

Ducted Marine Propeller의 점성유동 수치해석

유혜란^{*1}, 정영래^{*2}, 박원규^{*3}

Numerical Viscous Flow Analysis of Ducted Marine Propeller

Hye-Ran Yu, Young-Rae Jung, Warn-Gyu Park

The present work solved 3D incompressible RANS equation on a rotating, non-orthogonal multi-blocked grid system to efficiently analyze ducted marine propulsor with rotor-stator interaction. To handle the interface boundary between a rotor and a stator maintaining the conservative property, the sliding multiblock technique using the cubic spline interpolation and the bilinear interpolation technique were applied. To validate present code, a turbine flow having rotor-stator interaction was simulated. Time averaged pressure coefficients were compared with experiments and good agreement was obtained. After the code validation, the flowfield around a single-stage ducted marine propulsor was simulated.

Keywords : RANS equations, Ducted marine propulsor, Rotor-stator interaction, Sliding multiblock technique, Bilinear interpolatio

1. 서론

잠수함이나 어뢰에 많이 사용되고 있는 수중추진기는 로터-스테이터를 덕트로 감싸고 있다. 덕트는 외부 충돌로부터 Propeller 보호, Propeller 효율 향상, Cavitation 현상 감소 등을 목적으로 이용되고 있다. 수중추진기는 실린더형의 덕트 속에 로터와 스테이터를 가지고 있기 때문에 수치 해석이 복잡하

고 유동도 복잡하다. 그러나 덕트, 허브, 로터, 그리고 스테이터를 지나는 비정상 상태의 점성 유동의 정확한 예측은 cavitation 발생과 비정상 상태의 박리, 그리고 추진 시스템의 수력학적 성능을 구하기 위해서는 필수적이다. 이전에도 panel method를 이용하여 덕트를 포함하는 유동을 해석하는 연구자들 (Kerwin et al., 1987; Kinnas et al., 1992; Hughes, 1993)[1,2,3]은 있었으나 대부분의 연구자들은 덕트가 없는 프로펠러에 대한 실험 (Zierke et al., 1995, 1996) 및 전산 해석 (Hassan et al., 1995; Lee et al., 1996; Sheng et al., 1997)[4,5,6]을 수행하였다. 이때까지 사용된 비점성 panel method는 선박 추진

*1 부산대학교 기계공학과

*2 국방과학연구소

*3 부산대학교 기계공학부

성능 예측에는 우수하고 효과적이다. 그러나 로터와 스테이터 사이에 vortex 상호작용과 덕트를 포함하는 프로펠러 주위의 유동이나 경계층과 와류 사이에서 상호작용이 있는 유동은 매우 복잡한 3차원의 점성 유동이기 때문에 유동 특성을 좀 더 자세히 설명할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 변형된 3차원 비압축성 RANS 방정식을 이용하여 덕트와 로터-스테이터 상호작용을 포함하고 있는 직교가 아닌 다중 블록 격자 시스템을 효과적으로 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1 지배방정식 및 수치해석방법

3차원 비정상 상태 비압축성 점성 유동의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로서, 이를 무차원화 한 후 일반화된 곡선좌표계로 나타내면 다음과 같다.

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

여기서, \bar{a} 는 유동벡터, \bar{E} , \bar{F} , \bar{G} 는 대류항이며, \bar{E}_ν , \bar{F}_ν , \bar{G}_ν 는 점성항을 의미한다. 식 (1)의 해를 구하기 위해 반복 시간행진 방법을(Iterative Time Marching)(Park and Sanker, 박원규, 1991, 1993, 1994)[7,8,] 사용하였다.

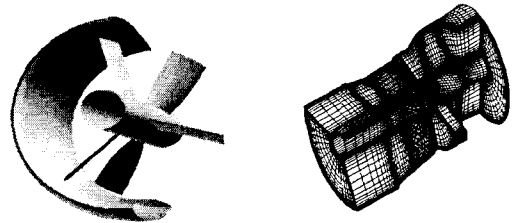
2.2. 초기조건과 경계조건

관성좌표계를 사용하면 원심력이나 코리올리 힘 등이 외형적으로 표현되지 않고, 지배방정식이 단순해지는 장점을 지니기 때문에, 본 연구의 지배방정식은 관성좌표계에서 계산되었다. 관성좌표계를 사용하여 지배방정식을 해석하는 것은 회전하는 날개나 터보기계와 같은 상대운동을 하는 대상을 해석하기에 적합한 방법이다. 식.(1)은 초기조건과 계산을 시작하기 위한 매 시간 단계에서의 경계조건을 필요

로 한다.

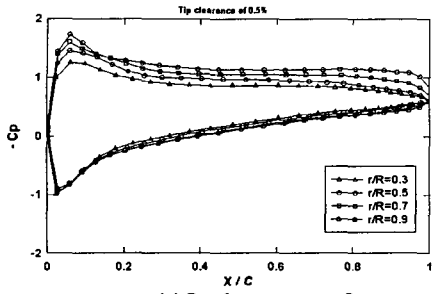
본 연구에서는 로터가 정지상태에서 순간적으로 회전하는 것으로 가정한다. 따라서 자유유동 조건을 초기조건과 원거리 경계조건으로 사용한다. 출구 조건은 모든 물리량에 대하여 외삽한다. 벽면의 속도는 no slip condition을 만족하도록 하고 압력은 법선방향의 압력구배가 영(zero)이라 둔다. 로터와 스테이터의 경계면에서는 cubic 보간법을 이용한 sliding 블록기법을 적용하였으며 대표적으로 2-D, 3-D문제에서는 Bilinear 보간법을 사용하였다.

2.3. 결과 및 토의

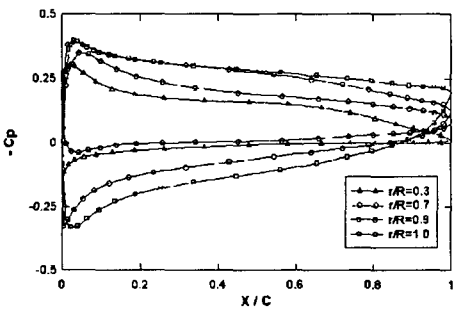


(a) Configuration of ducted marine propeller (b) Grid system
Fig.1 Configuration and grid system of 3D ducted marine propeller

Fig.1은 수중추진기 주위의 격자를 나타내었다. 수중추진기는 Fig.1(a)(Hughes.1993)[3].에서 보는 것과 같이 2개의 로터와 3개의 스테이터, 로터와 스테이터를 싸고 있는 실린더형의 덕트로 구성되었다. 허브는 반경이 로터반경의 25%에 해당되는 일정한 실린더 형상이며, Tip의 간극은 로터반경의 약 3%이다. 스테이터는 Rake, Skew가 없고 두께, 챔버, 코드길이, 피치각 등이 일정한 NACA 66계열을 균등하게 위치시켰다. 수중 추진기 주위의 다중 블록 격자는 Elliptic grid generator에 의해 생성되었다. 전체격자는 로터, 스테이터, Tip, 덕트, 그리고 후류영역 등, 5개로 구성되어 있다. 각각의 격자점수는 51×41×33, 63×30×33, 41×5×9, 34×61×21, 그리고 40×51×43이다.



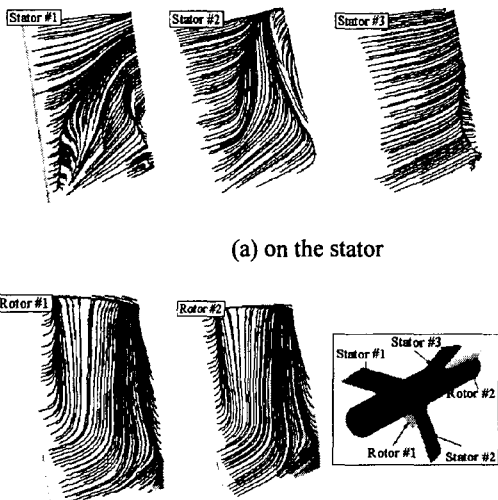
(a) On the stator surface



(b) On the rotor surface

Fig.2 Surface pressure coefficients at four different radii

Fig.2는 Tip 간극변화에 따른 스테이터와 로터의 표면 압력계수를 $r/R=0.3, 0.5, 0.7$, 그리고 0.9 에 대해 각각 나타낸 것으로, 스테이터의 압력은 반경방향으로 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.



(b) on the stator

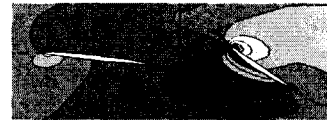
(c) Position of rotor

Fig.3. Instantaneous Limiting streamlines on the suction side of rotor and stator

Fig.3(c).처럼 로터 #1이 스테이터 #1과 스테이터 #2의 중앙에 위치하고 로터 #2가 스테이터 #3과 거의 일직선 상에 있을 때 스테이터와 로터 각각에 대해 Suction side에서의 표면유선을 Fig.3에 나타내었다. 스테이터의 경우에 로터와의 상대적인 위치에 따라서 날개 표면의 거동이 차이가 많음을 볼 수 있다. Fig.3(b)에서 보이는 것과 같이 로터 #1과 #2는 유선 경향이 서로 유사하게 나타나고 있는데 반해 Fig.3(a)의 스테이터 #1, #2, 그리고 #3은 유선경향이 서로 다르다.



(a) $r/R = 0.3$



(b) $r/R = 0.5$



(c) $r/R = 0.7$



(d) $r/R = 0.9$

(1) Stator (2) Rotor

Fig.4 Pressure contours at $r/R=0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.9$

Fig.4는 로터와 스테이터의 각 위치에 따른 등압력선도를 나타낸다.

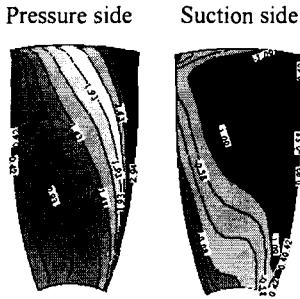
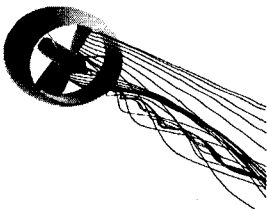
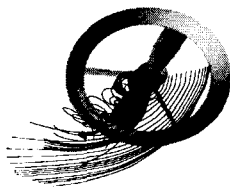


Fig.5 Surface pressure contours

Fig.5은 Fig.3(c)에서 보이는 로터 #2의 등압력선도를 나타낸다.



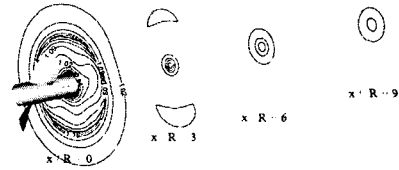
(a) viewing from oblique-back



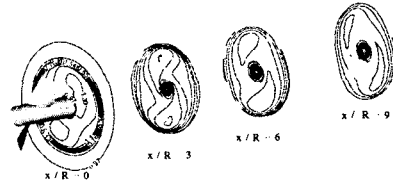
(b) viewing from back

Fig.6 Streamline

Fig.6은 후류영역에서의 강한 와동을 가시화하기 위해 로터의 후방에서 3차원 유선을 그린 것으로, 후류의 중심에는 아주 강한 와류가 후방으로 전파되고 있다.



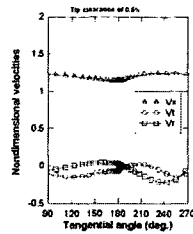
(a) Pressure contours



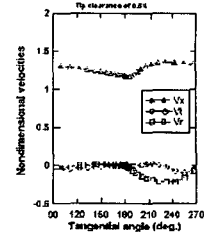
(b) Axial velocity component contours

Fig.7 Contours of pressure and velocity components in the wake regi

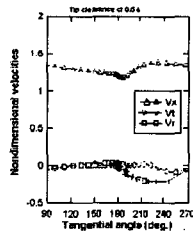
Fig7은 후류영역에서의 등압력선도와 속도 성분을 나타내었다.



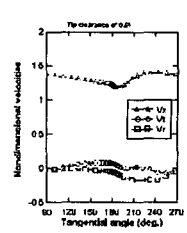
(a) $r/R=0.3$



(b) $r/R=0.5$



(c) $r/R=0.7$



(d) $r/R=0.9$

Fig.8 Distributions of velocity components ahead of rotor

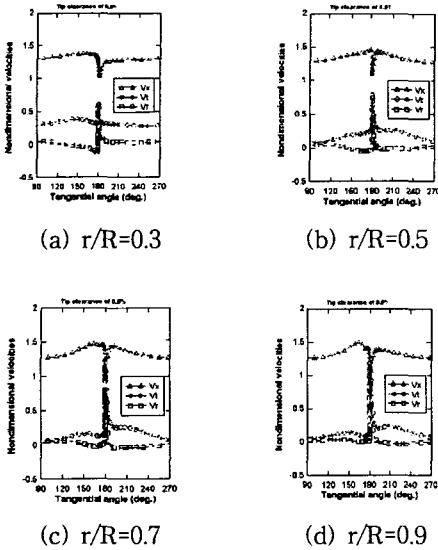


Fig.9 Distributions of velocity components behind of rotor

Fig.8과 9는 로터의 전후방으로 축방향속도, 접선방향속도, 반경방향속도를 나타내었다.

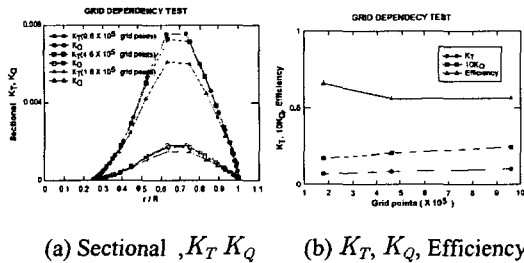


Fig.10 Thrust and torque coefficient in terms of number of grid points

Fig.10은 전체 격자수에 대한 로터의 추력계수 (K_T)와 토크계수(K_Q)를 나타내었다. 여기서 K_T 와 K_Q 는 아래와 같이 정의된다.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}; \quad K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$$

여기서 T와 Q는 Thrust와 Torque이다. 또, n은 회전수(rps)를 의미하며 D는 로터의 직경이다. 로터

의 효율(η),은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q}$$

그리고 Fig.10(b).는 로터의 효율을 나타낸다. 여기서 J는 전진비 이다.

Table 1.에서는 로터 전체의 추력계수(K_T), 토크계수(K_Q), 효율(η)을 각각 계산하여 비교하였다.

Table1. Grid dependency

TOTAL NUMBER GRID POINTS	ADVANCED RATIO (J)	KT	KQ	PROPELLER EFFICIENCY
9.6105	0.833	0.104	0.024	0.565
4.6105	0.833	0.088	0.021	0.562
1.8105	0.833	0.071	0.017	0.661

3. 결 론

수중 추진기의 수치해석은 실린더형의 덕트와 로터-스테이터의 상호작용을 포함하는 복잡한 3차원 점성유동의 자세한 이해를 돕기 위해 수행되었다. 3차원 비압축성 RANS 방정식을 이용하여 로터-스테이터 상호작용과 덕트를 포함하는 수직이 아닌 다중 블럭 격자 시스템을 해석하였다. 로터와 스테이터 경계면에서는 물리량의 보존을 만족하는 로터-스테이터 상호작용을 해석하기 위해서 Cubic 보간법과 Bilinear 보간법을 사용한 슬라이딩 다중 블럭 기법을 적용하였다. 본 연구 결과는 로터와 스테이터에서 압력 분포와 유선, 그리고 로터 전후방의 속도 변화를 고려하면 로터-스테이터 상호작용과 실린더형의 덕트 영향을 받는 수중추진기의 복잡한 유동 특성을 이해할 수 있다는 것이다.

후기

이 연구는 한국과학재단의 첨단 조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] J. E. Kerwin, S. A. Kinnas, J-T Lee, and W-Z Shih, "A Surface Panel Method for the Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers", Trans. SNAME, 95, 1987
- [2] S. A. Kinnas and W. B. Coney, "The Generalized Image Model An Application to the Design of Ducted Propellers", Journal of Ship Research, Vol. 36, No. 3, 1992.
- [3] M. J. Hughes, "Analysis of Multi-component Ducted Propulsors in Unsteady Flow", Ph.D. thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, May, 1993.
- W. G. Park and L. N. Sankar, "An Iterative Time Marching Procedure for Unsteady Viscous Flows", ASME-BED Vol. 20, 1991.
- [4] Y. T. Lee, C. Har, J. Loellbach, "Flow Analyses in a Single-Stage Propulsion Pump", Journal of Turbomachinery, Vol. 118, 1996
- [5] K. K. Hassan, S. Abdallah, and Y. T. Lee, "Three-Dimensional Solutions for Incompressible Turbulent Flow in a High Reynolds Number Pump", Numerical Simulations in Turbomachinery, ASME FED Vol. 227, 1995.
- [6] C. Sheng, J. P. Chen, L. K. Taylor, M. Y. Jiang, and D. L. Whitfield, "Unsteady Multigrid Method for Simulating 3-D Incompressible Navier-Stokes Flows on Dynamic Relative Motion Grids", AIAA Paper 97-0446, 1997.
- [7] W. G. Park and L. N. Sankar, "An Iterative Time Marching Procedure for Unsteady Viscous Flows", ASME-BED Vol. 20, 1991
- [8] Park, W. G., Jung, Y.R., and Ha, S. D., "Numerical Viscous Flow Analysis around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol.36, No.3, pp.477-479, 1998.