

워터제트 추진기 유입관의 내부유동 전산해석

윤현석*, 박원규†*, 전호환**, 김문찬**

부산대학교 기계공학부*
부산대학교 조선해양공학과**

Numerical Internal Flow Analysis of Intake Duct of Waterjet Propulsion

Hyun Suk Yun*, Warn-Gyu Park†*, Ho Hwan Chun** and Moon Chan Kim**

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

Abstract

Waterjet propulsion is widely used to thrust high speed marine vessels in excess of 30-35 knots by virtue of the high propulsive efficiency, good maneuverability, and less cavitation. From the aspect of power loss, approximately 7-9% of the total power is lost in intake duct due to the flow separation, nonuniformity, etc. Thus, detail understanding of flow phenomena occurring within intake duct is essential to reduce the power loss, as well as noise and vibration. The present work solved 3D incompressible RANS equations to provide complicated viscous flow features of intake duct. The numerical results were compared with experiments and good agreements were obtained for three jet velocity ratios.

※Keywords: RANS Equations, Waterjet(물분사 추진), Intake Duct(유입관), Flush Type, Boundary Layer Ingestion(경계층 유입)

1. 서론

워터제트 추진시스템은 높은 추진 효율, 좋은 기동성 그리고 낮은 소음과 진동으로 인해 30-35 노트를 초과하는 고속선박에서 널리 사용되고 있다. 또한 워터제트의 유입관의 단면적이 흐름방향으로 갈수록 점차 확대되어짐에 따라 임펠러 표면

의 정압력의 증가로 인해 공동이 지연되거나 줄어들 수 있다. 워터제트 추진시스템은 군사용으로는 수륙양용선이 강이나 해안에 상륙할 때 추진을 위해서 사용되고 있는데, 특히 수륙양용선에서는 워터제트가 얇은 물에서 높은 추진효율과 탁월한 조향성을 가지고 있기 때문이다. 일반적으로 워터제트는 유입관 내부의 유동박리와 비균일 유입유동에 의해 약 7%~9%의 동력 손실이 생기는데 이러한 동력손실을 줄이기 위해서는 유입관 내부의 유동해석이 필요하다. 워터제트의 유입관은 일반적으로 ram(pod 또는 strut)형과 flush형으로 크게

접수일: 2004년 6월 3일, 승인일: 2004년 12월 30일

† 주저자, E-mail: wgpark@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2457

대별 되는데, ram형 유입관은 수중익선에 주로 사용되어지며 flush형 유입관은 monohull선이나 catamaran선 등에 주로 사용되고 있다. 국내선형 연구로는 2차원 입구면 형상에 대한 연구를 류재운 등(1999)이 수행하였고 공기 유입물제트에 대해 이진태 등(1999)이 연구하였으며 워터제트의 모형선과 실선의 성능 상관관계를 안중우 등(1998)이 연구하였다. 그리고 Pod형 워터제트에 대해 김기섭 등(1997)이 연구한 바 있으며 노즐형상에 대한 연구를 강호근 등(1997)이 수행하였으며 패널법에 의한 성능해석을 문일성 등(1997)이 수행한바 있다. 국외의 선형연구에서는 Roberts(1998)가 워터제트 유입관의 유동현상에 대해 잘 정리하였으며 Alexander 등(1993)은 유입관과 선체의 상호작용에 대해 연구하였으며, Okamoto 등(1993)은 자체 추진상태에서 유입관 표면의 압력을 측정하였다. Brander and Walker(2001)는 공동터널에서 워터제트 유입관으로 경계층 유동의 유입현상에 대해 실험적으로 연구하였다. 전산유체역학 해석으로는 Watson(1998), Roberts and Walker(1998), Verbeek and Bulter(2001), Seil(2001) 등이 유입관 유동을 해석한 적이 있다. 그러나 비록 위에서 언급한 유입관 유동에 대한 선형연구가 있었으나, 대부분의 중요정보는 워터제트 제작회사 내부 자료로만 사용되고 있고 일반 연구자들에게 공개되어 있지 않으므로 본 연구에서는 워터제트 유입관의 유동해석을 통하여 유입관 유동 현상을 정확히 파악하고 유동박리와 비균일 유입류를 최소화함으로써 워터제트의 추진성능을 향상시키는데 중요 정보를 제공하고자 한다.

2. 지배방정식 및 수치해석방법

3차원 비압축성 Navier-Stokes방정식을, 무차원화 한 후 일반화된 곡선좌표계에서 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}_ν , \bar{F}_ν , \bar{G}_ν 는 점성항을 의미한다. 식(1)의 해를 구하기 위해 우선, 운동량 방정식을 생각해 보면 이 방정식은 포물선형 편미분 방정식이므로 시간행진 방법을 이용하고, Newton 반복법을 적용한 후, 대류항 및 점성항을 국부적으로 선형화를 시키면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\left(\frac{1}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} \bar{A} + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{B} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \bar{C} \right) \Delta \bar{q} = \omega \bar{R}^{n+1,k} \quad (2)$$

여기서 상첨자 'n+1' 은 Δt 후의 시간레벨을 의미하며 두번째 상첨자 'k'는 반복횟수를 의미한다. 그리고 ω 는 완화계수(relaxation factor)이며 \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} 는 Jacobian 행렬로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{E} - \bar{E}_\nu) \\ \bar{B} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{F} - \bar{F}_\nu) \\ \bar{C} &= \frac{\partial}{\partial q} (\bar{G} - \bar{G}_\nu) \end{aligned} \quad (3)$$

$\bar{R}^{n+1,k}$ 는 잔류벡터라 불리는 항으로 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \bar{R}^{n+1,k} &= -\frac{1}{\Delta \tau} (\bar{q}^{n+1,k} - \bar{q}^n) - \\ &(\delta_\xi \bar{E}^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}^{n+1,k}) + \\ &(\delta_\xi \bar{E}_\nu^{n+1,k} + \delta_\eta \bar{F}_\nu^{n+1,k} + \delta_\zeta \bar{G}_\nu^{n+1,k}) \end{aligned} \quad (4)$$

연속 방정식은 비압축성 유동해석의 효율적인 수행을 위해 MAC (Marker-and-Cell) 방법 (Viecelli 1969)의 개념을 다음과 같이 이용하였다.

$$p^{n+1,k+1} - p^{n+1,k} = \Delta p = -\beta (\nabla \cdot V) \quad (5)$$

여기서 β 는 완화계수를 의미한다. 난류모델은 저레이놀즈수 k-ε 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

워터제트 유입관의 내부 유동해석을 위한 격자계는 Fig. 1과 같이 구성되어 있는 다중 격자계로써 풍동을 위한 1번 블록(격자수=87×68×35)과 워터제트 유입관을 위한 2번 블록(격자수=40×130×30)으로 구성되어 있다.

유동계산은 워터제트 유입관의 제트속도비(JVR:Jet Velocity Ratio)가 6, 7, 8의 세 가지 경우에 대해 수행하였으며 JVR은 다음과 같이 정의된다.

$$JVR = \frac{V_j}{V_\infty} \tag{6}$$

여기서 V_j 는 워터제트의 노즐 출구 유속을 의미하며 V_∞ 는 선박의 속도를 의미한다. 각 제트속도비에 대한 레이놀즈수는 유입관 출구에 대한 평

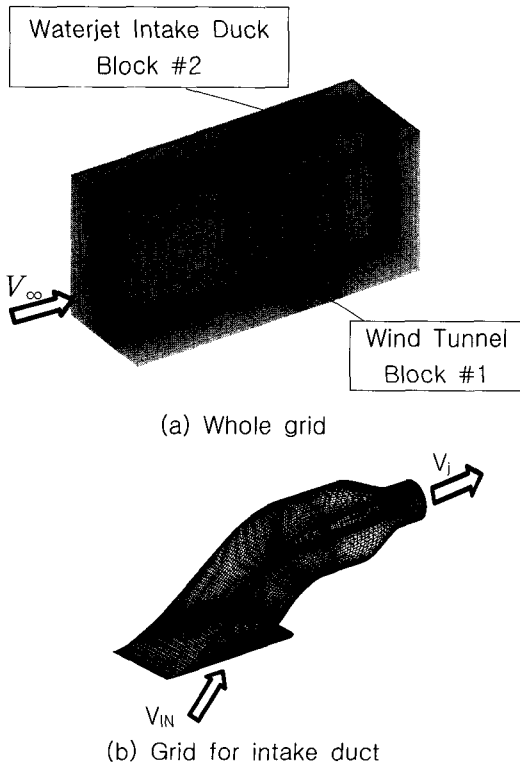


Fig. 1 Grid system

균속도와 그곳의 수력직경을 기준으로 하였을 경우 각각, 4.9×10^5 , 5.8×10^5 , 6.5×10^5 에 해당한다. 워터제트 유입관이 실험에서는 Fig. 1과 같이 풍동 벽면에 부착되어 있으므로 유입관 유동은 풍동의 경계층에 많은 영향을 받는다. 그러므로 본 연구에서는 풍동 실험의 경계층 영향을 계산에 포함시키기 위해 1번 블록(풍동)의 난류경계층의 속도분포를 다음과 같이 정의하였다.

$$u = \begin{cases} V_\infty \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} & y \leq \delta \\ V_\infty & y > \delta \end{cases} \tag{7}$$

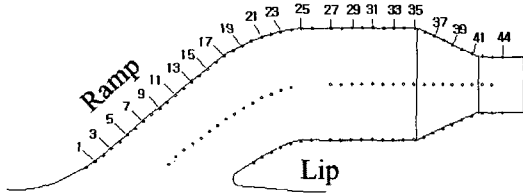
$$v = 0$$

여기서 δ 는 경계층 두께로써 실험(추재민 2002)에서 측정된 값으로 $\delta=0.27m$ 이다.

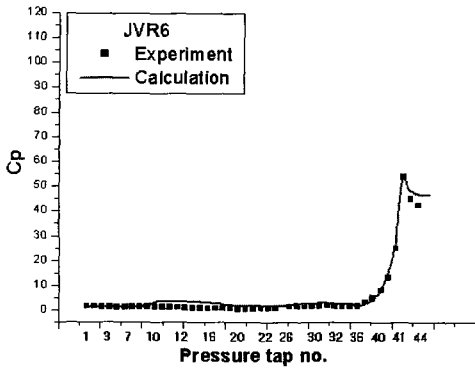
Fig. 2는 JVR이 6, 7, 8인 경우에 대해서 워터제트 유입관의 ramp면을 따라서 측정된 압력분포(김경천과 박원규 2003)와 본 계산에 의한 결과를 서로 비교하여 나타내었다. 본 그림에서 횡축의 각 숫자는 Fig. 2(a)에서 표시한 pressure tab의 번호를 의미하며 종축의 C_p 는 다음과 같이 정의된 표면 압력계수이다.

$$C_p = \frac{p - p_{IN}}{\frac{1}{2} \rho v_{IN}^2} \tag{8}$$

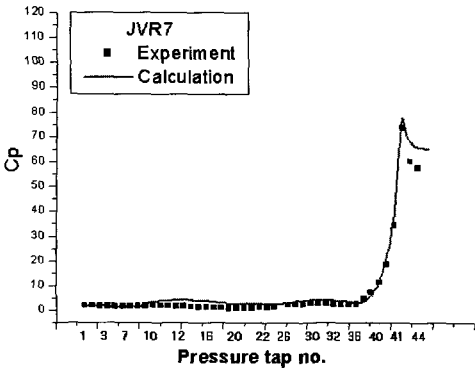
여기서 하첨자 "IN"은 워터제트 유입관의 입구를 의미한다. 이들 그림에서 모든 JVR에 대해서 본 계산결과가 실험데이터와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 ramp면을 따라서 표면 압력은 비교적 일정하게 유지하다가 pressure tab 번호가 35번의 축소 노즐에서 부터 병목현상으로 유동이 정체되면서 압력이 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 JVR이 증가할수록 유량이 증가하게 되어 이러한 병목현상이 심각해져 압력 증가량이 더욱 커짐을 알 수 있다. Fig. 3과 4는 유입관 측면과 lip면을 따라 측정된 압력계수 결과와 실험과 비교하여 나타낸 그림으로써 Fig. 2와 비슷한 압력분포 경향을 나타내고 있으며 이들 그림 역시 본 계산결과가 실험 데이터와 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.



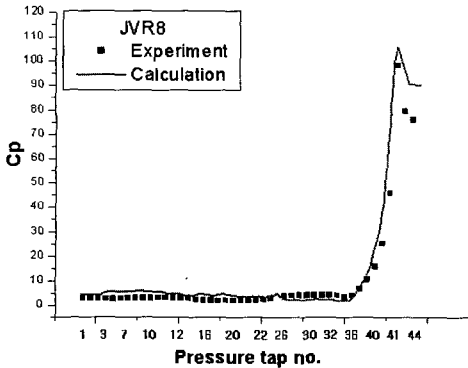
(a) Location of Pressure tabs



(b) at JVR=6

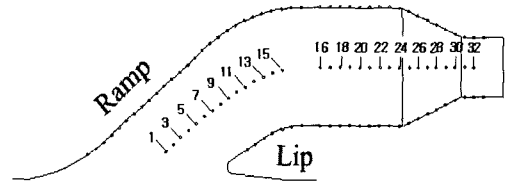


(c) at JVR=7

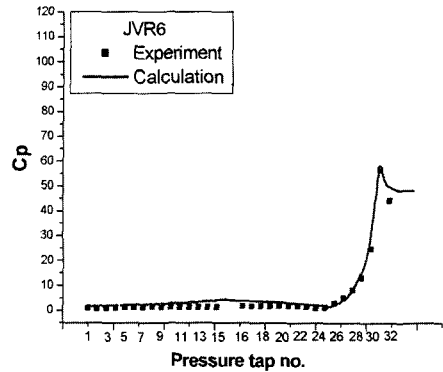


(d) at JVR=8

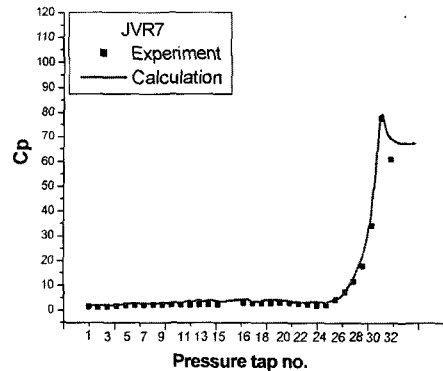
Fig. 2 Pressure distribution on the ramp



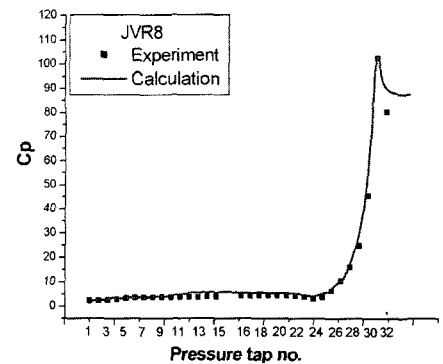
a) Location of pressure tabs



(b) at JVR=6

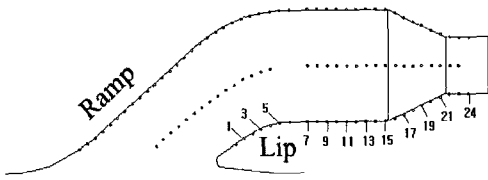


(c) at JVR=7

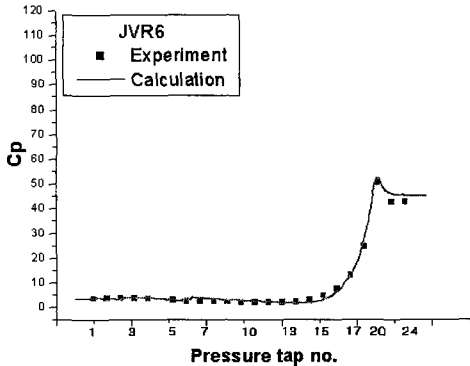


(d) at JVR=8

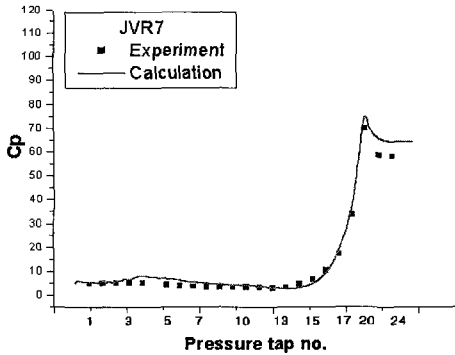
Fig. 3 Pressure distribution on the side



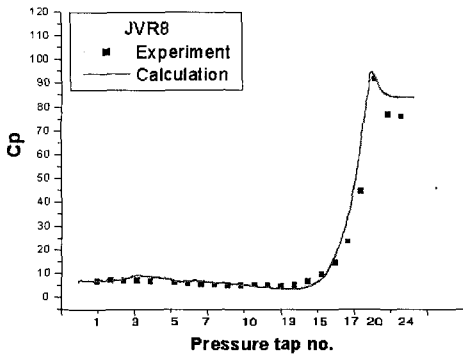
(a) Location of pressure tabs



(b) at JVR=6



(c) at JVR=7



(d) at JVR=8

Fig. 4 Pressure distribution on the lip

그러나 이들 그림에서 공통적으로 유입관 출구 노즐의 마지막 출구 압력이 실험치와 다소 차이를 나타내고 있는데, 이것은 Fig. 5에서 보듯이, 실험에서는 워터제트의 노즐 출구에 바로 배압펌프 (vacuum pump)를 부착할 수 없어 노즐 출구로부터 약 10D정도까지 확대관(diffuser)을 연결하여 확대관 끝에 배압펌프를 부착하여 주어진 유량을 워터제트 유입관을 통해 유출 시키고 있다. 그러나 본 계산에서는 실제 워터제트의 유입관을 그대로 모사하기 위해 확대관 연결없이 워터제트 노즐에서 바로 대기중으로 유체가 유출된다고 가정하여 해석하였기 때문으로 여겨진다.

Fig. 6은 JVR=7일때 유입관 표면의 무차원 등압력 분포와 내부유선을 보여주고 있는데, lip면에 국부적인 유동박리에 의한 와류생성을 볼 수 있으며 유입관 입구에서도 워터제트의 강력한 흡입에 의해 주 유동방향 뿐만 아니라 양쪽 측면을 통해서도 많은 유량이 흡입되고 있음을 알 수 있고, 이들은 유입관 입구의 양쪽 측면 모서리를 돌아 들어오면서 유동박리에 의한 와류를 형성하고 있음을 알 수 있다.

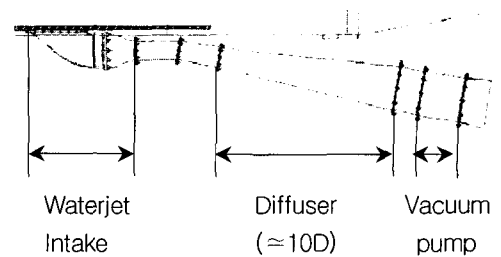
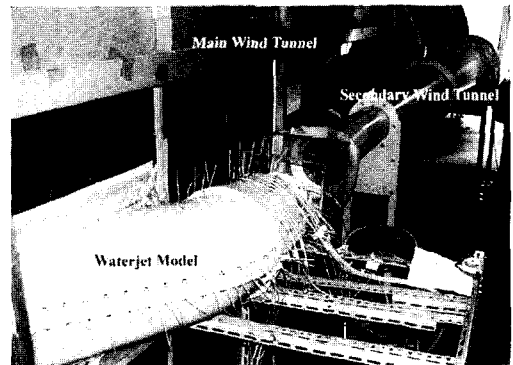
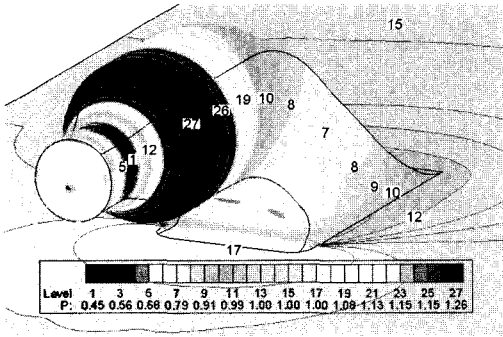
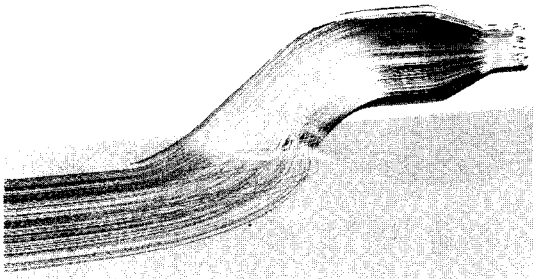


Fig. 5 Wind tunnel and experimental model



(a) Pressure contours



(b) Streamlines

Fig. 6 Pressure contours and streamlines at JVR=7

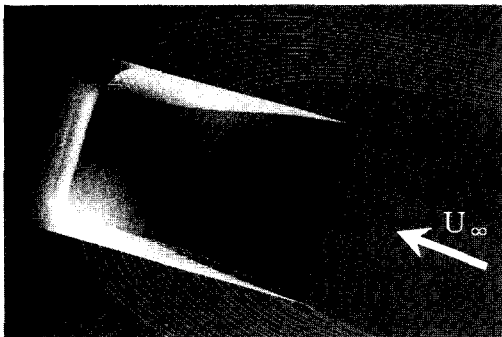
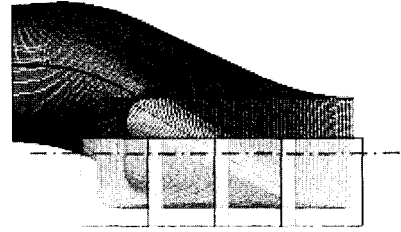
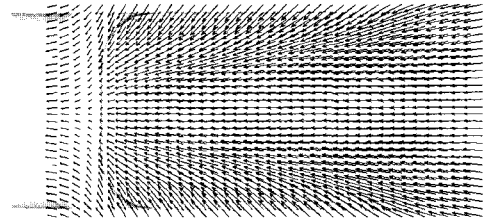


Fig. 7 Streamlines at inlet (JVR=8)

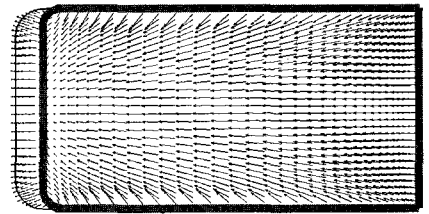
이러한 유동현상에 대한 더욱 자세한 유선 그림은 Fig. 7에서 보는 바와 같다. 이러한 와류는 워터젯 임펠러에 비균일한 유입류를 발생시키는 원인이 되어 임펠러의 성능을 저하시키고 진동 및 소음 발생의 원인이 되므로 실제 유입관 설계에서



(a) Cross-sectional region of PIV measurement



(b) Experiment



(c) Calculation

Fig. 8 Velocity vectors at inlet(JVR=8)

는 와류발생을 억제하기 위하여 lip면과 흡입구 측면 모서리의 곡률을 완만하게 하는 fillet fairing처리가 필요하다. Fig. 8은 유입관 입구 단면에서 유속분포를 PIV 실험(김경천과 박원규 2003)에 의한 것과 본 계산 결과를 비교한 것이다. 서로 잘 일치함을 알 수 있고 Fig. 7에서 보았던 것과 같이 Fig. 8에서 유입관 양쪽 측면에서 강하게 유입되는 유동을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 유입관 입구 대칭면의 2곳의 위치에서 PIV 실험을 한 장소를 보여주고 있으며 Fig. 10은 Fig. 9의 frame 1 장소에서 행한 PIV실험에 의한 유선과 본 계산결과에 의한 유선을 JVR=6,7,8에 대해 보여주고 있는데, 모든 경우에서 본 계산결과가 실험과 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

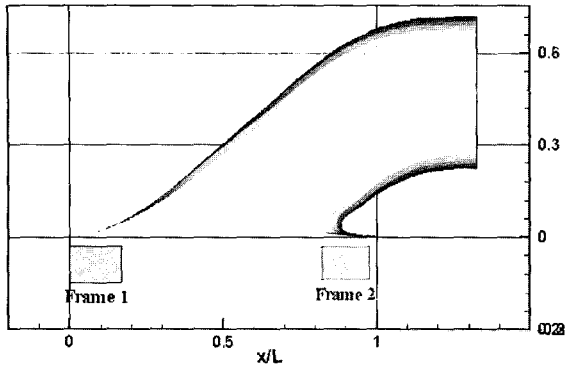
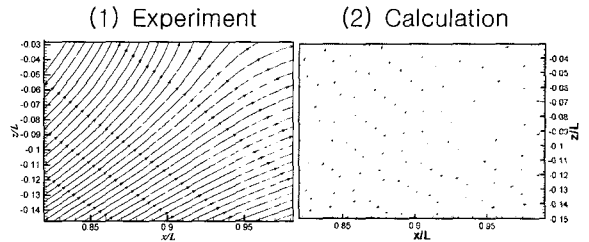
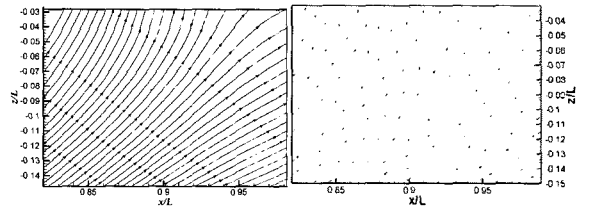


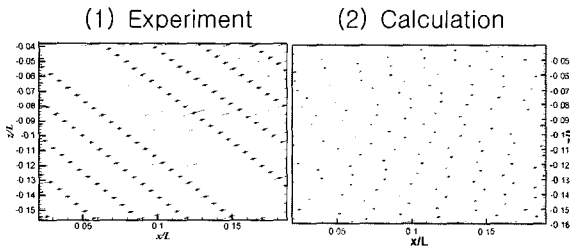
Fig. 9 Locations of PIV experimentation



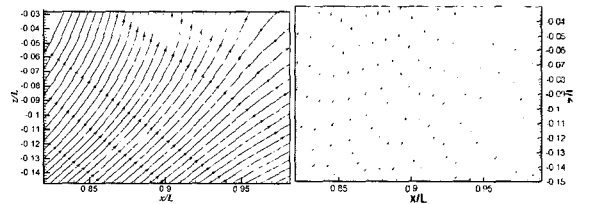
(a) at JVR=6



(b) at JVR=7

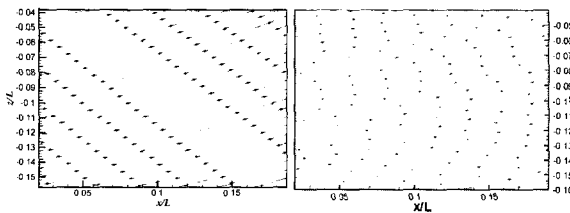


(a) at JVR=6

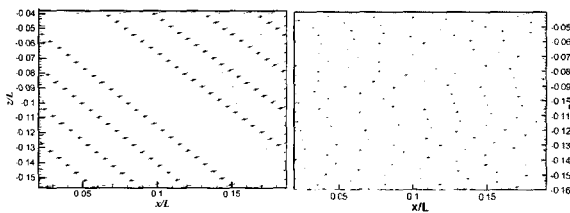


(c) at JVR=8

Fig. 11 Streamlines in frame 2



(b) at JVR=7



(c) at JVR=8

Fig. 10 Streamlines in frame 1

Fig. 11은 frame 2 위치에서 실험과 비교한 그림으로 이것 역시 실험과 매우 일치하는 계산 결과를 보여주고 있다. 특히, Fig. 11에서는 유입유동이 lip의 어느 위치에서 정체점(stagnation point)이 생기는가가 워터제트의 성능에 큰 영향을 미치므로 계산에서는 정체점의 위치를 정확히 예측할 수 있어야 하는데, 본 프로그램이 정체점 위치를 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다. 정체점의 위치가 워터제트의 성능에 영향을 미치는 이유는 정체점을 연결하는 유선 위쪽의 유동은 워터제트 유입관 안으로 유입되며 그 외 유동은 워터제트 내부로 유입되지 않으므로 정체점의 위치가 워터제트의 유입유량에 직접적으로 관계가 있기 때문이다. 또한 이들 그림에 의하면 JVR이 클수록 정체점이 후방으로 이동함을 알 수 있다.

4. 결 론

워터제트 유입관의 유동해석을 위해 3차원 RANS방정식을 적용하였다. 전산해석 결과의 검증 을 위해 실험 데이터와 비교분석을 하였으며 본 계산 결과가 실험 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 제트 속도비(JVR)가 6, 7, 8일때의 워터 제트 유입관의 압력분포 및 유선으로 유동현상을 파악해 보면 유입관의 급격한 곡률 변화로 인하여 유입관의 lip면을 따라 유동박리에 의한 와류를 확 인 할 수 있었으며, 유입관 입구의 측면을 통해서 도 강력한 유입류가 확인되었고 측면 모서리에서 역시 유동박리에 의한 와류가 형성되어 있음을 볼 수 있었다. 이러한 와류에 의해 발생하는 덕트의 비 균일 유입류의 발생을 억제하기 위해서는 유입 덕트 입구면에서 곡률을 완만하게 하는 fillet fairing이 필요하다. 그리고 각 JVR에 따라 lip면의 하단에 생기는 정체점의 위치가 워터제트의 유량 에 직접적인 영향이 있으므로 이에 대한 정확한 위치 계산이 중요한데 본 계산 결과가 정체점의 위치를 잘 예측하고 있음을 확인 할 수 있었으며 JVR이 클수록 정체점이 lip의 후방으로 이동되고 있음을 볼 수 있었다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센 터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강호근, 김유택, 이영호, 1997, "최적 노즐형상 을 갖는 수중램제트의 추진성능에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 42-52.
- 김경천, 박원규, 2003, 풍동을 이용한 워터제트 실험 보고서, 부산대학교
- 김기섭, 송인행, 안종우, 윤일성, 1997, "Pod 형 물분사 추진장치 성능시험 연구," 대한조선학 회 논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 21-30.
- 류재문, 홍삼관, 김영기, 1999, "이차원 물분사

추진장치 입구면 형상에 관한 연구," 대한조선학 회 논문집, 제 36권, 제 2호, pp. 9-21.

- 문일성, 이창섭, 송인행, 김기섭, 1997, "패널법 에 의한 물 분사 추진장치의 성능해석," 대한조 선학회 논문집, 제 34권, 제 4호, pp. 31-41.
- 안종우, 이창용, 박영하, 정종안, 김병현, 1998, "실선 물분사 추진장치 성능시험 및 모형선 -실 선 상관관계," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 4호, pp. 11-18.
- 이진태, 문일성, 박영하, 김경열, 김기섭, 1999, "초고속선을 위한 공기유입 물제트 추진기 개 발," 대한조선학회 논문집, 제 36권, 제 3호, pp. 41-49.
- 추재민, 2002, PIV 기법을 이용한 인위적인 대 기경계층의 난류구조에 관한 연구, 부산대학교 공학석사 학위논문
- Alexander, K.V., Coop, H. and Terwisga, T., 1993, "Waterjet-Hull Interaction: Recent Experimental Results," SNAME Transactions, Vol. 102, pp. 275-335.
- Brander, P.A. and Walker, G.J., 2001, "A Waterjet Test Loop for the TOM FINK Cavitation Tunnel", RINA, International Conference on Waterjet Propulsion III, Paper NO. 1.
- Okamoto, Y., Sugioka, H. and Kitamura, Y., 1993, "On the Pressure Distribution of a Waterjet Intake Duct in Self Propulsion Conditions," Proc. FAST'93, Vol. 1, Yokohama, Japan, pp. 843-854.
- 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.
- Roberts, J.L., 1998, The Influence of Hull Boundary Layers on Waterjet Intake Performance, Ph.D. Thesis, University of Tasmania, Australia.
- Seil, G.J., 2001, "The Effects of the Shaft Rotation and Scale on the Flow in Waterjet

Inlets”, International Conference on Waterjet Propulsion III, RINA, Gothenborg, Sweden.

- 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.
- Vecelli, 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,” Proceedings of International Conference on Waterjet Propulsion, International Conference on Waterjet Propulsion II, RINA, Amsterdam, Netherlands.



< 윤 현 석 >



< 박 원 규 >



< 전 호 환 >



< 김 문 찬 >