

프로펠러식 펌프의 전산 유동 해석

유혜란* · 박원규**

Numerical Flow Analysis of Propeller Type Pump

Hye-Ran Yu*, Warn-Gyu Park**

Keywords : *Incompressible RANS equation*(비압축성 RANS 방정식), *Propeller type pump*(프로펠러식 펌프), *Screw impeller*(스크루 날개차), *Performance analysis*(성능해석)

ABSTRACT

Propeller type pump has been widely used for pumping water in agricultural and manufacturing industry. Since a propeller type pump contains a screw impeller inside a circular casing, the numerical analysis becomes complex. However, the accurate prediction of viscous flow is essential for computing hydrodynamic performances. To analysis the flow and the performance of the propeller type pump, the present work has solved 3D incompressible RANS equations on the multiblocked grid. From the present calculation, small amount of flow separation was shown near hub and the flow was recovered to nearly uniform inflow after one diameter downstream. Torque and thrust coefficient were computed and compared with experiments.

1. 서론

회전축에 평행한 케이싱 속에 놓여진 프로펠러형의 날개차 (impeller)에 의해 액체를 가속하거나 가압하는 펌프를 프로펠러식 펌프라고 하는데, 이는 저양정 고유량용으로, 농업용수의 양수 혹은 배수나 토목공사용, 상하수도용으로 널리 이용된다. 그러나 프로펠러식 펌프에서는 비균일 유입류, 국부 유동 박리, 캐비테이션 등으로 성능이 감소할 수 있는데, 이러한 성능감소를 분석하고 나아가 성능향상을 위해서는 프로펠러식 펌프의 점성 유동장을 정확히 해석할 필요가 있다. 축류 펌프에 대한 선행 연구로는 실험^{(1),(2)}과 수치해석^{(3)~(5)}이 수행된 적이 있으며 쉬라우드 프로펠러에 대해서는 패널코드를

이용한 수치해석^{(6),(7)} 연구가 있었으며 근래에 점성유동 해석 연구^{(8)~(10)}가 수행된 적이 있다.

일반적으로 패널코드는 프로펠러의 설계나 설계점에서 성능 예측에는 우수하고 효과적이지만 덕트 속에 놓여진 프로펠러 주위의 유동이나 경계층과의 상호작용이 있는 유동과 같은 강한 점성 영향이 있는 유동 해석에는 적합하지 않다. 그러므로 본 연구에서는 스크루 날개차 (screw impeller)를 가지는 프로펠러식 펌프 내부의 유동을 3차원 비압축성 RANS 방정식을 이용하여 해석 하고자 한다.

2. 본론

2.1. 지배 방정식 및 수치해석방법

3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 무차원화한

* 부산대학교 기계공학과

** 부산대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : yuhyeran@pusan.ac.kr

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 반복시간행진법^{(11)~(13)}을 사용하였으며 난류모델은 저 레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모델⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 임펠러가 정지상태에서 순간적으로 회전하는 것으로 가정하여 자유 유동 조건을 초기조건과 입출구 조건으로 사용하였다. 벽면의 속도는 점착조건을 만족하도록 하고 압력은 법선방향의 압력구배가 영 (zero)으로 놓고 구하였다.

2.2. 수치기법 및 격자계

Figure 1은 프로펠러식 펌프의 형상과 격자계를 나타낸 것이다. 프로펠러식 펌프는 직경이 240mm의 케이싱과 원형 허브, 그리고 4개의 프로펠러 모양의 임펠러로 구성되어 있으며 각 임펠러는 피치비는 1을 가지며 반경 방향으로 피치각이 선형적으로 변하는 ka-4-55 스크루 계열 중 스크루 B모델이다⁽¹⁵⁾. 임펠러와 케이싱 사이

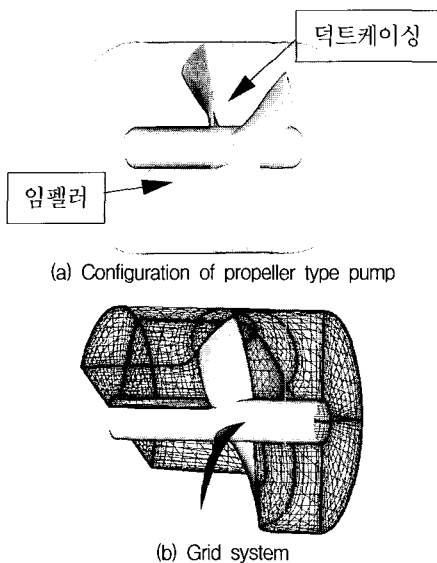


Fig. 1 Configuration and grid system of propeller type pump

의간극은 1 mm이다. 격자계는 8개의 다중격자계로서, 입구와 출구로 이어지는 유로 영역의 4개의 격자계와 임펠러와 케이싱 사이의 영역의 4개의 tip간극 격자계로 구성되었다. 각 유로에 대한 격자계는 각각 68×25×35의 격자로 이루어져 있으며 tip간극에 대해서는 각각 49×5×10의 격자수로 이루어져 있다. 그리고 임펠러에 근접한 유동 구조들의 해상도를 높이기 위해서 유로 격자계를 임펠러 표면쪽으로 갈수록 더욱 조밀하게 구성하였다. 전산해석은 전진비가 0.85, 0.90, 0.95에 대해 수행되었으며 이는 회전수 475, 450, 425 rpm에 해당한다. 여기서 전진비 J는 다음과 같이 정의된다.

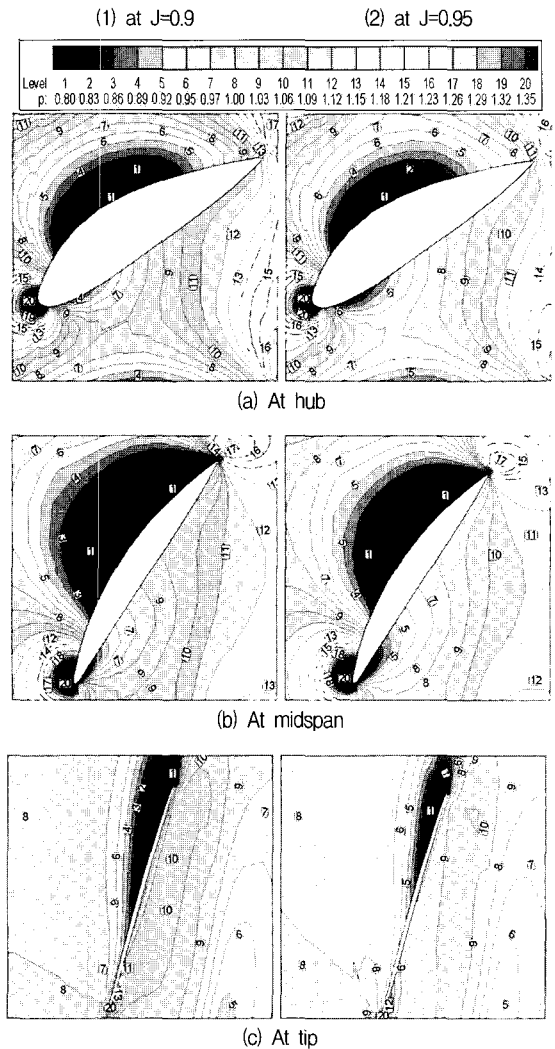


Fig. 2 Pressure contours at two advanced ratios

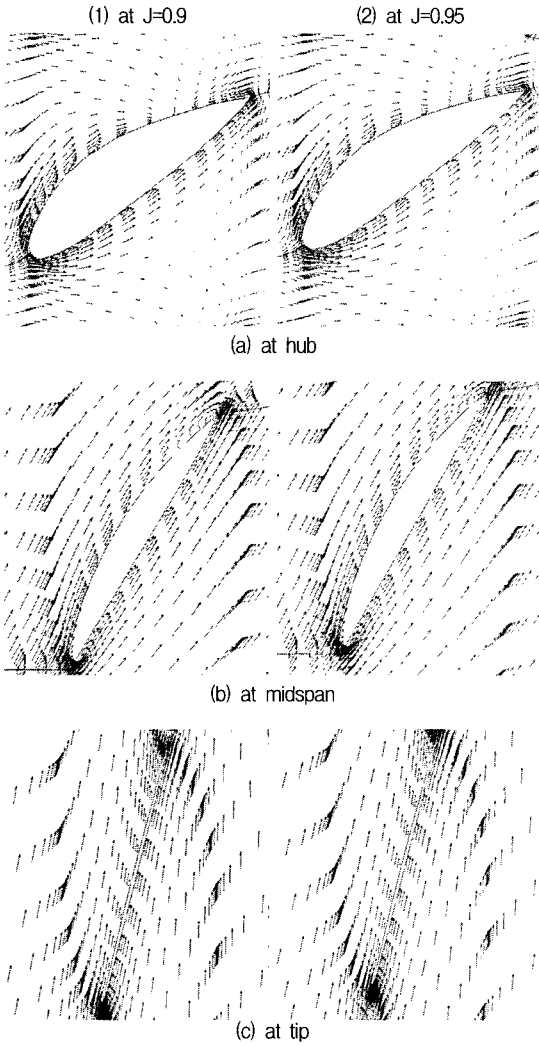


Fig. 3 Velocity vectors at two advanced ratios

$$J = \frac{V}{nD} \quad (2)$$

여기서 V는 입구 평균유속이며, D는 임펠러의 직경, n은 회전수 (rpm)이다.

3. 계산 결과 및 토의

Figures 2와 3은 임펠러의 허브와 중간스팬, 그리고 끝단 단면의 J=0.9와 J=0.95일 때 등압력선 분포와 속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 허브 쪽 단면에서 익

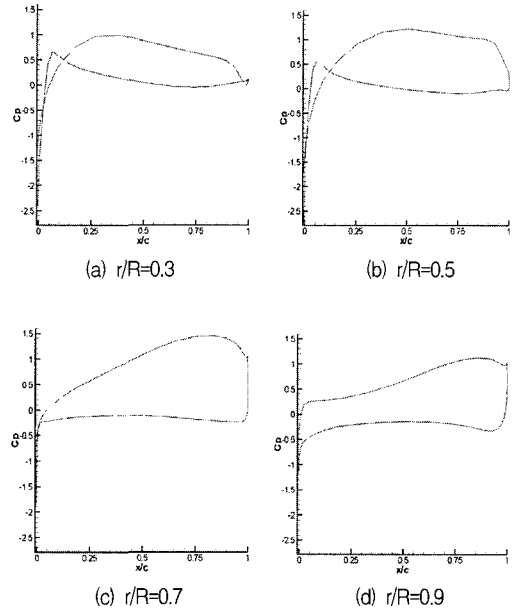


Fig.4 Surface pressure coefficients at four different radii (J=0.9)

형 형상을 따라 후미부 부분에 강력한 역압력 구배가 나타남을 알 수 있고 이것에 의해 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 유동박리가 발생함을 알 수 있다. 그리고 끝단쪽으로 갈수록 익형 단면의 두께가 얇아지면서 평판에 가까운 형상이 되기 때문에 흡입면과 압력면의 압력 차이가 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

Figure 4는 J=0.9일 때 각 반경위치의 각 단면에서 임펠러의 표면 단면압력계수를 보여주고 있으며 Fig. 5는 압력면과 흡입면의 등압력 분포를 보여주고 있다.

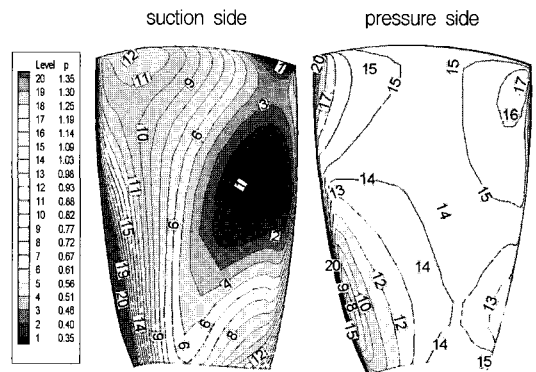


Fig. 5 Pressure contours on propeller surface (J=0.9)

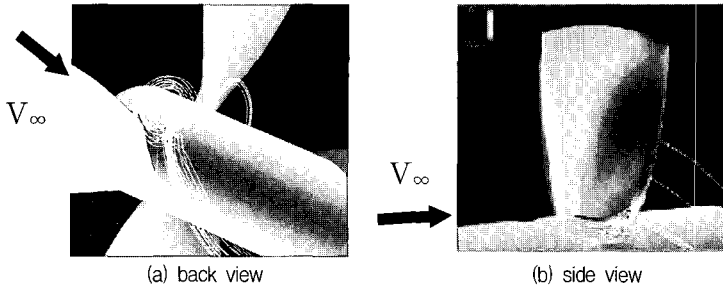


Fig. 6 Streamline near hub at J=0.9

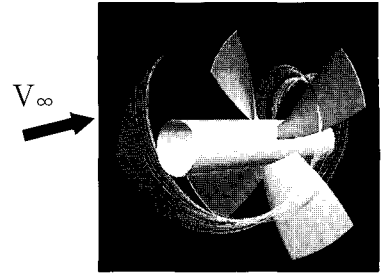


Fig. 7 Streamlines at J=0.9

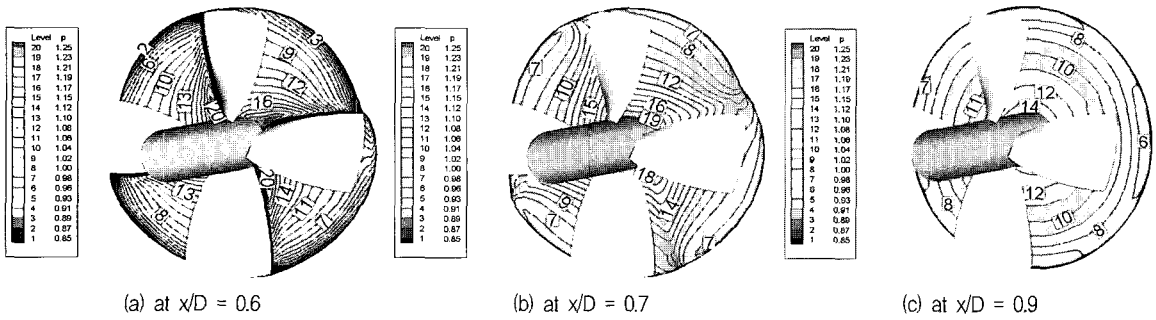


Fig. 8 Pressure contours in the wake (J=0.9)

Figure 6은 허브 근처에서의 유선을 보여주고 있다. 유동이 임펠러를 지나면서 반경 방향으로 치우치는 현상을 볼 수 있는데, 이것은 허브쪽의 역압력 구배로 인하여 발생된 박리유동이 임펠러의 회전에 의한 강한 원심력의 작용을 받고 있기 때문이다.

Figure 7은 전체적인 유선을 나타낸 것으로 허브 전체가 450 rpm 속도로 회전하고 있을 때, 유동이 입구부에서 출구부까지 허브 반경을 따라 크게 회전하고 있음을 알 수 있다.

Figure 8은 임펠러를 지난 후류 유동의 압력 변화를 나타낸 것이다. 날개의 영향을 받아 허브쪽에 높은 압력이 생기고 압력 분포도 회전방향으로 치우쳐져 있으나 후류 쪽으로 갈수록 허브 근처의 높은 압력은 사라지고 압력분포도 허브의 모양을 따라 동심원 형상으로 유동이 원거리 경계값으로 복원되고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 9는 J=0.9일 때 덕트의 내부 표면에 나타나는 등압력선 분포를 나타낸 것으로 끝단와류 (tip vortex)의 궤적과 swirl 성분에 의한 유동 현상을 파악할 수 있다.

Table 1은 전진비에 따른 추력 계수 (K_T)와 토크 계수 (K_Q)를 실험치⁽¹⁵⁾와 비교한 것으로 전산결과가 비교적 실험과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 여기서 추력 계수와 토크 계수는 다음의 식으로 정의된다.

Table 1 KT-KQ at each advanced ratio

Advanced Ratio(J)	KT		KQ	
	Experiment	Computation	Experiment	Computation
0.85	0.230	0.253	0.011	0.013
0.9	0.200	0.208	0.010	0.010
0.95	0.160	0.161	0.006	0.007

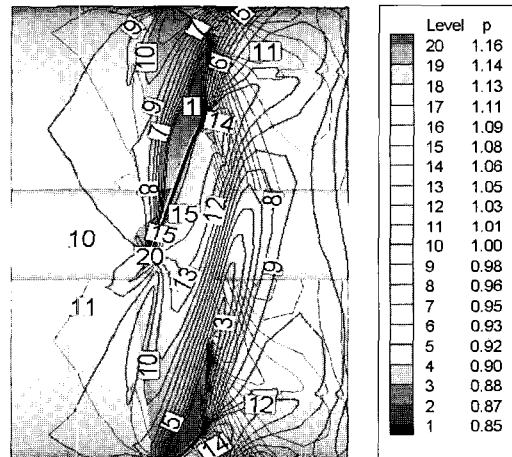


Fig. 9 Pressure contour on duct surface (J=0.9)

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

참고문헌

여기서 T와 Q는 추력과 토크이며 n은 회전수 (rpm)를 의미하고 D는 펌프의 직경이다.

Figure 10은 각 전진비에서의 추력계수와 토크 계수를 나타낸 그림이다. 전진비 0.95와 0.9에서는 실험치가 잘 일치하고 있으나 전진비 0.85에 대해서는 다소 차이가 남을 볼 수 있는데, 이것은 설계점을 벗어나는 off-design 상태에서 유동박리 현상이 증대되고 이것에 의해 난류모델의 정확도가 떨어지기 때문인 것으로 여겨진다.

4. 결론

프로펠러식 펌프 내의 점성 유동을 해석하기 위해 3차원 RANS 방정식을 풀었다. 유동해석 결과에 의해 허브 근처와 중간스팬, 그리고 끝단 근처의 유동을 구체적으로 보였으며 허브쪽에 생기는 역류현상 때문에 유동이 반경방향으로 치우치는 현상을 관찰할 수 있었다. 그리고 전진비에 따른 추력 계수와 토크 계수를 구하여 실험과 비교하였으며 비교적 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2005년~2007년)에 의하여 연구되었다.

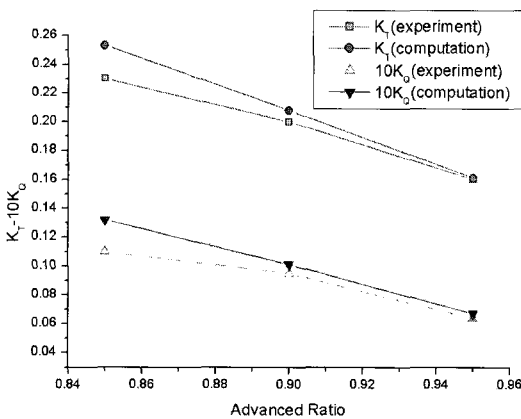


Fig. 10 K_T - $10K_Q$ compared with experiment⁽¹⁵⁾

- (1) Zierke, W. C., Straka, W. A. and Taylor, P. D., 1995, "An Experimental Investigation of The Flow through an Axial-Flow Pump," Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, pp. 485~490.
- (2) Zebek, W.C. and Straka, W.A., 1996, "Flow visualization and the three-dimensional flow in an axial-flow pump," Journal of Propulsion and Power, Vol. 12(2), pp. 250~259.
- (3) Hassan, K. K., Abdallah, S. and Lee, Y. T., 1995, "Three-dimensional solutions for incompressible turbulent flow in a high Reynolds number pump," ASME-FED, Vol. 227, pp. 109~116.
- (4) Lee, Y. T., Har, C. and Loellbach, J., 1994, "Flow Analysis in a Single-Stage Propulsion Pump," ASME 94-GT-139.
- (5) Sheng, C., Chen, J. P., Taylor, L. K., Jiang, M. Y. and Whitfield, D. L., 1997, "Unsteady Multigrid Method for Simulating 3-D Incompressible Navier-Stokes Flows on Dynamic Relative Motion Grids," AIAA Paper 97-0446.
- (6) Kerwin, J. E., Kinnas, S. A., Lee, J. T. and Shih, W. Z., 1987, "A Surface Panel Method for The Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers," Trans. SNAME, Vol. 95.
- (7) Kinnas, S.A. and Coney, W.B., 1992, "The Generalized Image Model an Application to The Design of Ducted Propellers," Journal of Ship Research, Vol. 36(3), pp. 197~209.
- (8) Hughes, M. J., 1993, "Analysis of Multi-Component Ducted Propulsors in Unsteady Flow" Ph. D. Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT.
- (9) 정영래, 2002, "로터-스테이터 상호작용이 포함된 수중추진기의 Tip 간극 변화에 따른 유동특성에 관한 수치해석 연구," 박사학위 논문, 부산대학교.
- (10) 유혜란, 박원규, 2004, "Shrouded Propeller 주위 유동 전산 해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집(2), pp. 863~868.

- (11) Park, W. G. and Sankar, L. N., 1993, "Numerical Simulation of Incompressible Viscous Flow around a Marine Propeller," AIAA Paper 93-3503.
- (12) 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," Proceedings of the 6th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vol. 2, pp. 257~267.
- (13) Park, W. G., Jung, Y. R. and Ha, S. D., 1998, "Numerical Viscous Flow Analysis around a High Speed Train with Crosswind Effects," AIAA Journal, Vol. 36(3), pp. 477~479.
- (14) K. Y. Chien, 1982, "Prediction of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds-Number Turbulent Model," AIAA Journal, Vol. 20, No. 1.
- (15) Van Manen, J. D. 1963, "Effect of Radial Load Distribution on the Performance of Shrouded Propeller," RINA Transactions and Annual Report, pp. 185~197.