

선박 워터제트 추진기 덕트 내부의 난류유동 해석에 관한 연구

박일룡*, 김우진*, 안종우*, 김기섭*

Computational study on turbulent flows inside the duct of marine waterjet propulsor

Il-Ryong Park*, Wu-Joan Kim*, Jong-Woo Ahn*, Ki-Sup Kim*

Key Words : Waterjet intake duct, Turbulent flows, RANS equation, Realizable k- ϵ model, IVR

Abstract

CFD calculations are carried out to investigate the turbulent flow characteristics inside the duct of marine waterjet propulsors. The Reynolds-averaged Navier-Stokes equations are solved using a finite-volume method. Standard k- ϵ model and realizable k- ϵ model are evaluated with an existing experimental data. Multi-block grid topology is adopted to describe the details of complex duct geometry. The present numerical methods are applied to the preliminary duct design of new waterjet propulsor system. Four different influx conditions are simulated to find out pressure and velocity distribution inside the intake duct. Attention is also paid upon the possible flow separation inside the waterjet duct. It is found that CFD tools can be used for the initial evaluation of inflow condition into the impeller of waterjet propulsor system.

1. 서 언

선박의 고속화를 실현하기 위해서는 추진기의 성능향상은 물론 새로운 추진시스템의 개발이 필수적이다. 기존의 프로펠러를 이용한 추진시스템은 고속회전 상태에서 일어나는 날개 표면에서의 압력저하로 인한 캐비테이션 현상 때문에 효율저하와 침식이 발생하는 등, 그 적용에 한계가 있다. 워터제트 추진기는 고속 선박에 적합한 추진시스템의 한 형태로서 일반 프로펠러 추진기보다 캐비테이션 특성이 좋으며, 고속에서 추진효율이 증가하는 특성과 탁월한 조종성능 등의 장점을 가지고 있다. 워터제트 추진시스템은 높은 제작비, 중량 그리고 저속에 낮은 추진효율을 가진다는 단점을 가지고 있지만 최근에 고속함정이나 여객선 등의 추진기로 많이 탑재되고 있으며, 대형화 추세로 발전하고 있다. 이러한 워터제트 추진기에 대한 국내외의 연구결과를 참고문헌[1, 2, 3, 4]에서 찾아볼 수 있다.

본 논문은 워터제트 추진기 초기설계 단계에서 CFD 기법을 이용하여 설계된 덕트 내부의 유동현상을 미리 파악함으로써 설계인자에 대한 특성을 조사한 내용을 담고있다. 워터제트 intake duct의 형상은 임펠러(impeller)에 유입되는 유동의 성격을 결정하고 또한, 덕트에 작용하는 유체력은 선박의 자세 변화와 저항 등에 영향을 미치는 힘의 요소로 작용하게 된다. 수치계산을 통해 얻어진 유동특성과 유체력의 추정결과를 덕트 형상에 대한

설계에 미리 반영한다면 모형시험을 수행하기 전에 성능해석이 가능하기 때문에 최적 형상에 대한 설계 비용과 소요 시간을 줄일 수 있다.

덕트 내의 유동이 난류 유동이기 때문에 유동의 지배방정식인 RANS 방정식(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations)을 유한체적법을 사용하여 해를 구하였다. 공학적인 설계를 위해 널리 사용되고 있는 two-equation turbulence model 중, 본 연구에서는 standard k- ϵ 모형과 realizable k- ϵ 모형[5]을 사용하였다. 수치계산 기법의 검증에 대해 Roberts[3]의 워터제트 덕트에 대한 실험과 그의 계산결과를 본 연구의 수치계산 결과와 비교하였다. 그리고 실제 워터제트 추진기의 개발을 위해 초기 설계된 형상에 대하여 네 가지의 유량조건에 대한 수치계산을 수행하였으며, 계산 결과의 검토를 통한 성능해석을 시도하였다. 이러한 결과들을 통해 워터제트 추진기의 성능해석에 있어 CFD 기법의 유용성을 살펴보았다.

2. 수치계산 방법

수치계산을 위한 기본 좌표계로는 워터제트 추진기를 장착한 선박의 진행방향과 반대방향인 수평방향을 x, 중력과 반대방향인 연직 상방향을 z로 하는 Cartesian 직교 좌표계를 사용하였다. 지배방정식은 비압축성 난류 유동의 지배 방정식인 RANS 방정식과 연속 방정식을 사용하였다. 계산에 사용된 모든 변수

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, irpark@kriso.re.kr

들은 배의 속도 V_S , 워터제트 intake duct exit의 직경 D_{IN} , 그리고 유체의 밀도로 무차원화 되었다. Turbulent eddy viscosity는 standard $k-\epsilon$ (SKE) 모형과 realizable $k-\epsilon$ (RKE) 난류모형을 사용하여 결정하였는데, 두 난류모형에 의한 차이는 다음절에서 설명하고 있다.

지배방정식의 해는 선체주위 유동해석을 위해 개발되었던 유한체적법[6]을 이용하여 구하였다. 시간적분법으로는 Euler implicit법을 사용하였다. 운동량 이송 방정식의 대류항과 확산항은 QUICK 방법과 중앙 차분법을 이용하여 각각 이산화하였다. 속도-압력의 연성을 위해서 SIMPLEX 방법을 사용하였으며, 이산화된 대수방정식의 해는 Strongly-Implicit-Procedure 기법을 사용하여 구하였다. 자세한 수치계산 기법은 참고문헌[6]에 설명되어 있다.

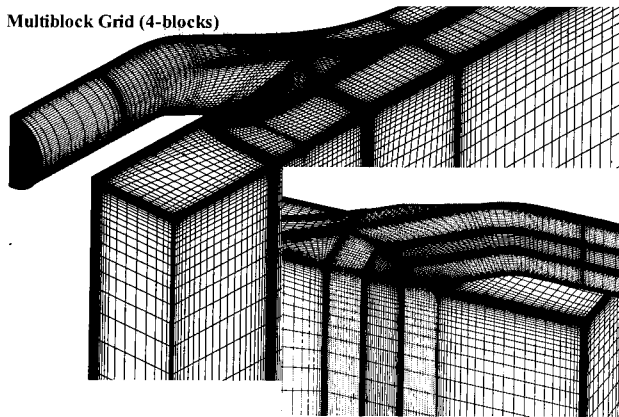


Fig. 1 Partial view of four-block grid system for waterjet duct flow simulation.

3. 수치계산 결과의 검증

본 논문에서 사용하고 있는 수치계산 방법의 검증을 위해 Roberts[3]가 실험한 워터제트 덕트에 대한 계산을 수행하여 실험과 비교하였다. 흔히 워터제트의 성능해석에서는 주어진 선박의 속도(V_S)에 대한 워터제트 intake duct를 통해 임펠러로 유입되는 평균 유속(V_{IN})의 비(ratio)를 $IVR(=V_{IN}/V_S)$ 로 정의하고, 이를 설계인자로 사용한다. 즉, 이 때, $V_{IN}(=IVR \times V_S)$ 가 워터제트 덕트를 지나는 유동의 bulk velocity가 된다. 흔히 워터 터널에서 실험을 수행하기 때문에 선속 V_S 는 워터터널의 유속을 의미한다고 할 수 있다. Roberts[3]의 실험에서는 IVR 이 0.59로 정해졌으며, 덕트를 따라 표면에서의 압력을 계측하였다. 실험은 선속 V_S 와 덕트의 임펠러 쪽 exit에서의 직경 D_{IN} 를 기준으로 정의한 레이놀즈수 1.27×10^5 의 조건에서 수행되었다. 본 연구에서는 난류모형의 영향을 살펴보기 위해 standard $k-\epsilon$ 모형과 realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용하여 계산을 수행하였고, 그 결과를 비교하였다.

수치계산을 위해 Roberts[3]의 워터제트 intake duct에 대한 실험 유동장의 크기에 해당하는 $1.33m \times 0.2m \times 0.5m$ 의 영역에 대한 격자계를 생성하였다. 모든 격자계는 유동의 대칭성을 고려하여 워터제트 덕트와 터널의 반쪽에 해당하는 부분만을 구성하였다. Fig. 1에서는 Roberts[3]의 덕트에 대한 격자계 모습을 보여주고 있다. 4개의 블록으로 이루어져 있으며, 각 블록 내에서 각각 $54 \times 21 \times 50$, $31 \times 21 \times 109$, $69 \times 21 \times 109$, $126 \times 26 \times 26$ 개의 격자를 분포하였다.

수치계산 결과를 Roberts[3]의 실험에서 계측된 압력 분포와 Fig. 2에 비교하였다. 덕트의 ramp면의 시작점을 원점으로 하여

ramp면의 중심선을 따른 시작점으로부터의 거리에 대한 압력의 분포를 $0.5\rho V_S^2$ 으로 무차원화 하여 도시하였다. 논문의 계산결과와 Roberts[3]의 실험 그리고 그의 계산결과를 서로 비교한 그림이다. 여기서 Roberts의 수치계산 결과는 유한요소법과 RNG $k-\epsilon$ 난류모형을 사용한 상업용 수치계산 프로그램인 FIDAP을 사용하여 얻어진 결과이다.

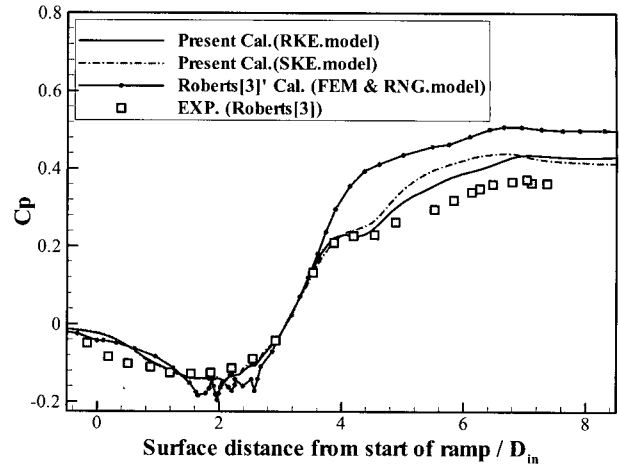


Fig. 2 Comparison of calculated pressure distributions along the ramp center-line with Roberts' results[3]

본 연구에서 얻어진 수치계산 결과들이 Roberts의 계산보다 대체로 실험결과와 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림에서 ramp면이 경사를 가지는 굴곡 부는 ramp시작점에서 거리 1.6 지점에서 6.4 부근인 영역이다. 특히 이 영역에서는 intake duct exit쪽으로 가면서 덕트의 단면의 변화를 동반하면서 ramp면을 따라 유입된 유체의 운동이 복잡해지는 부분이다. 특히 중간 위치 정도 되는 부분인 약 4.2 거리 이후, intake duct의 exit쪽으로 갈수록 realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용한 결과가 standard $k-\epsilon$ 난류모형보다는 실험에 더욱 근접한 것을 볼 수 있다. 다음절에 기술한 실제 설계모형에 대한 수치계산에서는 realizable $k-\epsilon$ 모형[5]을 사용하여 수치계산을 수행하였다.

4. 설계 모형에 대한 수치계산 결과

KRISO에서 워터제트 추진시스템 개발을 위해 초기설계된 워터제트 덕트 내부의 유동해석을 수행하였다. 실제 실험을 수행할 KRISO 캐비테이션 터널과 같은 재원($2.6m \times 0.6m \times 0.6m$)에 해당하는 격자계를 생성하였으며, 5개의 블록으로 이루어져 있으며, 각 블록 내에서 $99 \times 15 \times 25$, $49 \times 20 \times 40$, $27 \times 20 \times 40$, $25 \times 20 \times 78$ 그리고 $63 \times 20 \times 78$ 의 격자를 구성하였다.

본 연구에서 설계된 덕트에 대한 유동해석은 선박의 속도 $V_S=5.54m/s$ 에 대한 레이놀즈수 $Re=5.54 \times 10^5$ 으로 고정하고, $IVR=0.6, 0.672, 0.8$ 그리고 1.1 의 유동조건에서 각각 계산하였다. 참고로 $IVR=0.672$ 을 설계점으로 정하고 있다.

워터제트로부터 충분히 멀리 떨어진 상류 방향에 위치한 터널의 유입 경계면에 선박의 속도에 해당하는 유입속도를 균일하게 분포하였다. 유출 경계조건이 적용되는 워터제트의 intake duct exit면은 IVR 조건에 의해서 주어진 유량에 대한 유출경계조건이 부과되었으며, 유동장 하류의 터널 유출 경계면에서는 유입유량에 대해 워터제트 intake duct를 통해 유출된 유량을 뺀 유량이 나가도록 하였다. 유입, 유출 그리고 대칭경계면을 제외한 모든 경계면에서는 벽면 조건을 사용하였다.

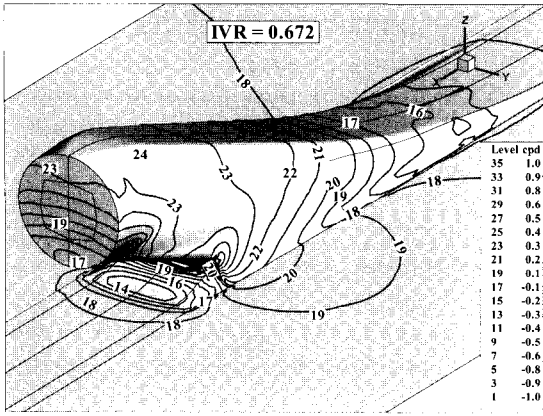


Fig. 3 Surface pressure distribution at IVR=0.672

설계 조건인 IVR=0.672에서의 intake duct 표면에서의 압력 분포를 Fig. 3에 보이고 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 4가지 IVR의 조건에서 계산된 덕트의 ramp와 lip면의 시작을 원점으로 덕트의 ramp와 lip면의 중심선을 따른 시작점으로부터의 거리에 대한 압력분포를 서로 비교한 그림이다. Fig. 4를 살펴보면, ramp면의 시작지점으로 유입되는 유속과 경계층은 거의 비슷하기 때문에 그 부근에서 압력분포는 비등한 것을 볼 수 있다. 곡선 부를 거쳐 duct exit 방향으로 접근하면서 전체적으로 ramp면의 압력이 높아지고 있으며, IVR값이 작을수록 높은 압력을 가지는 것을 볼 수 있다.

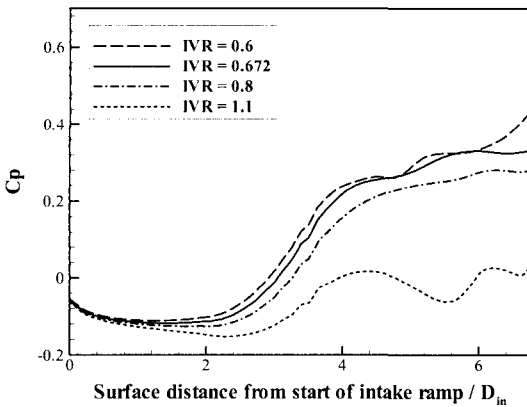


Fig. 4 Computed ramp center-line pressure distributions

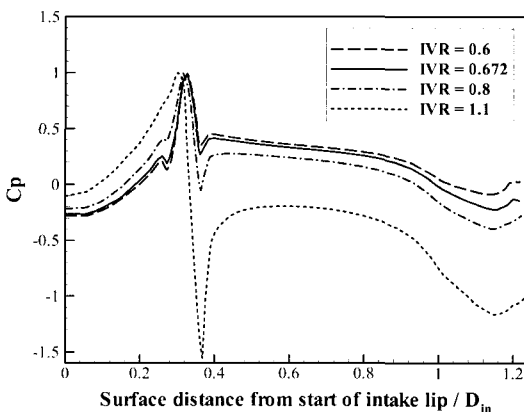


Fig. 5 Computed lip center-line pressure distributions

Fig. 5에서는 IVR의 변화에 따라 lip면에서 정체점의 위치가 변하는 것을 볼 수 있으며, 정체점 근처 영역에서 압력의 변화가 큰 것을 볼 수 있다. 또한 정체점을 기준으로 IVR의 변화에 따라 압력크기가 서로 반대되어 나타나고 있다. 유동현상이 크게 변하는 이 면에 대한 형상설계는 매우 중요하므로 이러한 수치계산을 통해 유동특성을 확인해 보아야 할 것이다. Intake duct exit으로 이동하면서 전반적으로 lip면 즉, 워터제트 덕트 단면의 아래 면을 통한 유속이 빠르므로 ramp면보다 압력이 대체로 낮아지는 현상을 볼 수 있다. 특히 lip 근처에서 압력이 지나치게 낮아지게 되면 캐비테이션 현상이 일어날 수 있으므로 초기 설계 단계에서 이에 대한 고려가 필요하다고 하겠다.

Fig. 6에서는 IVR=0.6인 조건에서의 유선을 보이고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 무차원 길이 3~4 사이에서 강한 역 압력 구배가 존재한다. 이로 인하여 Ramp의 시작점에서 무차원 거리 약 4.2 위치에서 유동박리 현상이 예측되었다. 설계점이 IVR=0.672이므로 이 보다 낮은 IVR에서는 현재의 설계 모형에서는 ramp면에서 유동박리가 발생할 우려가 있다는 것을 알 수 있다.

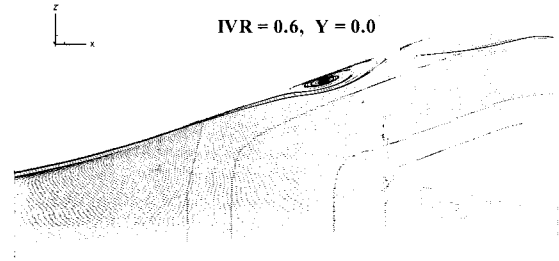


Fig. 6 Streamlines at centerplane of intake duct with IVR=0.6

Fig. 7은 수치계산 결과를 이용하여 터널부분을 뺀 워터제트 덕트의 표면에 작용하는 계산된 압력과 마찰력들을 적분하여 $0.5\rho V_0^2 S$ 로 무차원한 수평방향과 수직방향의 작용력 계수를 IVR 변화에 대해 나타내고 있다. 여기서 S는 터널의 평면 바닥을 제외한 워터제트 intake duct의 전체 표면적을 나타낸다. 수직 방향의 힘의 경우에는 IVR이 증가하면서 낮아지면서 IVR=0.8을 지나면서 다시 조금 높아지는 현상을 보이고 있다. 수평방향의 힘은 추력성분으로 작용하고 있음을 확인하였다. 이러한 힘들은 선체와 결합되었을 때 저항이나 자세변화에 영향을 주기 때문에 계산과정에 이러한 값들을 정량적으로 추정할 수 있다면 유용할 것이다.

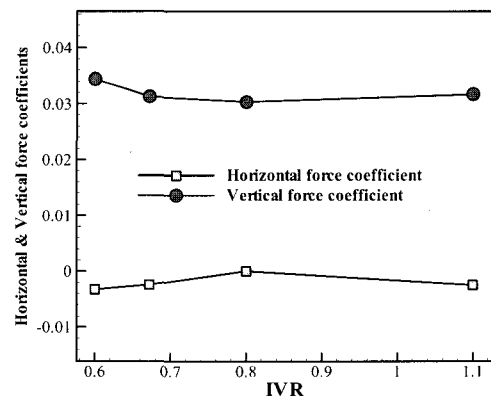


Fig. 7 Calculated vertical and horizontal force components acting on the waterjet duct

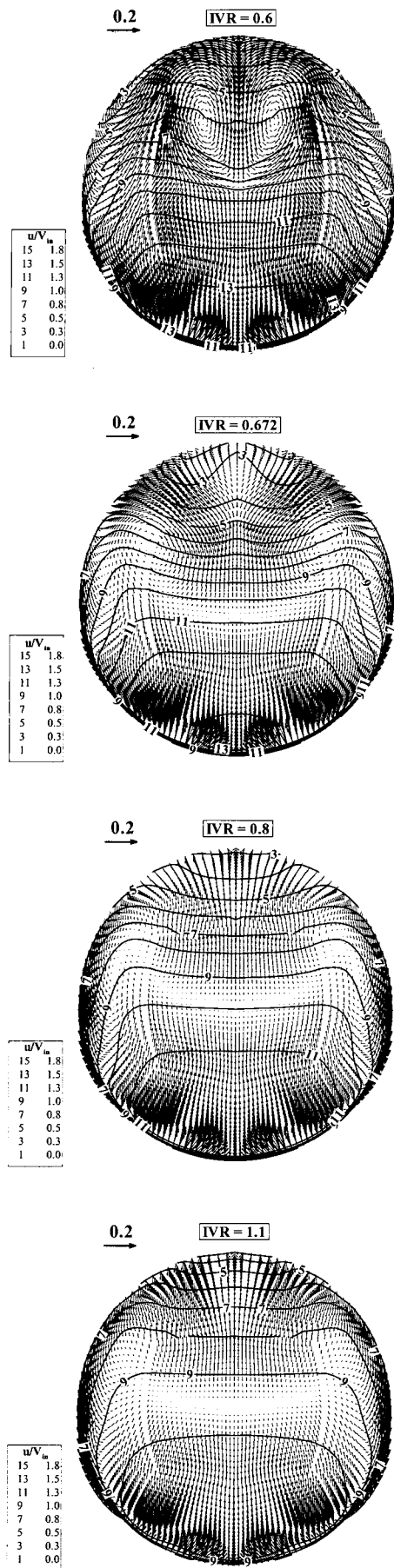


Fig. 8 Axial velocity contours and cross vectors at intake duct exit normalized by bulk velocity V_{IN} of waterjet intake duct

끝으로 각각의 IVR 조건에서 intake duct exit, 즉 impeller inlet에서의 속도 분포를 Fig. 8에 도시하였다. 각각의 IVR 조건에서 bulk velocity가 다르기 때문에 유동의 특성을 살펴보기 위해 Fig. 8에서는 속도를 intake duct의 bulk velocity인 V_{IN} 으로 무차원화 하였다. IVR이 제일 작은 경우에는 ramp 쪽에 강한 회전 성분이 보이며, 속도의 분포가 불균일하여 아랫쪽의 유동이 상대적으로 빠르게 나타나고 있다. 이런 현상은 차츰 IVR이 커짐에 따라 균일한 흐름으로 나타나고 있다. 설계 IVR인 0.672의 경우에도 약간의 횡방향 속도성분이 존재하는데, 이러한 속도의 불균일성은 impeller의 효율을 떨어뜨릴 우려가 있다. 하지만 본 연구의 대상인 워터제트 덕트의 경우에는 ramp의 각도가 부드럽고, 길이도 길지 않아 횡방향 속도의 세기가 강하지 않고, 축방향 속도도 비교적 균일한 것으로 생각된다. 이렇게 CFD 기법을 이용하여 미리 속도와 압력 분포를 미리 추정함으로써 설계 인자에 대한 사전 평가가 이루어질 수 있다고 하겠다.

4. 결 언

초기 설계된 워터제트 덕트에 대한 유체역학적 특성을 수치 해석기법을 이용하여 조사하였다. 수치해석 결과의 검증은 위해 기존의 워터제트 실험결과와 비교하였다. Realizable $k-\epsilon$ 난류 모형을 사용한 경우의 해가 standard $k-\epsilon$ 난류 모형을 사용한 경우보다 나은 결과를 보여주었다. 그리고 실제의 설계문제에 적용하는 예로서 KRISO의 워터제트 추진시스템 개발을 위해 초기 설계된 intake duct의 내부 유동장 해석을 수행하여 네 개의 IVR 조건에 대하여 살펴보았다. IVR에 따라서 달라지는 속도장 및 압력장의 해석을 통하여 낮은 IVR조건에서 덕트 내부에서 발생하는 유동 박리현상을 예측하였으며, intake duct의 exit, 즉 impeller에 유입되는 유동장의 분포를 파악하고자 하였다. 이러한 수치계산 기법의 활용을 통하여 실제 설계단계에서 유동 현상을 미리 예측함으로써 설계의 효율성을 높일 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 김기섭 등, "차세대 선박의 핵심기술개발-차세대 추진장치 기술 개발", (1996), KRISO 보고서.
- [2] 안봉환, 최희중, 전호환, 차상명, "궤도 차량용 물분사 추진 시스템 주위의 포텐셜 유동해석", 추계 대한조선학회 학술 발표대회 (2000), pp.118-121.
- [3] Roberts, J. L., "The Influence of Hull Boundary Layers on Waterjet Intake Performance", Ph.D. Thesis (1998), University of Tasmania.
- [4] Dyne, G. and Widmark, C., "On the Efficiency of Waterjet System", RINA International Conference on Waterjet Propulsion (1998), London, Paper 4.
- [5] Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabir, A., and Zhu, J., "A new eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - model development and validation," Computers and Fluids, Vol. 24 (1995), pp. 227-238.
- [6] Kim, W.J., Kim, D.H., Van, S.H., "Computational study on turbulent flows around modern tanker hull forms," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 38, No. 4 (2002), pp. 377-406.