

워터제트 추진시스템의 유동 및 성능 해석

장진호*, 박원규†**, 전호환**, 김문찬**

부산대학교 기계공학부*
부산대학교 조선해양공학과**

Flow and Performance Analysis of Waterjet Propulsion System

Jin-Ho Jang*, Warn-Gyu Park†**, Ho-Hwan Chun** and Moon-Chan Kim**

School of Mechanical Engineering, Pusan National University*
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University**

Abstract

The numerical analysis of a waterjet propulsion system was performed to provide detail understanding of complicated flow phenomena including interactions of intake duct, rotor, stator, and contracted discharge nozzle. The incompressible RANS equations were solved on moving multiblocked grid system. To handle interface boundary between rotor and stator, the sliding multiblock method was applied. The numerical results were compared with experiments and good agreement was obtained. The complicated viscous flow features of the waterjet, such as secondary flow inside the intake duct, the recovery of axial flow by the role of the stator, and tip and hub vortex, etc. were well analyzed by the present simulation. The performance of thrust and torque was also predicted.

※Keywords: Waterjet propulsor (워터제트 추진), RANS equations (RANS 방정식), Sliding multiblock technique (슬라이딩 다중격자기법), Propulsive performance (추진 성능)

1. 서 론

워터제트 추진시스템은 높은 추진 효율, 좋은 기동성 그리고 낮은 소음과 진동으로 인해 30-35 노트를 초과하는 고속선박에서 널리 사용되고 있다. 또한 워터제트 유입관의 단면적이 임펠러 부

분에서 점차 확대되어짐에 따라 임펠러 표면의 정압력 증가로 인해 공동이 자연되거나 줄어들 수 있다. 워터제트 추진시스템은 군사용으로는 수륙양용선이 강이나 해안에 상륙할 때 사용되고 있는데, 특히 얇은 물에서 높은 추진효율과 탁월한 기동성을 가지고 있기 때문이다. 워터제트 추진에 관련하여 대부분의 연구들은 지난 10년간 실험에 의해 수행되어 졌고 수치 해석에 의한 연구는 거의 없었다. 그러나 최근에는 수치적 알고리즘 개발과 컴퓨터 하드웨어의 진보로 CFD를 적용한 연

접수일: 2004년 7월 14일, 승인일: 2004년 8월 30일

† 주저자, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2457

구가 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 그럼에도 불구하고 CFD를 적용한 연구들은 대부분 유입덕트(Waston 1998, Roberts/Walker 1998, Verbeek/Bulten 2001)에 국한되어 있으며 워터제트 임펠러에 대해서 소수의 연구만이 수행되어졌다(Allison et al. 1988, Taylor et al. 1998, Hu/Zangeneh 2001). 즉, CFD를 적용한 위의 연구들은 유입 덕트나 워터제트의 개별적 단품만 해석하였으며 유입 덕트, 로터, 스테이터 그리고 방출 노즐로 구성되어 있는 전체의 워터제트 추진 시스템을 해석하지 못하였다. 그러나 워터제트의 각각 구성 요소들은 서로 간의 강한 상호작용을 가지고 있기 때문에 워터제트의 성능을 정확하게 분석하기 위해서는 통합된 전체 시스템을 통째로 해석하여야 할 것이다. 국내 관련 연구의 실험으로는 워터제트에 대한 성능분석(김기섭 등 1997, 최군일 2001)이 있으며 전산해석분야에는 유입덕트에 대해 포텐셜 유동 해석(문일성 등 1997, 안봉환 등 2000)과 점성 유동 해석(왕정용 등 2001, 윤현석 등 2002)이 있었다. Park et al.(2002)에 의해서는 로터와 스테이터의 상호작용을 고려한 워터제트 시스템에 대한 해석이 수행되어졌다.

본 연구의 목적은 통합된 워터제트의 전체 추진 시스템에 대해 유동장과 성능을 해석하는 것이다.

2. 지배방정식 및 수치해석방법

3차원 비압축성 점성유동의 지배방정식은 N-S 방정식으로서, 이를 무차원화한 후 일반화된 곡선 좌표계로 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(Iterative Time marching) 방법(Park/Sankar 1993, Park et al. 1998, Park et al. 2004)을 사용하였다. 이 방법에서 연속방정식은 MAC 방법(Vicelli 1969)에 의해, 운동량 방정식은 시간 행진 방법에 의해 풀어

진다. 그리고 대류항은 QUICK 방법(Leonard 1979)을 사용하여 공간차분을 하였으며, 점성항과 연속방정식은 중앙차분을 이용하였다. 또한 난류 유동장 해석을 위해 저 레이놀즈 $k-\epsilon$ 모델(Chien 1982)을 사용하였다. 임펠러의 로터와 스테이터 간의 상대운동을 해석하기 위해 슬라이딩 다중격자기법(Park/Park 1997)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

반복 시간 행진 방법을 Fig. 1에서 보는 것과 같이 4개의 로터와 9개의 스테이터로 구성되어 있는 워터제트 추진시스템의 유동에 적용하였다.

이 워터제트에 대해서는 ITTC 1996 표준 실험 방법에 따라 궤도차량에 대한 실험(전호환 등 2001)이 이루어 졌으며 이 실험결과와 본 연구에 의한 계산결과를 비교하고자 한다. 실험은 선체가 $4.23m/s$ 의 속도로 진행할 때 수행되어 졌으며 유입덕트를 통한 평균 유입속도는 $1.2m/s$ 이고 로터는 4000rpm으로 회전한다. $r = 0.7R$ 에서의 유입류 및 로터의 국부 회전속도를 벡터 합으로 취한 전체속도(total velocity)와 익현 길이(chord length)를 기준으로 한 레이놀즈 수는 4.3×10^5 이다. 그리고 입구유입 속도비(inlet velocity ratio, IVR)는 2.838으로 IVR은 다음과 같이 정의된다.

$$IVR = \frac{V_{in}}{V_{\infty}} \quad (2)$$

여기서 V_{in} 은 임펠러 면에서의 유입속도를 의미하며 V_{∞} 는 선속을 의미한다. 유동 해석에 사용된 격자계는 Fig. 2와 같다. 격자계 및 계산에서 회전축의 영향은 격자생성의 난해함으로 인하여 배제하였으며 유입덕트의 격자수는 $60 \times 30 \times 60$ 이고 로

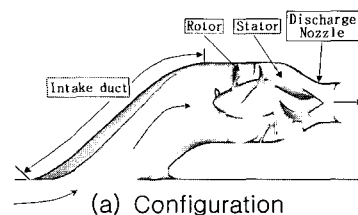


Fig. 1 Configuration of waterjet propulsor

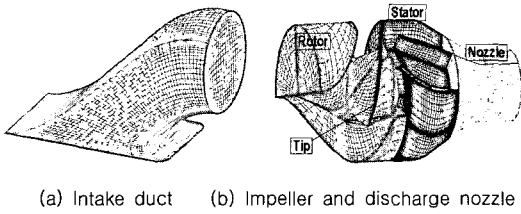


Fig. 2 Grid system of the waterjet

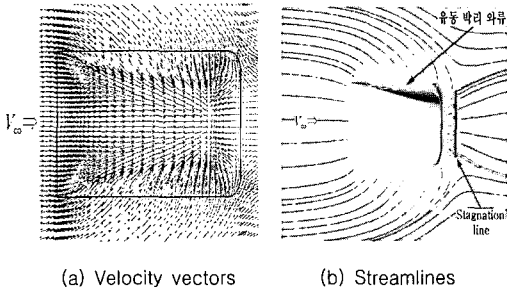


Fig. 3 Flow features at inlet of intake duct

터와 스테이터의 각 블록 격자수는 각각 $63 \times 25 \times 35$ 와 $55 \times 21 \times 35$ 이다. 또한 날개 끝 간극의 격자수는 $69 \times 8 \times 8$ 이고, 방출 노즐은 $20 \times 61 \times 29$ 의 격자수를 가지고 있다.

Fig. 3은 유입 덕트 입구 단면에서의 유동장을 보여주고 있다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 워터제트의 강력한 흡입력에 의해 유입되는 덕트 입구유동을 볼 수 있으며 특히 양쪽 측면을 통해서도 많은 유량이 빨려 들어가고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)에서의 유선 그림에서 유입덕트 입구 근처의 유동 현상을 이해할 수 있으며 양쪽 측면에서 유입되는 강력한 유입류는 입구의 코너(corner)의 유동 박리에 기인하는 와류 발생도 확인할 수 있다. 이들 유동은 Allison(1993)의 스케치에서 언급한 유동 현상과 일치한다.

Fig. 4는 유입덕트의 대칭면에서 그린 유선으로써 lip면 상부 형상의 급격한 기울기 변화에서 기인하는 유동 박리를 볼 수 있다. 또한, lip면 하부에서는 정체점의 위치를 확인할 수 있으며 정체선(Stagnation line)은 Fig. 3(b)에 나타나 있다. Fig. 4에서 정체점을 연결하는 유선(유선 A-B)의 윗쪽에 해당하는 유량만 유입 덕트 내부로 빨려들어감으로 정체점의 위치가 유입 덕트의 유입 질량에

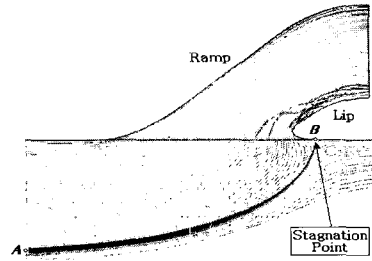
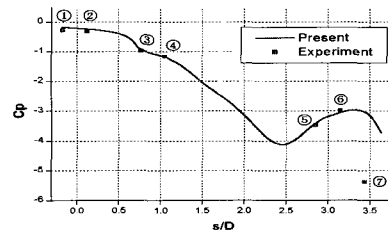
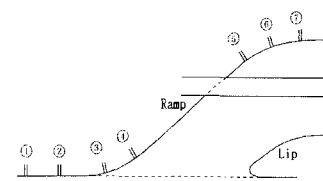


Fig. 4 Streamlines in the symmetry plane of intake duct



(a) Surface pressure distribution along the ramp

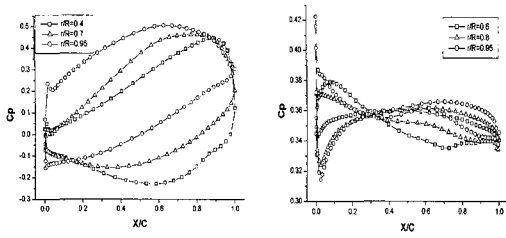


(b) Locations of pressure tap

Fig. 5 Surface pressure along the ramp, compared with experiment

직접 관계한다. 그러므로 lip면 하부의 어느 위치에 정체점이 위치하는가가 워터제트의 성능에 중요한 역할을 하게 된다.

Fig. 5(a)는 Fig. 5(b)의 위치에서 측정된 ramp면의 표면 압력을 실험결과(전호환 등 2001)와 비교한 그림으로써 현재의 수치결과가 실험과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 로터와 스테이터의 표면에서 시간 평균한 표면압력계수를 나타내고 있다. Fig. 6(a)에서 로터의 뒷날(trailing edge) 쪽으로 가면 갈수록 압력이 높아지는 경향은 임펠러 앞날부터 뒷날까지 점차적으로 수두가 증가하며 아울러 유로폭이 줄어들기 때문이다.



(a) On the rotor (b) On the stator

Fig. 6 Surface pressure distribution

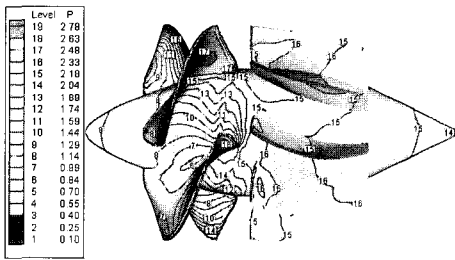
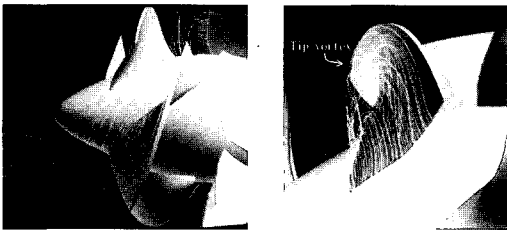
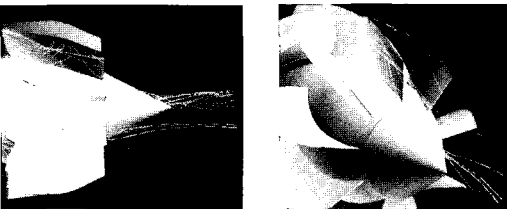


Fig. 7 Surface pressure contours



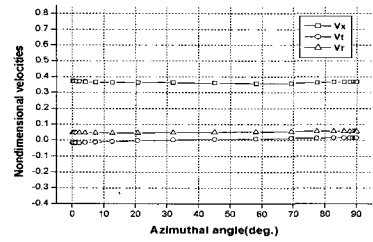
(a) Side view (b) Near the rotor blade

Fig. 8 Streamlines past the rotor

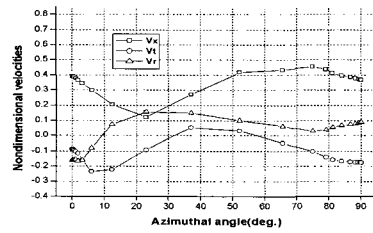


(a) Side view (b) Rear view

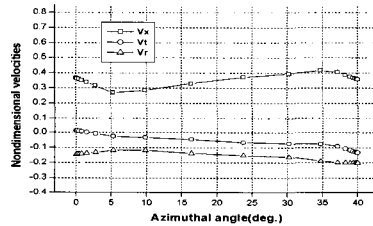
Fig. 9 Streamlines past the stator



(a) ahead of the face of rotor impeller



(b) in the gap between rotor and stator



(c) behind the stator

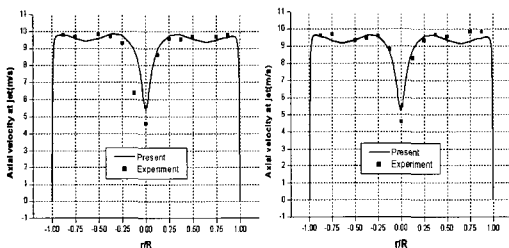
Fig. 10 Velocity components at $r/R=0.7$

Fig. 7는 워터제트 임펠러의 표면 등압력선도를 나타낸다. 일반적으로, 로터의 회전에 의한 원심력과 외부 케이싱의 역할 때문에 날개 끝 방향 쪽으로 가면 갈수록 높은 압력을 보여주고 있다. Fig. 8은 로터 근처의 유선을 보여주고 있으며, 날개 끝 와류(tip vortex)가 분명하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9은 스테이터를 지나는 유선을 나타내며 스테이터의 압력면에서 흡입면으로 향하는 유동에 의해 발생하는 passage 와류와 같은 현상을 관찰할 수 있으며 또한 허브 와류(hub vortex)도 분명하게 나타나고 있다. Fig. 10는 로터의 전방, 로터와 스테이터 사이, 그리고 스테이터 후방에서 축방향(v_x), 접선방향(v_t), 그리고 반경방향(v_r)의 속도 성분들을 나타낸다. 여기서 모든 속도 성분들은 $r = 0.7R$ 의 전체 속도에 의해서 무차원화된 값들이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 임펠러에 유

입되는 유동은 비교적 균일한 속도장(Fig. 10(a)) 이 로터를 지나면서 로터의 회전에 의해 접선방향의 속도가 급격히 증가하였음을 알 수 있다(Fig. 10(b)). 이 유동은 다시 스테이터를 지나면서 접선방향의 속도가 거의 소멸되어 빠져나오고 있는 것(Fig. 10(c))을 알 수 있다. Fig. 11은 노즐 출구에서 수평방향과 수직방향의 속도를 보여주고 있으며 실험(전호환 등2001)과 비교하였는데 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 여기서 $r/R=0$ 은 방출 노즐의 중심축을 의미한다.

Table 1은 유입 덕트의 입구와 노즐 출구의 모멘텀 플럭스(momentum flux)를 실험과 비교한 것이며, Table 2는 로터의 토오크와 추력에 대해 실험 결과를 비교한 것이다. 이들 Table에서도 계산 결과가 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) Along the horizontal axis (b) Along the vertical axis
Fig. 11 Velocity profile at exit plane

Table 1 Comparison of momentum flux

	Experiment	Present	Relative Error
Entrance of intake duct	9.8	10.1	3.1%
Exit of discharge nozzle	88.9	90.2	1.5%

Table 2 Comparison of hydrodynamic performance of rotor

	Experiment	Present	Relative Error
K_T	N/A	0.59	N/A
$10 \times K_Q$	1.17	1.21	3.42%

4. 결론

워터제트 추진시스템의 유입 덕트 유동, 로터-스테이터 상호작용, 그리고 수축하는 방출노즐 유동을 포함하는 복잡한 유동 현상을 이해하기 위해 전산 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 비압축성 RANS 방정식을 슬라이딩 다중 격자기법과 반복 시간행진 방법을 이용하여 계산을 수행하였으며 본 연구결과를 실험결과와 비교함으로써 개발된 코드의 타당성을 입증하였다. 곡선 모양의 유입 덕트에 의해 비균일 유동장이 임펠러로 유입되고 있음을 알 수 있었다. 그리고 로터의 회전에 의해 큰 접선 성분의 속도를 가지는 유동은 스테이터의 작용에 의해서 다시 거의 균일한 유동으로 복원되어 유출되고 있음을 알 수 있었다. 또한 입구에서의 강한 흡입 유동, 유입 lip면에서의 유동 박리, 스테이터의 passage 와류, 허브 와류, 그리고 날개 끝 와류 등과 같은 복잡한 유동 현상을 잘 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 김기섭, 송인행, 안종우, 문일성, 1997, "Pod 형 물분사 추진장치 성능시험 연구", 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 21-30.
- 문일성, 이창섭, 송인행, 김기섭, 1997, "패널법에 의한 물 분사 추진장치의 성능해석", 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제4호, pp. 31-41
- 안봉환, 최희중, 전호환, 차상명, 2000, "궤도차량용 물분사 추진 시스템 주위의 포텐셜 유동해석", 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 118-121.
- 왕정용, 전호환, 차상명, 2001, "궤도차량용 물분사추진기 관내 유동계측 및 점성유동해석", 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp.

- 191-194.
- 윤현석, 박원규, 김경천, 전호환, 김문찬, 2002, "워터제트용 유입덕트 유동의 전산 및 실험해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 277-280.
 - 전호환, 안봉환, 차상명, 2001, "물분사추진 케도차량의 자항성능시험 및 해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 146-150.
 - 최균일, 2001, "ITTC WATERJET 추진 표준화 시험," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 263-266.
 - Allison, J. L., 1993, "Marine Waterjet Propulsion", SNAME Transaction, Vol. 10, pp. 275-335.
 - Allison, J. L., Jiang, C., Athavale, M. M., Kerwin, J. and Taylor, T., 1988, "Modern Tools for Waterjet Pump Design and Recent Advances in the Field, International Conference on Waterjet Propulsion II, RINA, Amsterdam, Netherlands.
 - Chien, K. Y., 1982, "Prediction of Channel and Boundary-Layer Flows with a Low-Reynolds Number Turbulence Model," AIAA Journal, Vol. 20, pp. 33-38.
 - Hu, P. and Zangeneh, M., 2001, "CFD calculation of the Flow Through a Waterjet Pump", International conference on Waterjet Propulsion III, RINA, Gothenborg, Sweden.
 - Leonard, B. P., 1979, "A Stable and Accurate Convective Modeling Procedure Based on Quadratic Upstream Interpolation," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 19, pp. 59-98.
 - Park, W. G. and Sankar, L. N., 1993, "An Iterative Time Marching Procedure for Unsteady Viscous Flows", ASME-BED, Vol. 20, pp. 281-284
 - Park, W. G. and Park, Y. J., 1997, "Numerical study of compression wave produced by high speed train entering into a tunnel", ASME FEDSM'97.
 - 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, No. 3, pp. 477-479.
 - Park W. G., Chun H. H., and Jun J. G. 2002, "Experimental and CFD Analysis for Rotor-Stator Interaction of a Waterjet Pump", 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan, pp. 98-111.
 - Park, W. G., Jung, Y. R., and Kim, C. K., 2004, "Numerical Flow Analysis of Single-Stage Ducted Marine Propulsor", To Be Published, Ocean Engineering.
 - Roberts, J. L. and Walker, G. J., 1998, "Boundary Layer Ingestion Effects in Flush Waterjet Intakes", International Conference on Waterjet Propulsion II, RINA, Amsterdam, Netherlands.
 - Taylor, T.E., Kerwin, J.E. and Scherer, J.O., 1998, "Waterjet Pump Design and Analysis Using a Coupled Lifting Surface and RANS Procedure", International Conference on Waterjet Propulsion II, RINA, Amsterdam, Netherlands.
 - Verbeek, R. and Bulten, N. W. H., 2001, "Interpretation of Model Scale Test Results with Aid of CFD Calculations", International Conference on Waterjet Propulsion III, RINA, Gothenborg, Sweden.
 - Viacelli, 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.
 - Watson, S. J. P., 1998, "The Use of CFD in Sensitivity Studies of Inlet Design", International Conference on Waterjet Propulsion III, RINA, Gothenborg, Sweden.



< 장진호 >



< 박원규 >



< 전호환 >



< 김문찬 >