

# 물분사추진기 관내 유동계측 및 유동해석

왕정용\*, 최희종\*, 전호환\*\*, 차상명\*\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과  
\*\*국방과학연구소

## Flow Measurement and Analysis of the Waterjet Duct

JUNG-YONG WANG, HEE-JONG CHOI, HO-HWAN CHUN AND SANG-MYUNG CHA

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

\*\* Agency for Defense Development

### 요약

궤도차량에 부착된 물분사추진기의 유동해석을 실험과 포텐셜해석 그리고 점성해석을 사용하여 그 결과를 비교하였다. 예인수조에서 여러 차량 전진속도에 대해서 임펠러 회전수를 조정하여 제트속도를 변화시키면서 덕트표면에서의 정압을 계측하였다. 이는 제트시스템의 효율을 추정하기 위함이고 관로를 통한 에너지분포를 알 수 있다. 점성유동해석을 위해 지배방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법을 사용하여 이산화하고 해석하였으며 난류영향은 표준  $k-\epsilon$  난류모형을 사용하여 유동을 해석하고 실험결과 및 포텐셜 해석결과와 비교하였다.

### 1. 서론

물분사 추진장치는 입구면과 출구면을 통과하는 유동의 모멘텀 차이에 의해 추진력을 발생시키는 장치이다. 종래 사용되어 오던 스쿠류 프로펠러와 비교했을 때의 장점은 고속에서의 캐비테이션문제를 극복했다는 것이다. 이는 임펠러 면에서 축방향 유속이 덕트가 없는 자유흐름상태보다 감소되어 유체정압이 증가하므로 캐비테이션 발생이 지연된다는 것이다. 또한 고속에서 높은 효율을 낼수 있고 저속에서는 높은 조종성능을 발휘한다. 본 연구에서는 도하용 궤도차량의 물분사 추진장치의 관내 점성유동해석을 수행하여 이를 실험값과 비교, 코드의 타당성을 검증하였으며 이때 선체와 추진기 사이의 상호작용이 추진기 효율에 큰 영향을 미친다는 것(van Terwisga, 1991)이 잘 알려져 있기 때문에 이를 고려한 포텐셜해석의 결과값으로 덕트의 intake 부분의 유속을 정해주었다(안봉환등, 2000).

점성해석에 사용된 지배방정식은 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법으로 이산화 하여 해석하였으며 난류유동의 해석을 위해서 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다.

### 2. 문제의 정식화

#### 2.1 포텐셜 해석

선체는 일정속도  $U_\infty$ 로  $x$  축의 음의 방향을 따라 이동한다고 가정한다. 선체주위의 유체는 비점성, 비압축성으로 가정하고, 유동은 비회전 유동으로 가정한다. 전체 속도 포텐셜  $\Phi$ 를 도입하면 유체장 내에서  $\Phi$ 는 아래의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \text{ in the fluid field} \quad (1)$$

전체 속도 포텐셜은 유입유동에 의한 속도 포텐셜  $\Phi_\infty$ 와 교란에 의한 속도 포텐셜  $\phi$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \phi + \Phi_\infty = \phi - U_\infty x \quad (2)$$

Laplace 방정식을 만족하는 함수  $G$ 를 도입하면, 교란 속도 포텐셜  $\phi$ 는 유체영역을 포함하는 폐경계면  $S$ 에 대한 아래의 적분식 형태가 된다.

$$\phi = -\frac{1}{4\pi} \int_S \phi \vec{n} \cdot \nabla G dS + \frac{1}{4\pi} \int_S \vec{n} \cdot \nabla \phi G dS \quad (3)$$

여기서,

$$G = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$$r' = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\zeta)^2}$$

$(x, y, z)$  field point

$(\xi, \eta, \zeta)$  source point

$\vec{n}$  : 유동방향의 법선벡터

경계면에서의 경계 조건식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = -\frac{1}{4\pi} \int_S \phi \vec{n} \cdot \nabla G dS \quad (5)$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \int_S \vec{n} \cdot \nabla \phi G dS$$

물분사 추진과 같이 유체 분출면을 갖는 경우, 유체 분출면에서 경계의 이동 속도  $V_N$ 가 0이 아니므로 이에 대한 영향을 고려하여야 한다. 경계면  $S$ 를 인렛부분을 포함한 물체표면 경계면  $S_B$ 와 유체 분출면  $S_{Jet}$ 으로 나누면 물체표면 경계면  $S_B$ 에서의 경계의 이동속도는 0이 되고, 유체 분출면  $S_{Jet}$ 의 법선방향 이동속도는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$V_N = -\frac{Q}{A_{Jet}} \quad (6)$$

여기서,

$Q$  : 유체 분출면을 통하여 유출되는 총유량

$A_{Jet}$  : 유체 분출면의 면적

정리하여 나타내면 식 (5)는 다음과 같다.

$$\frac{1}{4\pi} \int \int_{S_B + S_{Jet}} \phi \vec{n} \cdot \nabla G dS$$

$$= \frac{1}{4\pi} \int \int_{S_{Jet}} \frac{Q}{A_{Jet}} G dS \quad (7)$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \int \int_{S_B + S_{Jet}} U_\infty n_x G dS$$

## 2.2 점성해석

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

$$\int_\Omega \frac{\partial}{\partial t} (\rho(\phi)q) d\Omega \quad (8)$$

$$+ \int_S (\rho(\phi) \mathbf{u}q - \Gamma_q(\phi) \nabla q) \cdot dS = \int_\Omega S_q d\Omega$$

여기서  $\mathbf{u}$ 는 유체의 속도이고  $q$ 는 보존량,  $\Gamma_q$ 는 확산과 관계된 계수이고,  $S_q$ 는  $q$ 의 단위체적당 생성량이다. 식(1)을 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_\Omega \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{U}) d\Omega + \int_S (\mathbf{F}_{conv} - \mathbf{F}_{diff}) \cdot dS \quad (9)$$

$$= \int_\Omega \mathbf{B} d\Omega$$

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

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho(\phi)u_1 \\ \rho(\phi)u_2 \\ \rho(\phi)u_3 \\ \rho(\phi)k \\ \rho(\phi)\epsilon \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ \rho(\phi)g_1 - \vec{p}_i \\ \rho(\phi)g_2 - \vec{p}_j \\ \rho(\phi)g_3 - \vec{p}_k \\ G_k - \rho(\phi)\epsilon \\ (C_1 G_k - C_2 \rho(\phi)\epsilon) \frac{\epsilon}{k} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{conv} - \mathbf{F}_{diff} = \begin{pmatrix} \rho(\phi) \mathbf{u} - 0 \\ \rho(\phi) \mathbf{u}u_1 - \mu_{eff}(\phi)(\nabla u_1) \\ \rho(\phi) \mathbf{u}u_2 - \mu_{eff}(\phi)(\nabla u_2) \\ \rho(\phi) \mathbf{u}u_3 - \mu_{eff}(\phi)(\nabla u_3) \\ \rho(\phi) \mathbf{u}k - \frac{\mu_{eff}(\phi)}{\sigma_k} (\nabla k) \\ \rho(\phi) \mathbf{u}\epsilon - \frac{\mu_{eff}(\phi)}{\sigma_\epsilon} (\nabla \epsilon) \end{pmatrix} \quad (10)$$

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

$G_k$ :난류운동에너지의 생성률로 다음과 같이 정의한다.

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u_1^2}{\partial x} + \frac{\partial u_2^2}{\partial y} + \frac{\partial u_3^2}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} \right)^2 \right. \quad (11)$$

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

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

Table 1 표준  $k-\epsilon$  난류모델의 난류상수

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

## 2.3 실험

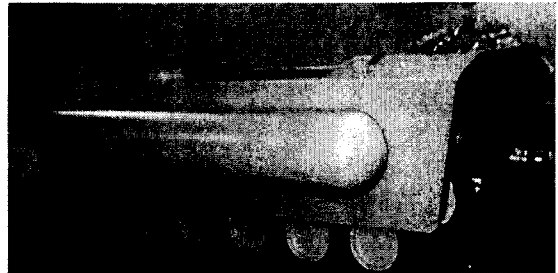


Fig.1 Tracked vehicle model

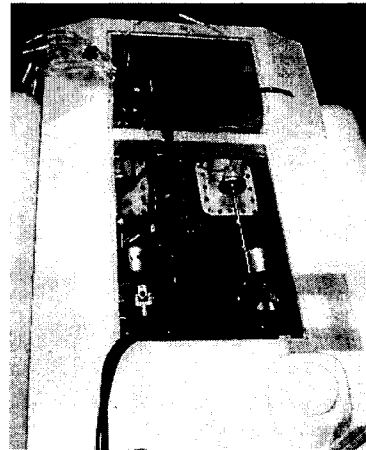


Fig.2 waterjet system mounted on the model

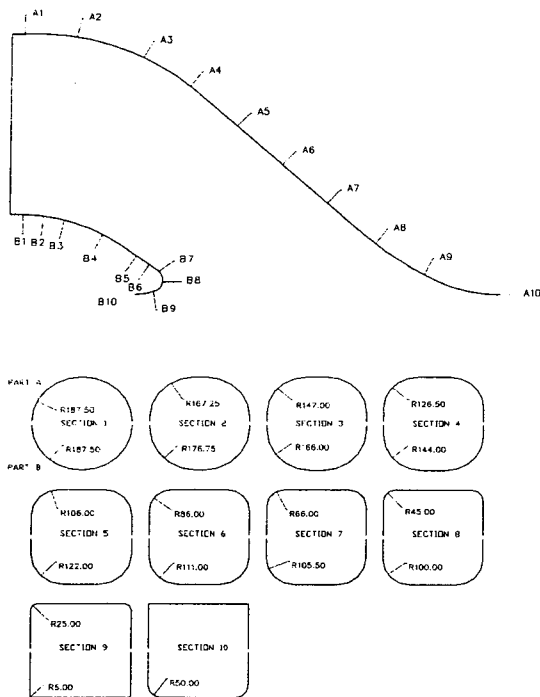


Fig.3 Configuration of duct inlet and cross sections

Fig.1은 실험에 사용된 패도차량의 모습이며 Fig.2는 2기의 waterjet이 장착되어 있는 모습을 나타내고 있다. 계산 및 실험은 2기중 하나를 선정하여 계산하고 실험을 수행하였다.

Fig.3은 각 단면에서의 치수를 나타낸 것이다.

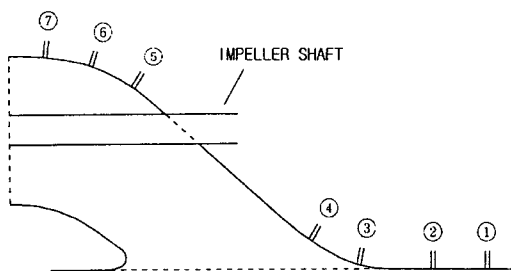


Fig.4 Pressure tab positions along the ramp of the duct inlet

본 연구의 실험에서 압력계측은 노즐의 유량을 계측하기 위해 8점, 펌프직전 앞 단면에서 3점을 계측하여 펌프의 효율을 계산하고, Fig.4과 같이 duct의 ramp의 중양면을 따라 intake 부분에 2점, impeller plane 부근에 3점, 웨도차량 바닥면에 2점으로 총 18점의 구멍을 뚫어 압력을 계측하였다.

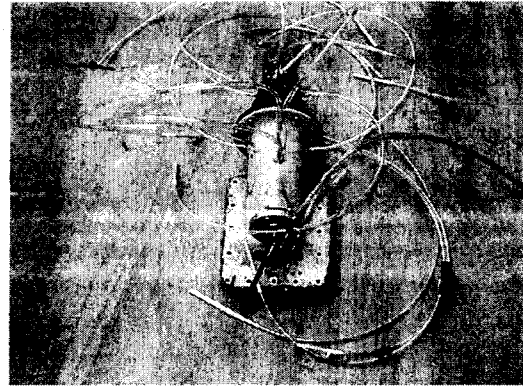


Fig.5 Pressure tab fitted with vinyl tube

계측방법은 속도가 없을때의 기준압력을 0으로 설정하고 IVR의 변화에 따른 값을 계측하였다.

Fig.5은 측정시 비닐튜브를 장착한 모습이며 실험에서 측정된 압력은 덕트표면에서의 정압이며 자항시 trim과 wave에 인한 오차를 어느정도 포함하고 있다.

또한 lip부분에서는 길이가 너무 짧고 곡면이 심해 측정의 어려움이 있어 측정하지 못하였으며 ramp 부분에서의 값을 포텐셜해석값, 점성해석값과 비교 하였다.

### 3. 계산결과 및 고찰

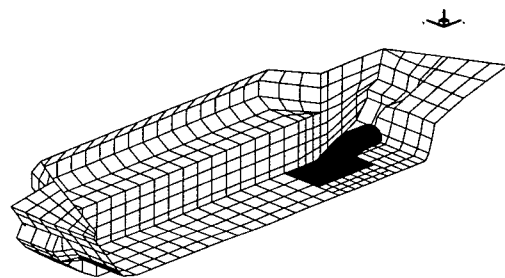


Fig.6 Discretization of the tracked vehicle

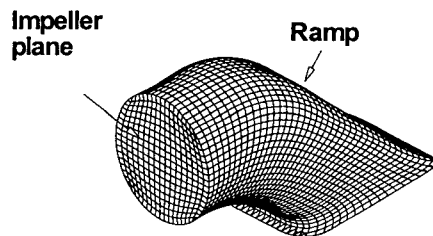


Fig.7 Discretization of waterjet duct

Fig.6는 포텐셜 계산을 위한 격자이며 Fig.7는 점성 계산을 수행하기 위해 18\*18\*40으로 나눈 격자이다.

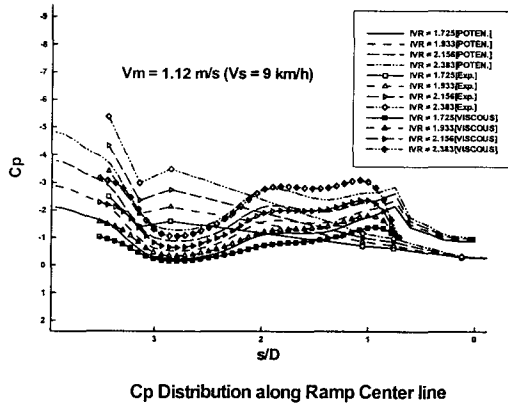


Fig.8 Cp distribution in  $V_M=1.12$

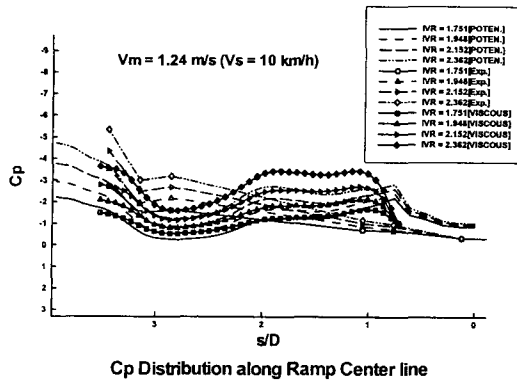


Fig.9 Cp distribution in  $V_M=1.24$

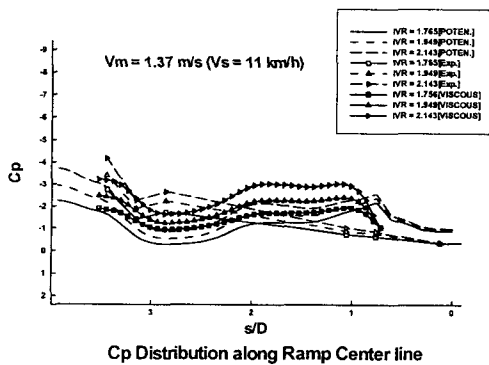


Fig.10 Cp distribution in  $V_M=1.37$

Fig.8에서Fig.10까지의 그림은 물분사추진기의 램프

(ramp)면의 중앙선을 따라서 작용하는 압력을 3가지의 각기 다른 모형선의 속도와 서로 다른 유출부 속도 (IVR)에 대한 실험결과, 점성유동의 결과, 그리고 포텐셜 유동의 결과를 함께 비교한 그림이다.

실험값들은 duct표면에서 측정된 압력이기 때문에 이는 정압이며 점성유동의 결과는 표면 바로 아래면에서의 압력이고 또한 절대압력으로 계산되어지기 때문에 실험값과는 정성적인 면만을 비교하였다.

여기서 모형선의 속도가 커질수록 포텐셜 해석과의 값이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 속도가 빨라짐에 따라 점성유동의 해석값이 포텐셜값보다 압력이 다소 낮아짐을 알 수 있다.

$s/D$ 가 0.7인 부분이 덕트의 inlet 부분인데 여기서 포텐셜값과의 차이는 포텐셜에서의 numerical error에 해당하는 값으로 edge 부분의 차분에 대한 error가 포함되어 있는 것으로 생각된다.

또한 임펠러 부근에서의 점성해석의 값이 포텐셜의 값과 차이를 보이는 것은 점성해석 수행시 임펠러 경계조건을 부여 한 것이 아니라 플럭스를 맞춰주기 위해 동일한 속도로 빠져나간다는 outlet 조건을 부여했기 때문이다.

차후 좀더 정확한 점성유동해석을 위해서는 임펠러까지 고려한 점성유동해석이 필요할 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 실제 실험에 이용한 케도차량용 waterjet duct를 이용하여 실험값과 포텐셜 해석값 그리고 점성유동해석값을 서로 비교하였다.

점성유동해석을 위해서 Reynolds averaged Navier-Stokes방정식을 이산화 하고 난류모델식은 표준  $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하였고 그에대한 해석코드를 개발하였다. 차후 실험에 있어서 판표면에서의 정압만을 측정하는 것이 아니라 관내부에서의 유속을 측정하여 좀더 정확한 실험값을 가지고 비교를 해보면 정량적인 비교 뿐만 아니라 점성의 영향이 관유동에 미치는 효과를 더욱 잘 설명할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

van Terwisga, T.(1991), "The Effect of Waterjet-Hull Interaction on thrust and Propulsive Efficiency", Proc. FAST'91, Trondheim, Norway, Vol.2, pp.1149~1167.

안봉환, 최희종, 전호환, 차상명(2000), "케도 차량용 물분사 추진 시스템 주위의 포텐셜 유동해석", 2000년 추계 대한조선학회 학술발표대회, pp.118~121.