

# 물분사 추진기 관내 점성유동해석

왕정용\* · 전호환\* · 박일룡\* · 차상명\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\*국방과학연구소

## Viscous Flow Analysis of the Waterjet Duct

JUNG-YONG WANG, HO-HWAN CHUN, IL-RYONG PARK AND SANG-MYONG CHA

\*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

\*\* Agency for Defense Development

**KEY WORDS:** Waterjet 물분사 추진기, Finite Volume Method 유한체적법, Viscous Flow 점성유동

**ABSTRACT:** In the present paper, the numerical calculations for the viscous duct flow of waterjet propulsion systems on ship are carried out. The governing equation, incompressible Navier-Stokes equation, is discretized and analysed by a Method with the standard turbulence modeling.

For the calculations of the duct flow which have intake flows disturbed by the ship, the results calculated by the potenti used. Numerical results show fairly good agreement with the experimental data.

### 1. 서 론

최근 선박의 고속화가 이루어 지면서 추진기에 대한 관심도 높아지고 있다. 종래 많이 사용되어온 스크류 프로펠러의 경우 선박의 고속화라는 추세에 한계를 보이는 것은 사실이다. 그 이유는 빈번히 문제가 제기되어온 고속에서의 캐비테이션 현상으로 인한 소음 및 진동의 증가, 침식발생 등이다.

이러한 문제 해결을 위해 새로운 방식의 추진기가 개발되었는데 초월공동 프로펠러(supercavitating propeller), 초전도MH(Magneto-Hydrodynamics)추진 시스템, 물분사 추진기(waterjet)이 그것이다.

이들중 물분사 추진기는 임펠러 면에서 축방향유속이 덕트가 없는 자유흐름상태보다 감속되어 유체 정압이 증가하므로 캐비테이션 발생이 지연된다. 그리고 효율 또한 스크류 프로펠러보다 높으며 저속 또는 속도가 없을 때에도 높은 조종성능등으로 앞으로 많은 사용이 예상된다(Voulon,1995).

물분사 추진기의 덕트해석에서 선체와 추진기사이의 상호작용이 추진기 효율에 큰 영향을 미친다는 것이 알려져 있기 때문에 이러한 상호작용을 반드시 고려해 주어야 한다(van Terwisga,1991).

본 연구에서는 이러한 사실들을 기반으로 하여 프러쉬형(flush-type) 물분사 추진장치의 덕트의 내부점성유동에 대한 수치계산을 수행하였다. 지배방정식인 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화하여 해석하였으며 난류유동해석을 위해서 표준  $k-\epsilon$  모델을 도입하였다. 계산된 결과는 실험결과(Okamoto et al.,1993)와 비교하여 검증하고 주어진 덕

트형상과 유속변화에 따른 유동변화를 살펴보았다.

### 2. 문제의 정식화

#### 2.1 지배방정식

비압축성 Navier-Stokes 방정식, 난류운동에너지와 소산율방정식에 대한 적분방정식의 일반화된 형태는 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\rho(\Phi)q) d\Omega + \int_{\Omega} (\rho(\Phi) \mathbf{u}q - \Gamma_q(\Phi) \nabla q) \cdot d\mathbf{S} = \int_{\Omega} S_q d\Omega \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{u}$ 는 유체의 속도이고  $q$ 는 보존량,  $\Gamma_q$ 는 대류와 관계된 계수이고,  $S_q$ 는  $q$ 의 단위체적당 생성량이다.

식(1)을 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{U}) d\Omega + \int_{\Omega} (\mathbf{F}_{conv} - \mathbf{F}_{diff}) \cdot d\mathbf{S} = \int_{\Omega} \mathbf{B} d\Omega \quad (2)$$

여기서 벡터  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{F}_{conv} - \mathbf{F}_{diff}$ ,  $\mathbf{B}$ 들은 다음과 같이 정의된다.

$$U = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho(\Phi)u_1 \\ \rho(\Phi)u_2 \\ \rho(\Phi)u_3 \\ \rho(\Phi)k \\ \rho(\Phi)\varepsilon \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho(\Phi)g_1 - p\vec{i} \\ \rho(\Phi)g_2 - p\vec{j} \\ \rho(\Phi)g_3 - p\vec{k} \\ G_k - \rho(\Phi)\varepsilon \\ (C_1 G_k - C_2 \rho(\Phi)\varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \end{pmatrix}$$

$$F_{conv} - F_{diff} = \begin{pmatrix} \rho(\Phi)u - 0 \\ \rho(\Phi)uu_1 - \mu_{eff}(\Phi)(\nabla u_1) \\ \rho(\Phi)uu_2 - \mu_{eff}(\Phi)(\nabla u_2) \\ \rho(\Phi)uu_3 - \mu_{eff}(\Phi)(\nabla u_3) \\ \rho(\Phi)uk - \frac{\mu_{eff}(\Phi)}{\sigma_k}(\nabla k) \\ \rho(\Phi)u\varepsilon - \frac{\mu_{eff}(\Phi)}{\sigma_\varepsilon}(\nabla \varepsilon) \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $p$ :압력,  $k$ :난류운동에너지  $\varepsilon$ :난류소산률,  
 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ ,  $\mu_t$ :난류와점성계수

$G_k$ :난류운동에너지의 생성률로 다음과 같이 정의한다.

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u_1^2}{\partial x} + \frac{\partial u_2^2}{\partial y} + \frac{\partial u_3^2}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. + \left( \frac{\partial u_3}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial z} + \frac{\partial u_3}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

표준  $k-\varepsilon$  난류모델의 난류상수를 Table 1에 정의하였다.

Table 1 표준  $k-\varepsilon$  난류모델의 난류상수

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\alpha$
0.09	1.44	1.92	1.0	$\frac{\alpha^2}{(C_1 - C_2)\sqrt{C_\mu}}$	0.41

## 2.2 수치해석과정

이산화 과정에서는 모든 미지수가 되는 물리량들은 검사체적의 중앙에서 계산되어 저장되며 각 격자면에서의 확산유량과 대류유량을 계산하는데 보간법과 차분법을 필요로 한다. 각 유량은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

질량유량:

$$\dot{m}_e = \int_{S_e} \rho(\Phi) \mathbf{u} \cdot d\mathbf{S} \approx [\rho(\Phi) \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}]_e S_e \quad (5)$$

확산유량:  $\dot{m}_e q_e$  (6)

대류유량:  $[\Gamma_q(\Phi) \nabla q \cdot \mathbf{n}]_e S_e$  (7)

확산유량을 근사화 하는데 하이브리드 도식(hybrid scheme)이

사용되었다.

대류항을 근사화 하기 위해 격자면에서의 기울기 벡터는 Gauss 정리에 근거한 중점정리(midpoint rule)를 이용하여 격자 중앙에서의 기울기로부터 계산할 수 있다.

$$(\nabla q)_p \approx \frac{\int_{\Omega} (\nabla q) d\Omega}{\Delta \Omega} = \frac{\int_S \vec{q} \cdot d\mathbf{S}}{\Delta \Omega} \approx \frac{\sum_c q_c S_c^i}{\Delta} \Omega$$

$$, (c = e, w, n, s, \dots) \quad (8)$$

그러나 이러한 근사방법은 진동하는 해를 줄 수 있다(Ferziger, 1996). Muzafferija(1994)는 직교 정규 격자 시스템을 사용할 경우 대류항의 근사에 알맞은 다음과 같은 음해법을 사용하였다.

$$(\nabla q)_p \approx \frac{q_E - q_P}{L_{P,E}} \quad (9)$$

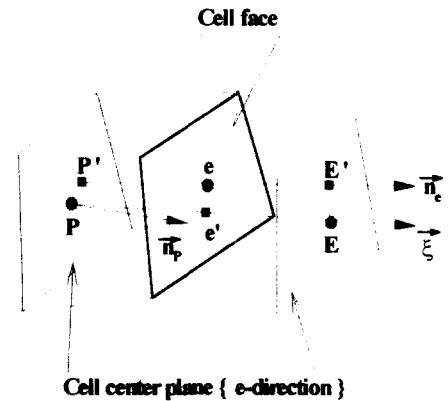


Fig.1 The treatment of irregular grid

그러나 Fig.1에서 볼 수 있듯이 격자가 비정규적일 때 점  $P$ 와 점  $E$ 를 연결한 선분은 격자면의 중앙인 점  $e$ 를 지나지 않는다. 이러한 경우는 비직교이고 비정규 격자 시스템의 경우에 아래와 같이 Muzafferija(1994)가 제안한 효율적인 도식인 diffe correction 방법을 도입하여 진동해를 막아줄 수 있다.

$$(\nabla q)_e \cdot \mathbf{n}_e =$$

$$\left( \frac{\partial q}{\partial n} \right)_e \approx \frac{q_E - q_P}{L_{P,E}} + \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial n} \right)_e - \left( \frac{\partial q}{\partial \xi} \right)_e \right]^{old}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{\partial q}{\partial n} \right)_e \approx \frac{q_E - q_P}{L_{P,E}} + \left[ \frac{q_{E'} - q_{P'}}{L_{P',E'}} - \left( \nabla q \right)_e \cdot \vec{i}_z \right]^{old}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{q_E - q_P}{L_{P,E}} + \left[ \frac{q_E - q_P}{L_{P',E'}} \right. \\
&+ \frac{(\nabla q)_E \cdot (\mathbf{r}_{E'} - \mathbf{r}_E) - (\nabla q)_P \cdot (\mathbf{r}_{P'} - \mathbf{r}_P)}{L_{P',E'}} \\
&\left. - \{\lambda_{e'}(\nabla q)_E + (1 - \lambda_{e'}) (\nabla q)_P\} \cdot \vec{i}_z \right]^{old}
\end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $\vec{i}_z$  : z방향으로의 단위벡터이고 윗줄긋기로 표시된 항들은 이웃하는 점들로부터의 선형보간을 나타낸다.

여기서  $q_{P'}$ 과  $\lambda_{e'}$ 는 다음과 같다.

$$q_{P'} = q_P + (\nabla q)_P \cdot (\mathbf{r}_{P'} - \mathbf{r}_P) \quad (11)$$

$$\lambda_{e'} = \frac{|\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_{P'}|}{|\mathbf{r}_{E'} - \mathbf{r}_{P'}|} \quad (12)$$

$$\mathbf{r}_{P'} = \mathbf{r}_E - \left[ \frac{(\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_P) \cdot \mathbf{n}_P}{\mathbf{n}_e \cdot \mathbf{n}_P} \right] \mathbf{n}_e \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{P'} = \mathbf{r}_E - [(\mathbf{r}_E - \mathbf{r}_P) \cdot \mathbf{n}_P] \mathbf{n}_e \quad (14)$$

if  $\mathbf{n}_e \approx \mathbf{n}_P$

만약 점 P와 점 E를 잇는 선분이 격자면에 직교할 때 식(10)의 교차미분영향을 나타내는 old-bracket항은 영이며 나머지 항은 일반적으로 중앙차분법으로 대체할 수 있다. 비직교 비정규 격자 시스템의 경우에는 격자면 중앙에서의 유체특성값은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
q_e &= q_E \lambda_e + q_{P'}(1 - \lambda_e) = q_E \lambda_e + q_P(1 - \lambda_e) \\
&+ (\nabla q)_E \cdot (\mathbf{r}_{E'} - \mathbf{r}_E) \lambda_e \\
&+ (\nabla q)_P \cdot (\mathbf{r}_{P'} - \mathbf{r}_P)(1 - \lambda_e)
\end{aligned} \quad (15)$$

본 계산에서 시간적분은 다음과 같은 음해법 Euler 도식을 사용하였다.

$$\begin{aligned}
&\int_{t_n}^{t_{n+1}} \left\{ \frac{\partial q}{\partial t} + f(q(t), t) \right\} dt = 0 \\
\Rightarrow q^{n+1} &= q^n + \Delta t [f(t_{n+1}, q^{n+1})]
\end{aligned} \quad (16)$$

최종적으로 이산화된 선형대수방정식은 SIP(Stone 1968)해법을 사용하여 풀고, 압력과 속도의 연성을 위해서 SIMPLEX(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent)고리즘을 도입하였다(van Doormal, 1984).

### 3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서 물분사 추진기 덕트내의 유동해석을 위해 덕트의 유입구 경계조건은 선체에 의해 교란된 유동을 고려하기 위해 선체와 물분사 추진기를 함께 계산한 포텐셜유동을 계산하여 그 결과(안봉환등, 2000)를 이용하였다. 임펠러의 단면에서는 유출경계조건을 부과하였으며 그 외의 단면에서는 벽면경계조건을 사용하였다. 또한 물분사 추진기 덕트의 좌우대칭성을 고려

하여 반쪽영역만을 계산하였다.

계산은 실험결과가 나와있는 Okamoto et al.(1993)의 평접형 덕트를 계산예로 하여 유한체적법으로 수치계산을 하였다.

덕트의 격자는 Fig.2에 보이는 것과 같이 전체를 24개의 단면으로 나누고 각 단면은 21 × 21로 구성하였다.

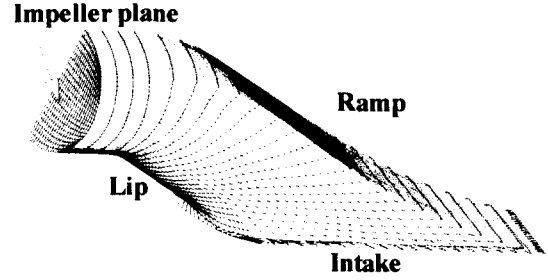


Fig.2 The discretization of duct

본 연구에서 채택한 선속과 Froude수, IVR(Inlet Velocity Ratio)은 다음 Table 2에 표기해 두었다.

Table 2

Ship speed	Froude number	IVR
4.803 m/s	0.660	0.920

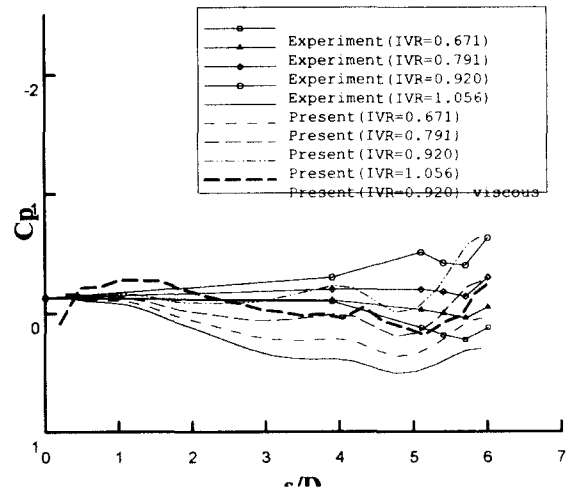


Fig.3 Pressure distribution along ramp centerline

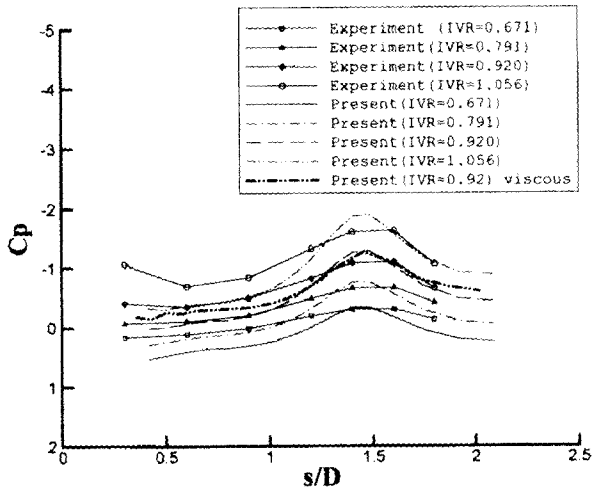


Fig.4 Pressure distribution along lip centerline

Fig.3과 Fig.4에서는 물분사추진기의 램프(ramp)와 립(lip)면의 중앙선을 따라서 작용하는 압력을 실험, 포텐셜유동 그리고 점성유동의 결과를 비교한 그림을 보여주고 있다. 여기서 실험과 포텐셜유동의 결과는 서로 다른 유출부 속도(IVR)에 대한 결과를 함께 나타내었으며 압력은 정압력과 동압력 모두 포함되어 계산된 결과들이다. 점성유동의 계산에서는 IVR=0.920의 경우에서만 계산하여 비교하였다. 앞서 설명한 것과 같이 점성유동의 계산에서는 선체의 영향을 바로 고려하지 않았으며 선체주위와 물분사추진기내의 덕트유동을 함께 계산한 포텐셜유동의 덕트내 유입속도정보를 활용하였다. 이 경우 물분사추진기 덕트의 유입구로 유입되는 유속과 유량은 점성이 고려된 실제유동과는 다소 다른 면이 있음을 예상할 수 있다. 립부근의 압력분포의 결과에서는 비교적 실험과 정성적으로 일치하고 있다. 포텐셜의 결과와 비교하였을 때 보다 실험값에 근접한 것을 알 수 있으며 특히 유입구 근방에서의 압력분포가 보다 실험의 결과에 가까운 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 점성을 고려한 계산이 유동의 변화가 심한 물분사추진기 덕트내부의 영역에서 보다 현실적인 유동현상에 가까운 예측을 할 수 있다는 것으로 설명할 수 있다. 이렇게 유동의 변화가 심한영역에서는 점성의 영향이 지배적인 영역으로 계산과 설계에서 주의를 요하는 영역이며 적절한 난류조건과 격자구성등으로 보다 정확한 예측을 할 수 있어야 할 것이다. 그러나 Fig.4의 결과를 보면 램프면의 중앙선을 따른 결과는 포텐셜과 점성계산 모두 실험과는 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 대체로 유출부인 임펠러단면에 가까울수록 해의 거동이 실험과 차이를 보이고 있어서 임펠면에서의 경계조건등을 다시금 검토해 보아야할 것으로 사료된다.

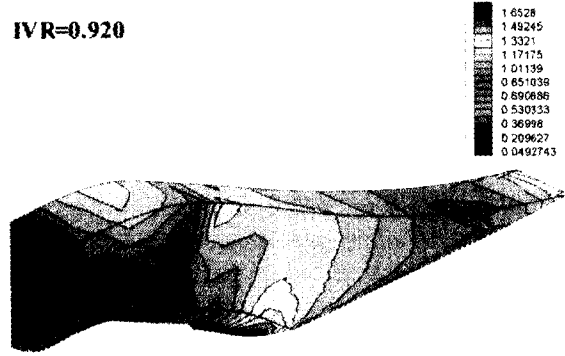


Fig.5 Pressure distribution on duct surface

Fig.5은 물분사추진기의 벽면에서 조금 떨어진 덕트내부면에서의 압력분포를 보이고 있다. 예상할 수 있는 듯이 형상의 굴곡이 심한 부근에서 높고 낮은 압력의 영역을 형성하고 있으며, 이러한 영역의 부적절한 형상으로 인한 물분사추진기의 효율의 저하를 막기위해서 정확한 압력예측을 통한 형상설계가 중요한 것을 알 수 있다. 특히 립부근에서 압력의 변화가 심하며 유체의 원활한 유입을 위한 최적화된 형상설계가 매우 필요한 것을 알 수 있다.

#### # Velocity distributions on the inner plane

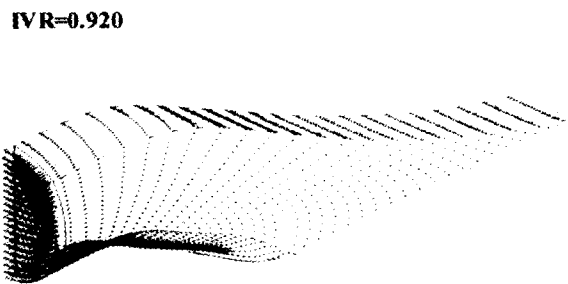


Fig.6 Velocity distribution on duct surface

Fig.6는 Fig.5과 같이 덕트 벽면에서 조금 떨어진 덕트내부면에서의 속도분포를 보여주고 있다. 유출구인 임펠러부근에서 유체가 그의 같은 속도로 가속되어 흘러나가는 것을 볼 수 있다. 앞서 설명한 것과 같이 립부근에서는 포텐셜유동의 결과를 사용하였으므로 유입되는 정확한 유량과 유속벡터를 예측하기 위해서는 선체의 영향을 모두 고려한 점성유동해석이 필요할 것으로 본다.

## 4. 결 론

Reynolds averaged Navier-Stokes방정식을 사용한 물분사추진

의 덕트내부의 유동해석을 위한 해석 프로그램을 개발하였다. 실험된 결과가 있는 주어진 물분사추진기의 덕트내부의 유동 해석의 결과를 실험과 포텐셜유동의 해석결과와 비교하였으며 다소 실험결과에 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 유입유동은 포텐셜의 결과를 사용하였는데 보다 정확한 유입유량과 속도 벡터를 얻기위해서 선체의 영향을 모두 포함한 점성유동해석이 필요하다. 차후 유출경계면의 유출속도의 변화에 따른 결과들의 비교와 덕트내부의 형상변화에 따른 유동의 변화에 대한 비교를 수행하여 보다 효율이 향상된 물분사추진기의 덕트형상에 대한 연구가 필요할 것으로 본다.

## 참 고 문 헌

- 안봉환, 최희종, 전호환, 차상명(2000)., “궤도 차량용 물분사 추진 시스템 주위의 포텐셜 유동해석”, 2000년 추계 대한조선학회 학술발표대회 발표 예정.
- van Doormal, J. P. and Rathby, G. D(1984)., “Enhancement the Simple Method for Predicting Incompressible F Flows”, Numer. HeatTransfer, 7, pp.147~163.
- Ferziger, J. H. and Perić, M(1996)., “Computational Methods Fluid Dynamics”, Springer-Verlag, Berlin.
- Muzaferija, S(1994)., “Adaptive Finite Volume Method for F Predictions Using Unstructured Meshes and Mul Approach”, Ph.D Dissertation, University of London.
- Okamoto, Y., Sugioka, H., Kitamura, Y(1993)., “On the Pres Distribution of a Water Jet Intake Duct in Self Propu Condition”, Proc. FAST’93, Yokohama, Japan, Vo pp.843~854.
- van Terwisga, T(1991)., “The Effect of Waterjet-Hull Inter on thrust and Propulsive Efficiency”, Proc. FAST Trondheim, Norway, Vol.2, pp.1149~1167.
- Voulon, S., Wesselink, A. F(1995)., “Manoeuvrability of Wat -Propulsed Passenger Ferries”, Proc. FAST’95, Lü -Travemünde, Germany, Vol.2, pp.1131~1156.