

## ◎ 논문

# 전치 가이드베인을 가지는 수중 덕트 프로펠러 주위의 전산 유동 해석

유혜란<sup>\*1</sup>, 정영래<sup>\*2</sup>, 박원규<sup>\*3</sup>

## Numerical Flow Analysis of Ducted Marine Propeller with Pre-Swirl Guidevane

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

The present work solved 3D incompressible RANS equations on a rotating, multi-blocked grid system to efficiently analyze ducted marine propulsor with the interaction of propeller guidevane and annular duct. To handle the interface boundary between the guidevane and the propeller, a sliding multiblock technique based on the cubic spline interpolation was applied. To validate the present code, a turbine flow was simulated and the time-averaged pressure coefficients were compared with experiment. After the code validation, the flowfield around a ducted marine propeller with pre-swirl guidevane was simulated.

**Keywords** : RANS equations, Ducted marine propulsor, Pre-swirl guidevane, Sliding multiblock technique, Spline interpolation

### 1. 서론

잠수함이나 어뢰의 수중추진기는 가이드베인과 프로펠러를 덕트로 감싸고 있는 경우가 많은데, 덕트는 외부 충돌로부터 프로펠러의 보호, 추진 효율 향상, 캐비테이션 감소 등의 이점을 얻을 수 있다. 덕트 프로펠러는 원형 덕트 속에 가이드베인과 프로펠러를 가지고 있기 때문에 수치 해석이 복잡하고 유동도 복잡하다. 그러나 덕트, 허브, 가이드베인, 그리고 프로펠러를 지나는 점성 유동의 정확한 예측은 캐비테이션 발생과 추진 시스템의 성능을 구하기 위해서는 필수적이다. 이전의 연구들은 덕트가 없는

프로펠러에 대한 실험[1,2]과 수치해석[3,4,5]을 주로 다루었고 일부 패널코드를 이용한 수치 해석 [6,7,8]에서는 덕트를 포함하여 해석하기도 하였다. 그러나 비점성 패널코드는 선박 추진 성능 예측에는 우수하고 효과적이긴 하나 가이드 베인과 프로펠러 사이의 와류 상호작용과 덕트를 포함하는 프로펠러 주위의 경계층 유동과 와류간의 상호작용이 있는 유동은 매우 복잡한 3차원 점성유동이기 때문에 패널코드의 이용이 적합하지 않다.

본 연구에서는 3차원 비압축성 RANS 방정식을 이용하여 덕트, 가이드베인과 프로펠러 상호작용을 포함하고 있는 유동을 해석하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 지배 방정식 및 수치해석방법

3차원 비압축성 점성유동 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식으로서, 이를 무차원화 한 후 일반화된 곡선좌표

\* 2004년 3월 16일 접수

\*1 학생회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*2 정회원, 국방과학 연구소

\*3 정회원, 부산대학교 기계공학부

계로 나타내면 다음과 같다.

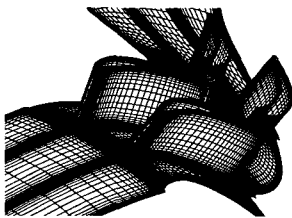
$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{E} - \bar{E}_\nu) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{F} - \bar{F}_\nu) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\bar{G} - \bar{G}_\nu) = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\bar{q}$  는 유동벡터,  $\bar{E}$ ,  $\bar{F}$ ,  $\bar{G}$ 는 대류항이며,  $\bar{E}_\nu$ ,  $\bar{F}_\nu$ ,  $\bar{G}_\nu$ 는 점성항을 의미한다. 식 (1)의 해를 구하기 위해 반복 시간 행진 (Iterative Time Marching) 방법[9,10,11]을 사용하였으며 난류모델은 저레이놀즈 수 k-ε 모델을 사용하였다.

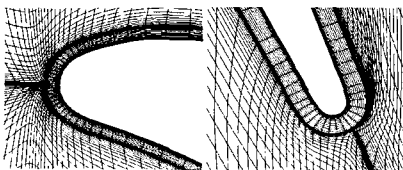
### 2.2 초기조건과 경계조건

본 연구에서는 지배방정식을 관성 좌표계에서 해석하며 프로펠러가 정지상태에서 순간적으로 주어진 회전수로 회전하는 것으로 가정하였으므로 자유유동 조건을 초기조건과 원거리 입구 경계조건으로 사용한다. 출구 경계조건은 모든 물리량에 대하여 외삽한다. 벽면의 속도는 점착조건으로 두었으며 압력은 법선방향의 압력구배를 영(zero)으로 두었다. 가이드베인과 프로펠러의 경계면에서는 3차 스플라인 (spline) 보간법을 이용한 슬라이딩 블록기법을 적용하였다 [12].

### 2.3 결과 및 토의



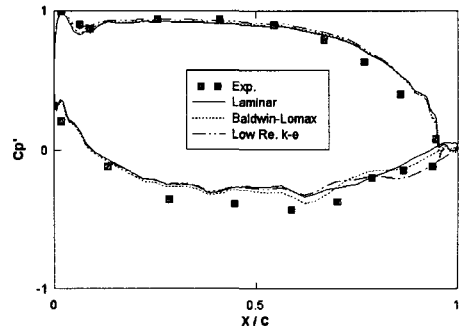
(a) Grid system



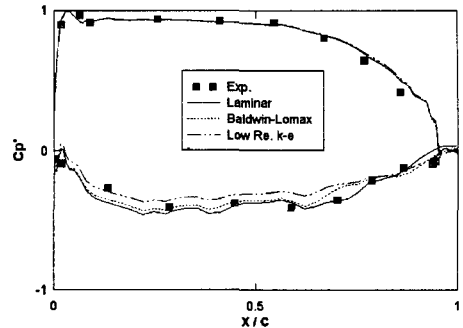
(b) Leading edge (c) Trailing edge

Fig. 1 Rotor-stator grid system of a turbine

가이드베인을 가지는 덕트 프로펠러에 대한 유용한 실험 데이터나 전산 데이터를 구할 수 없어 정익과 동익을 가지고 있는 단단(single-stage) 터빈 유동을 해석하여 실험과 비교하였다. Fig. 1은 터빈 유동 해석을 위한 격자로서 Fig. 1(b),(c)에서 보듯이 격자 시스템은 O-격자 삽입형(embedded O-grid) H-격자계로서 H-격자(85×29×29) 내부에 O-격자(101×10×29)를 정익과 동익 주위에 삽입시킴으로써 H-격자계의 branch-cut에 의한 문제점을 해결할 수 있었고, 따라서 유동해석의 정확성을 증가시킬 수 있었다.



(a)  $C_x/U = 0.68$



(b)  $C_x/U = 0.78$

Fig. 2 Time averaged  $C_p$  at the mid-span of rotor

전산해석은 회전속도비가  $C_x/U = 0.68$ 과  $0.78$ 의 두 가지 경우에 대해 계산하였는데,  $C_x$  는 절대 유입 속도를 의미하고  $U$ 는 로터의 중간 스펠(span)에서의 회전 방향 속도를 의미한다. Fig. 2는 로터 중간 스펠에서의 시간 평균한 표면 압력계수 분포를 실험[13]과 비교하였다. 이 그림에서 보듯이 실험과

계산결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

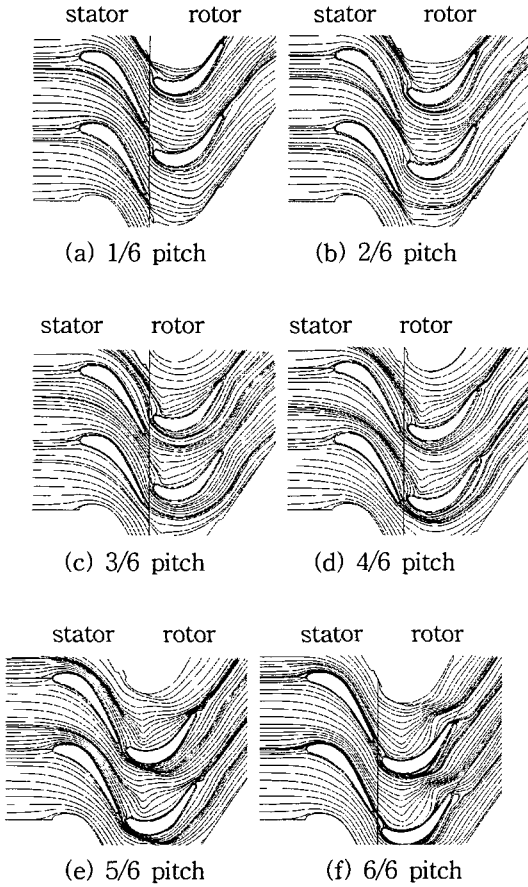


Fig. 3 Unsteady Streamlines at  $C_x/U = 0.78$

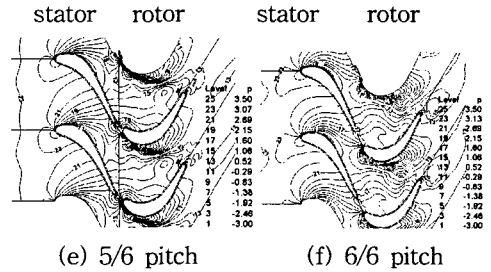
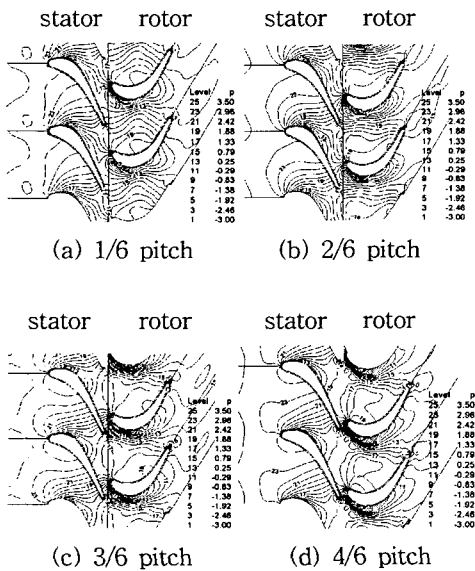


Fig. 4 Instantaneous pressure contours at  $C_x/U = 0.78$

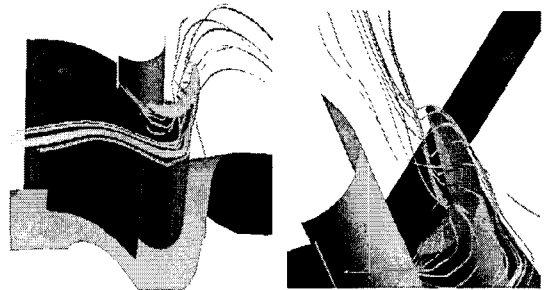


Fig. 5 Streamlines and tip vortex

Fig. 3과 4는 회전 속도비  $C_x/U = 0.78$  일 때 로터의 매 1/6 피치 이동거리마다 중간 스패 단면에서 압력 분포와 유선을 그린 그림으로, 동익의 선미부는 정익의 후류 영향으로 유동장에 상당한 변화가 있어 비정상 상태가 나타남을 알 수 있다. 특히, Fig. 4(e),(f)에서는 정익의 후류영향으로 국부 반음각이 증가하여 동익의 흡입면에 국부적으로 유동박리 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5는 동익에서 형성되는 끝단 와류(tip vortex)를 보여 주고 있다. 다음에는 Fig. 6과 같은 전치 가이드베인이 있는 덕트 프로펠러에 대해 유동해석을 수행하였는데, 이 덕트 프로펠러는 덕트 내부의 전방에 3개의 가이드베인이 있고 그 뒤에 두개의 블레이드로 구성된 프로펠러가 놓여 있다[8]. 프로펠러의 허브 반경은 프로펠러 반경의 25%에 해당되는 실린더 형상이며, 끝단 간극(tip clearance)은 프로펠러 반경의 3%이다. 프로펠러는 레이크(Rake)와 스큐(Skew)가 없고 두께, 챔버, 코드길이, 피치각 등이 일정한 NACA 66계열의 익형으로 구성되어 있다. 덕트 프로펠러 주위의 다중 블록 격자는 타원형 편미분 방정식을 이용한 격자 생성법에 의해 생성 되어졌다. 전체 격자는 5개의 블록으로 구성되어져 있으며, 각 격자점 수는  $51 \times 41 \times 33$ ,  $63 \times 30 \times 33$ ,  $41 \times 5 \times 9$ ,  $34 \times 61 \times 21$ ,  $40 \times 51 \times 43$ 이다.

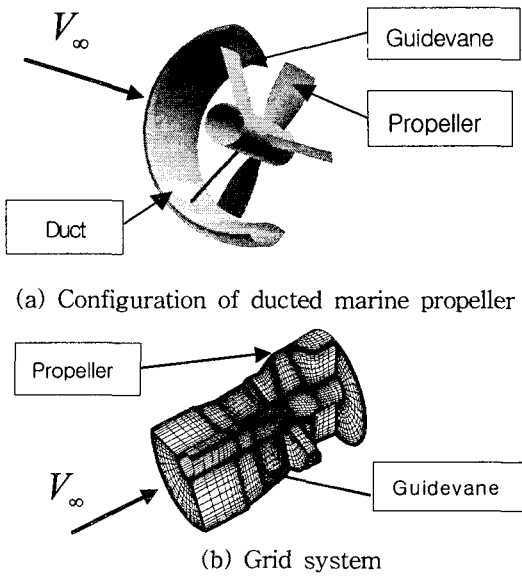


Fig. 6 Configuration and grid system of a ducted marine propeller

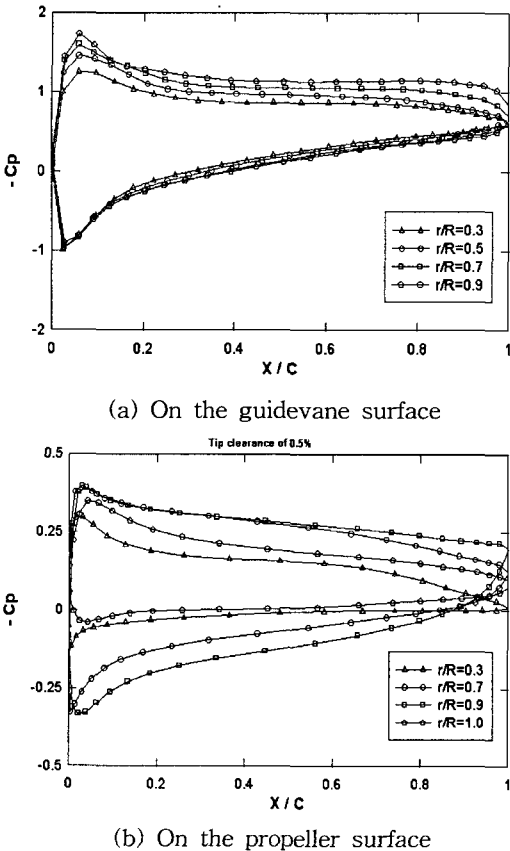


Fig. 7 Surface pressure coefficient at four different radii

Fig. 7은 가이드베인의 시간 평균한 표면 압력계수를  $r/R = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ 에 대해, 그리고 프로펠러의 시간 평균한 표면 압력계수를  $r/R = 0.3, 0.7, 0.9, 1.0$ 에 대해 나타낸 것으로 가이드베인에 비해 프로펠러의 압력이 많이 변함을 알 수 있다. 이것은 프로펠러의 피치각은 반경방향으로 선형적으로 변하는데 비해 가이드베인의 피치각은 일정하기 때문이다.

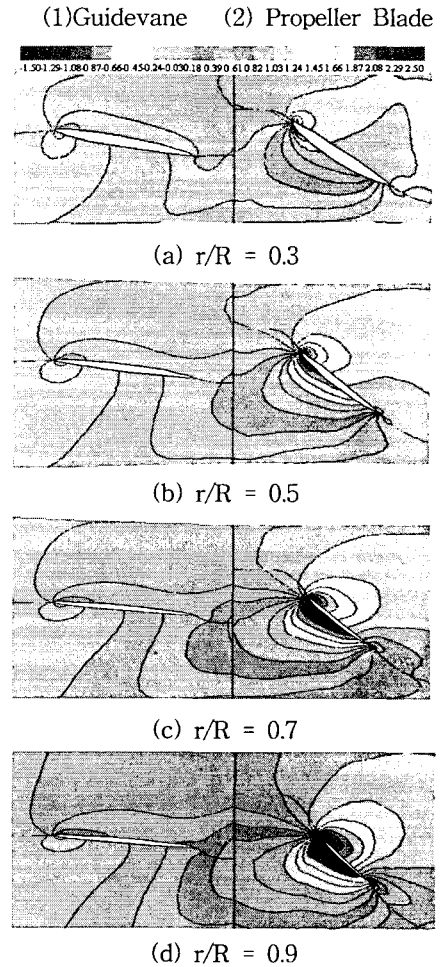
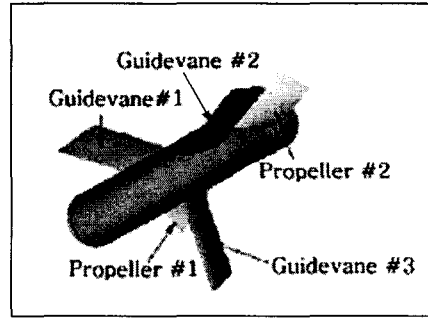


Fig. 8 Pressure contours at  $r/R=0.3, 0.5, 0.7,$  and  $0.9$

Fig. 8은 가이드베인과 프로펠러 블레이드의 각 반경위치에 따른 등압력선도를 나타내며, 가이드베인과 프로펠러 블레이드 사이의 슬라이딩 블록 경계에서 등압력선이 연속적으로 잘 이어져 있으며 블록 경계 간에 유동 변수들이 잘 내삽되고 있음을 보여주고 있다.

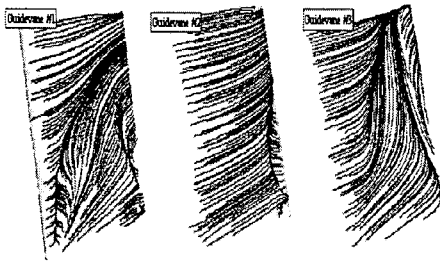
Fig. 9는 가이드베인과 프로펠러의 순간적인 표면 유선을 나타내는 그림으로 프로펠러의 위치는 Fig. 9(c)와 같이 프로펠러 블레이드 번호 1번은 가이드 베인 번호 1번과 3번의 중간에 위치하고 있고, 블레이드 번호 2번이 가이드베인 번호 2번과 일직선상에 위치하고 있다. 그림에서 보듯이 일정한 속도로 회전하고 있는 프로펠러 블레이드 상의 유동은 1번 블레이드나 2번 블레이드 모두 비슷한 유동현상을 나타내고 있으나 가이드베인의 유동은 서로 상당한 차이를 나타내고 있는데, 이것은 프로펠러 블레이드와 가이드베인의 상대적인 위치각도에 관계하며 특히 프로펠러 블레이드 2번과 일직선상에 놓여 있는 가이드 베인 2번은 블레이드의 유체의 강력한 흡입력에 유동이 거의 일직선상으로 흐르고 있음을 알 수 있다.



(c) Position of rotor

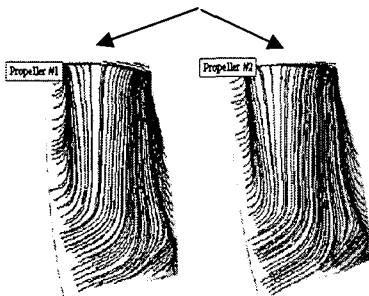
Fig. 9 Instantaneous limiting streamlines on the suction side

그리고 Fig. 9 (b)의 프로펠러 블레이드의 유동은 회전에 의한 강한 원심력에 의해 유동이 반경방향으로 치우침을 알 수 있고, 블레이드 끝에서는 끝단 와류(tip vortex)에 의한 유동 박리선을 확인 할 수 있다.



(a) On the guidevane

Separation line



(b) On the propeller blade

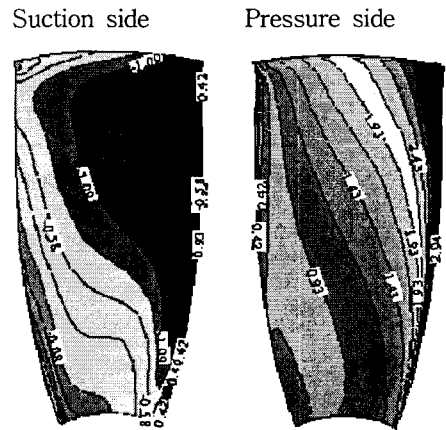
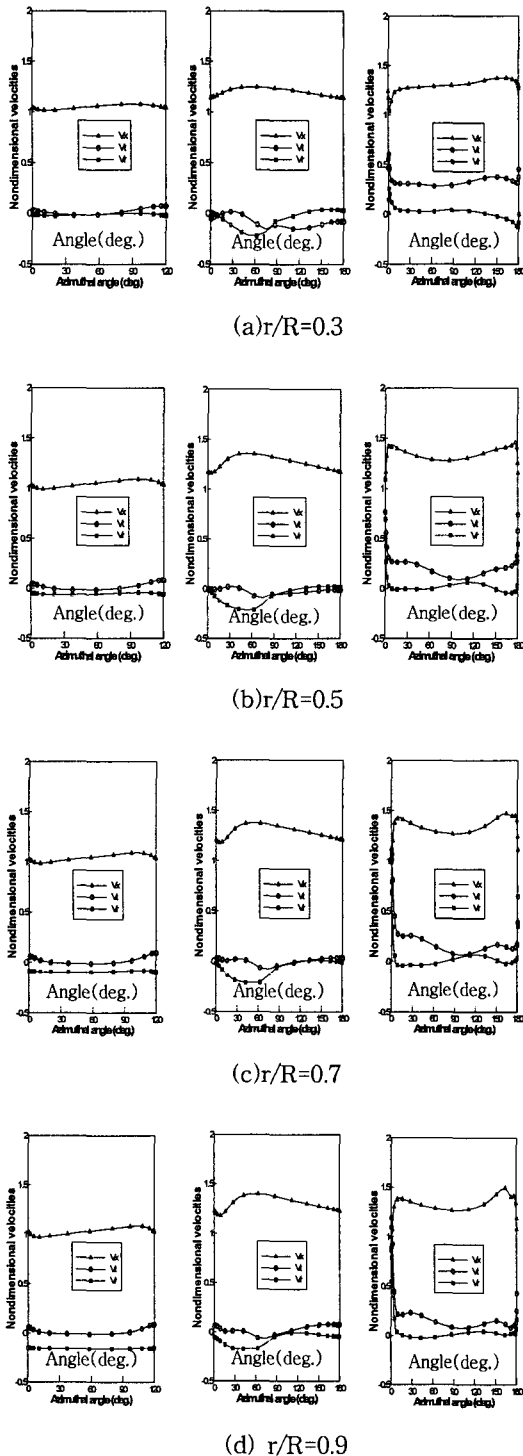
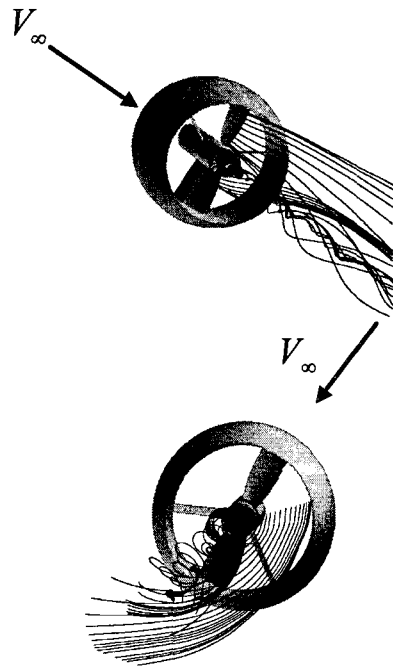


Fig. 10 Surface pressure contours on propeller blade surface

Fig. 10은 Fig. 9(c) 에서 보이는 프로펠러 블레이드 2번의 흡입면과 압력면상의 등압력선도를 나타낸 것이다.



(1) Before guidevane (2) In the middle of gap (3) Behind propeller  
**Fig. 11** Distributions of velocity components



**Fig. 12** Streamlines emanating from the propeller plane

Fig. 11은 각 반경위치에서 가이드베인 전방, 가이드베인과 프로펠러 간격 중간 위치, 프로펠러 후방에서 시간 평균된 각 속도 성분( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ )을 나타낸 그림으로, 일반적으로 축방향 속도 성분 ( $V_x$ )은 가이드베인 전방에서는 유입 속도크기로 일정하다가(Fig.11(1)) 가이드베인을 지나고(Fig.11(2)) 프로펠러를 지나면서(Fig.11(3)) 프로펠러의 흡입력에 의해 축방향 속도 성분이 점차 증가함을 알 수 있다. 회전방향 성분( $V_y$ )은 가이드베인 전방에서는 영으로 회전성분 없이 유입되다가 프로펠러 후방에서는 프로펠러의 회전영향에 의해 큰 회전성분을 가지고 유출됨을 알 수 있다. 반경 방향 성분( $V_z$ )은 가이드 베인 전방에서는 Fig. 11(a)에서 보듯이 외부 덕트 영향으로 반경이 클수록 안쪽으로 유입되는 반경방향 속도 성분을 확인할 수 있고, 이 크기는  $r/R$ 이 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 그러나 이 성분은 프로펠러 후방에서는 거의 소멸됨을 알 수 있다(Fig. 11(3)참조). Fig.12는 프로펠러 후류에서의 유선을 나타내고 있는데, Fig.11(3)에서 보았듯이 프로펠러 후류의 속도성분에서 매우 강한 회전 성분이 남아 있어서 이 그림에서 강한 swirl현상을 볼 수 있다. 그리고 Fig.

11(3) (a)의  $r/R = 0.3$  일 때가 Fig. 11 (3) (d)의  $r/R = 0.9$  일 때보다 접선속도 성분인  $V_t$ 가 크다. 따라서 허브쪽에서 훨씬 강한 swirl 현상을 확인할 수 있고 이것은 궁극적으로 허브 보텍스 현상으로 나타나고 있다.

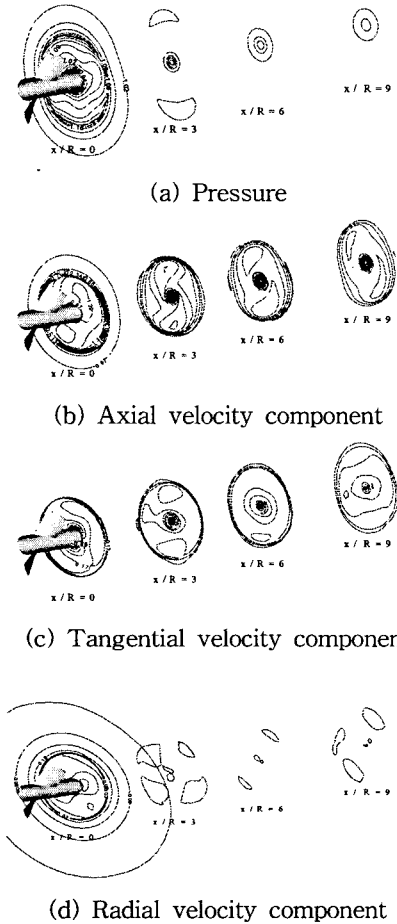


Fig. 13 Contours of pressure and velocity components in the downstream region

Fig. 13은 프로펠러 후류에서의 압력과 각 속도성분이 후류로 흘러갈수록 원거리 유입상태의 크기로 복원되어 가는 과정을 보여주고 있으며, 대체적으로 프로펠러 반경의 9배 위치에서 거의 완전히 복원되었음을 알 수 있다.

다음으로 프로펠러의 성능을 계산하기 위해 추력계수( $K_T$ ), 토크계수( $K_Q$ )와 추진효율( $\eta$ )을 다음 식에 의해 계산하였다.

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

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

여기서  $T$ 와  $Q$ 는 추력과 토크이다. 그리고,  $n$ 은 회전수(rps)를 의미하여  $D$ 는 로터의 직경이고  $J$ 는 전진비를 의미한다. 이 계산에 의하면  $K_T = 0.104$  이고  $K_Q = 0.024$  이며  $\eta = 0.565$ 로 계산되어진다. 본 덕트 프로펠러의 경우 추진효율이 보통의 프로펠러에 비해 낮은 이유는 가이드 베인이 일정한 피치(constant pitch)로 되어있어서 프로펠러 후류의 회전 속도 성분을 충분히 상쇄시켜 주지 못하였기 때문이며, 만약 가이드베인의 피치가 반경방향으로 변하면서(variable pitch)프로펠러 후류의 회전 성분을 상쇄시켜 줄 수 있도록 잘 설계되었다면 효율이 상당히 상승할 것이다.

### 3. 결론

본 연구는 가이드베인과 프로펠러의 상호 작용을 포함하는 덕트 프로펠러 주위의 유동을 해석하기 위해 3차원 비압축성 RANS 방정식을 풀었다. 정지해 있는 가이드베인과 일정한 각속도로 회전하고 있는 프로펠러의 다중블럭 격자의 경계를 효율적으로 다루기 위해 3차 스플라인 보간법을 이용한 슬라이딩 격자기법을 적용하였다. 코드를 검증하기 위해 단단(single-stage) 터빈 유동을 해석하였으며 시간 평균압력 계수를 실험치와 비교하여 좋은 결과를 얻었다. 코드 검증이 끝난 후 가이드 베인과 프로펠러를 가지고 있는 덕트 프로펠러 주위의 유동을 해석하여 유동현상을 물리적으로 파악할 수 있었으며 수력학적 계수를 계산하였다.

### 후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단 조선공학 연구센터의 지원으로 수행되었다.

### 참 고 문 헌

[1] Zierke, W.C., Straka, W.A., Taylor, P.D., "An

- experimental investigation of the flow through an axial-flow pump," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.117, (1995), p.485-490.
- [2] Zierke, W.C., Straka, W.A., "Flow visualization and the three-dimensional flow in an axial-flow pump," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.12(2), (1996), p. 250-259.
- [3] Hassan, K.K., Abdallah, S., and Lee, Y.T., "Three-dimensional solutions for incompressible turbulent flow in a high Reynolds number pump," *ASME-FED*, Vol.227, (1995), p.109-116.
- [4] Lee, Y.T., Hah, C., Loellbach, J., "Flow analyses in a single-stage propulsion pump," *ASME 94-GT-139*, (1994).
- [5] Sheng, C., Chen, J.P., Taylor, L.K., Jiang, M.Y., Whitfield, D.L., "Unsteady multigrid method for simulating 3-D incompressible Navier-Stokes flows on dynamic relative motion grids," *AIAA Paper 97-0446*, (1997).
- [6] Kerwin, J.E., Kinnas, S.A., Lee, J.T., and Shih, W.Z., "A surface panel method for the hydrodynamic analysis of ducted propellers," *Trans. SNAME*, Vol.95, (1987).
- [7] Kinnas, S.A., Coney, W.B., "The generalized image model an application to the design of ducted propellers," *Journal of Ship Research*, Vol.36(3), (1992), p. 197-209.
- [8] Hughes, M.J., "Analysis of multi-component ducted propulsors in unsteady flow" Ph. D. Thesis, Department of Ocean Engineering, MIT, (1993).
- [9] Park, W.G., and Sankar, L.N., "Numerical simulation of incompressible viscous flow around a marine propeller," *AIAA Paper 93-3503*, (1993).
- [10] Park, W.G., Kim, H.W., Jung, Y.R., Kim, K.S., Park, E.D., "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, (1996), p. 257-267.
- [11] 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(3), (1998), p.477-479.
- [12] 정영래, "로터-스테이터 상호작용이 포함된 수중 추진기의 Tip 간극 변화에 따른 유동특성에 관한 수치해석 연구," 박사학위 논문, 부산대학교, (2002).
- [13] Dring, R.P., Joslyn, H.D., Hardin, L.W., and Wanger, J. H., "Turbine rotor-stator interaction," *Journal of Engineering for Power*, Vol.104, (1982), p.729-742.