 C_p 값과 비교하였고, 비교적 잘 일치한다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 김영기, 1993, "포텐셜을 기저로한 패널법에 의한 프로펠러의 정상 성능 해석," 대한조선학회논문집, 대한조선학회, Vol.30, No.1, pp 73-86
- [2] 김문찬, 1996, "선체 변동 압력에 관한 실험과 이론의 비교 연구," 대한조선학회논문집, 대한조선학회, Vol.33, No.1, pp.19-26 1225-1143
- [3] 정영래, 2002, "로터-스테이터 상호작용이 포함된 수중추진기의 Tip 간극변화에 따른 유동특성에 관한 연구," 부산대학교 공학박사학위논문
- [4] Park, W.G., Kim, H. W., Jung, Y. R., Kim, K. S., and Park, E. D., 1996, "Unsteady Incompressible Turbulent Flow Simulation of the Rotor-Stator Configuration," Proceeding of the 6th International symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol.2, pp. 257-267.
- [5] Vecelli, J. A., 1969, "A Method for including Arbitrary External Boundaries in the MAC Incompressible Fluid Computing Technique," Journal of Computational Physics, Vol.4, pp.543-551.
- [6] Baldwin, B. S. and Lomax, H., 1978, "Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows," AIAA Paper 78-0257.