

이차원 물분사 추진장치 입구면 형상에 관한 연구

류재문*, 홍삼권**, 김영기***

A Study on the Configuration of Two-Dimensional Waterjet Inlet

by

J.-M. Lew*, S.-K. Hong** and Y.-G. Kim***

요 약

물분사 추진장치(waterjet)는 현재 고속선의 추진기로 폭넓게 사용되고 있으나, 입구면(inlet) 형상에 따른 효율 문제와 제작상의 어려움으로 인해 제작사는 한정되어 있다. 입구면 형상 설계에 있어서 가장 중요한 문제는 효율에 크게 영향을 주는 공동(cavitation) 발생을 최소화하는 것이다.

본 논문에서는 포텐셜 유동해석에 의해 공동발생이 최소화되는 최적 형상을 찾기 위해, 평접형(flush type) 이차원 물분사 추진장치의 입구면 형상을 수치계산 모델로 택하여 이차원 단면으로 가정하고, 유동해석을 수행하였다. 형상 파라미터의 변화를 통해 얻어진 다양한 입구면 형상에 대해 수치계산을 수행하여, 공동 발생에 미치는 입구면 형상의 영향을 조사하였고, 이를 바탕으로 최적 형상을 얻을 수 있는 형상해석 기법을 확립하였다. 또한 주어진 입구면 주위의 압력분포를 입력자료로 하여 입구면 형상이 찾아지도록 하는 형상 설계법을 확립하였다.

입구면의 형상 해석 및 형상 설계시 이용한 포텐셜 유동해석은 최근 공동문제 해석에 적용되어 좋은 결과를 주고 있는 포텐셜을 기저로 한 패널법[1,2]을 적용하였다. 형상 해석을 수행하여 얻어진 결과와 Kashiwadani[3,4]의 결과를 비교하여 근사한 결과를 얻은 것으로 본 논문의 형상 해석 기법의 우수성을 알 수 있었다.

형상 해석 결과로 얻어진 압력분포를 입력자료로 하여 입구면의 lip과 ramp에 대한 형상 설계를 수행한 결과 모두 만족스러운 결과를 얻었다.

Abstract

The waterjet is very widely used today in propulsion system of high speed vessel but manufacturer is limited because of an efficiency and a difficulty of a manufacture on the inlet

접수일자 : 1996년 11월 7일, 재접수일자 : 1999년 3월 24일

* 정회원, 충남대학교 선박해양공학과

** 정회원, 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

***정회원, 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

configuration of the waterjet. The importance in designing the inlet configuration of the waterjet lies on the minimization of the cavitation, which is largely affecting the efficiency.

In this paper, the configuration analysis is carried out to find a optimum shape which is minimizing the cavitation using a two dimensional potential-based panel method with an inlet configuration of a flush type. Also, it is developed a direct design method finding an inlet configuration by a given pressure distributions.

The numerically obtained optimum shape using this configuration analysis method show a good agreement compared to the Kashiwadani's results. It is carried out a direct design method over a lip and a ramp of an inlet configuration with pressure distributions obtained a result of the configuration analysis and the results show a good agreement compared to original configuration.

1. 서 언

최근까지 선박의 추진장치는 프로펠러가 주로 이용되고 있다. 그러나 선박이 고속화되면서 프로펠러 면에 발생하는 공동(空洞)현상과 이로 인한 선체 및 프로펠러의 손상문제 등으로 인해 대형 고속선에 적합한 대출력 추진 시스템의 개발이 필요하며, 이와 같은 추진 시스템의 하나로 물분사 추진장치가 고려되고 있다.

물분사 추진 방식은 작동유체인 물이 모두 선내의 덕트를 통과해야 하므로 덕트 시스템이 설치되어야 하고 덕트 내의 과도한 물의 중량 및 덕트 내 마찰계수가 커짐에 따라 효율이 일반적인 프로펠러에 미치지 못하는 등 단점이 많아 지금까지는 특수선에 한정되어 사용되어 왔으나, 고속으로 가면서 추진효율이 증가하며 프로펠러 추진장치의 단점을 보완해 줄 수 있는 장점 때문에 앞으로 건조될 고속선에 많이 설치될 전망이다.

국내에서는 이와 관련한 연구가 거의 이루어지지 않고 있고, 설계지식이나 정보가 극히 제한되어 있는 실정에 있어, 물분사 추진장치의 형상을 결정할 수 있는 설계 기법 및 성능평가 기법의 개발이 필요한 일이라 생각된다.

물분사 추진장치는 Fig. 1에 보인 바와 같이 입구면, 펌프, 확산부 및 덕트, 노즐, 엔진 및 동력장치로 구성되는데 이들 중 특히 입구면 형상에 따라 공동 및 박리 등이 발생하게 되어 효율에 영향을 주게 되므로 이에 대한 많은 실험적 연구가 이

루어지고 있는데, 본 논문에서는 먼저 포텐셜 유동해석에 의해 공동의 발생을 최소화할 수 있는 최적 입구면 형상을 찾도록 하였다.

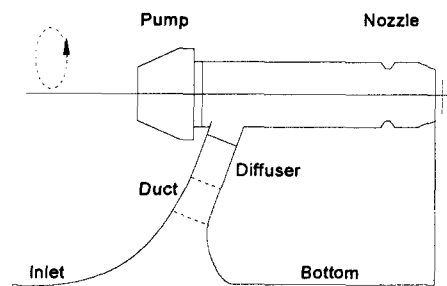


Fig. 1 Components of the waterjet propulsion system

수치계산 모델로 Fig. 2에 보인 평접형 물분사 추진장치를 이차원 단면으로 가정하고 포텐셜 유동해석을 수행하였다. 입구면 주위의 유동을 포텐셜 유동으로 해석하는 데는 다소의 무리가 따르나, 포텐셜 유동 해석은 점성유동 해석에 비해 계산시간이 적게드는 장점이 있고 정성적으로 타당한 결과를 주기때문에 초기 설계용으로 적당하다. 또한 원하는 압력분포를 입력자료로 하여 입구면 형상을 설계할 수 있는 형상 설계법을 확립하였다. 입구면 형상의 형상해석 및 입구면 형상 설계시 이

2.2 적분방정식

Green 정리로부터 물체 경계면에 특이점을 분포하였을 경우, 지배 방정식(2)를 만족하는 섭동속도 포텐셜 ϕ 는 다음과 같은 적분식으로 표현된다. 즉,

$$\phi(\vec{x}) = \int_S \left[-\phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} + \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n_\xi} G \right] dS + \phi_s \quad (6)$$

여기서, $G = \frac{1}{2\pi} \ln R(\vec{x}; \vec{\xi})$ (7)

$\vec{x}(x, y) =$ 제어점의 좌표

$\vec{\xi}(\xi, \eta) =$ 특이점의 좌표

$$R(\vec{x}; \vec{\xi}) = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$$

$\phi_s =$ 점쌍크에 의해서 유기되는 포텐셜

식(6)을 각각의 경계면으로 나누어 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(\vec{x}) = \int_{S_B} \left[-\phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} + \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n_\xi} G \right] dS + \phi_s \quad (8)$$

여기서, $S_B =$ 이차원 물분사 추진장치 경계면

식(8)에서 우변의 제2항은 경계조건식(5)를 이용하면 아는 값이 된다. 따라서 식(8)을 이산화하여 수치계산하는 데는 물체표면에 법선 다이폴만 분포하면 된다. 적분방정식의 이산화는 [1]과 동일하게 하였다.

물분사 추진장치의 펌프를 나타내기 위해 덕트 마감부에 점 쌍크를 분포하였고, 점쌍크의 분포로 인한 net flux를 만족시키기 위해 수치 계산시 far field에 점 소오스(point source)를 분포하였다.

3. 형상설계법

3.1 형상설계문제의 정식화

2차원 물분사 추진장치의 입구면 형상설계 문제를 위한 기본 가정은 앞에서 기술한 형상해석 문제와 같고, 형상해석을 위한 경계 조건과 다음과 같은 경계조건을 만족함으로써 유일해가 구해진다.

1) 입구면에서 운동학적 경계조건 :

$$\frac{DF}{Dt} = 0, \text{ on the design surface} \quad (9)$$

여기서, $F(x, y)$ 는 입구면을 나타내는 식이다.

2) 입구면에서의 동역학적 경계조건 :

$$p = p_{\text{given}}, \text{ on the design surface} \quad (10)$$

3) 입구면 마감 조건 :

$$t(l_{\text{des}}) = 0, \text{ at the end of design surface} \quad (11)$$

여기서, $t(\vec{x})$ 는 입구면 형상 수정량이며, l_{des} 는 입구면의 끝부분을 의미한다.

본 연구에서는 입구면의 원래 형상을 알지 못하고 반복계산을 통해 찾아간다. 따라서 정확한 설계면 위치를 찾기 위한 반복 작업은 입구면 형상 수정량 $t(\vec{x})$ 이 입구면 전체에서 0에 수렴할 때(또는 주어진 허용치 이하로 될 때)까지 계속되게 된다.

3.2 적분방정식

형상설계 문제에서는 주어진 압력분포에 의해 구하여진 섭동속도 포텐셜로부터 소오스 세기를 구하여 입구면의 형상을 구할 수 있게 되므로, 미지수가 형상해석과 달리 소오스 세기가 된다.

형상설계를 위한 적분방정식은 다음과 같다.

$$\phi(\vec{x}) = \int_{S_B - S_D} \left[-\phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} + \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n_\xi} G \right] dS + \int_{S_D} \left[-\phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G}{\partial n_\xi} + \frac{\partial \phi(\vec{\xi})}{\partial n_\xi} G \right] dS + \phi_s \quad (12)$$

여기서, $(S_B - S_D)$ 는 입구면을 제외한 물체 경계면을 뜻하고 S_D 는 입구면을 뜻한다.

식(12)에서 $(S_B - S_D)$ 면은 단면형상을 알고 있기 때문에 경계조건식(5)의 적용으로 법선 다이폴의 세기가 미지수가 되며, 입구면 S_D 는 형상을 가정하였으므로 소오스 세기가 미지

수가 된다.

따라서 (\$S_B - S_D\$) 경계면에 분포되는 법선 다이폴의 갯수와 \$S_D\$ 면에 분포되는 쌍극자의 갯수를 합하면 앞의 형상해석과 동일한 미지수의 갯수가 된다.

입구면 설계를 위해 계산된 압력 분포를 가지고, 입구면에서의 속도 성분을 구하기 위해 Bernoulli 방정식을 입구면에 적용하면,

$$p_1 + \frac{\rho}{2} |\vec{V}_1|^2 = p_j + \frac{\rho}{2} |\vec{V}_j|^2 \quad (13)$$

의 관계식을 얻는다.

여기서, 하첨자 1, j는 각각 입구면의 첫번째 패널과 j번째 패널의 제어점을 의미한다.

각각의 입구면에서의 속도를 입구면의 첫번째 패널의 속도로 무차원화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{p_j - p_1}{\frac{\rho}{2} |\vec{U}_\infty|^2} &= C_{P_j} - C_{P_1} = \Delta C_P \\ &= (|\vec{V}_1|^2 - |\vec{V}_j|^2) / |\vec{U}_\infty|^2 \quad (14) \\ |\vec{V}_j| &= |\vec{V}_1| \sqrt{1 - \Delta C_P / |\vec{V}_1|^2} \end{aligned}$$

위와 같이 속도 성분을 구하면 입구면에서의 섭동속도 포텐셜은 입구면 시작점에서의 섭동속도 포텐셜을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi &= \int_C \vec{v} \cdot d\vec{s} \\ \phi_j &= \phi_1 + \int |\vec{v}_1| \cdot dS \\ &= \phi_1 + |\vec{V}_1| \int \alpha \cdot dS - \int \vec{U}_\infty \cdot dS \quad (15) \\ &= \phi_1 + |\vec{V}_1| \int \alpha \cdot dS - \vec{U}_\infty \cdot (\vec{x}_j - \vec{x}_1) \end{aligned}$$

여기서, j = 입구면의 index (i = \$N_{st} \sim N_{end}\$)

1 = 입구면이 시작되기 바로전의 index (= \$N_{st-1}\$)

$$\alpha = \sqrt{1 - \Delta C_P / |\vec{V}_1|^2} \quad (16)$$

4. 형상해석을 이용한 최적형상의 결정

4.1 최적형상 결정법

형상 해석법을 이용하여 입구면 주위의 유동 해석에 의해 입구면의 최적 형상을 찾는 방법을 검토하였다. 본 논문에서는 최적 형상을 결정하기 위한 조건으로 ramp 및 lip 면에 공동 발생이 최소화되는 압력분포가 나타나도록 하였다. 일반적으로 공동은 유체의 압력이 증기압 이하로 떨어질 때 발생하게 되며, 무차원화된 압력계수는 다음 식과 같다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho |\vec{U}_\infty|^2} \quad (17)$$

이 압력분포에 대응하는 입구면 주위 \$C_p\$의 최소치인 \$C_{Pmin}\$이 초생 공동 수

$$\sigma_n = \frac{p_a - p_v + \rho g d}{\frac{1}{2} \rho |\vec{U}_\infty|^2} \quad (18)$$

여기서, \$p_a\$: 대기압
 \$p_v\$: 증기압
 \$d\$: 수면으로부터의 깊이

에 대해

$$C_{Pmin} < -\sigma_n \quad (19)$$

의 관계를 만족하게 되면 공동이 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 공동이 발생하기 어려운 형상을 얻기 위해서는 \$C_{Pmin}\$의 값이 크게 되는 형상을 택하도록 한다.

입구면 주위의 유동장은 압력분포와 분사장치의 흡입 속도비(suction velocity rate)

$$SVR = \frac{|\vec{V}_s|}{|\vec{U}_\infty|} \quad (20)$$

에 의해 결정되는데, \$C_{Pmin}\$도 SVR에 의해 변화하게 된다. 일반적으로 평접형 이차원 물분사 추

진장치 입구면의 압력 계수는 SVR의 값에 따라 Fig. 4와 같은 특성을 보이게 된다. 따라서 최적형상을 찾는 제한조건으로 SVR에 따르는 ramp 및 lip 면의 최소 압력 계수의 변화를 계산하여, ramp 면과 lip 면의 압력곡선이 만나는 교점의 흡입비를 SVR₀, 대응되는 압력계수를 C_{Pmax}라 하고, 이 C_{Pmax}가 최대가 되는 형상을 찾도록 하였다.

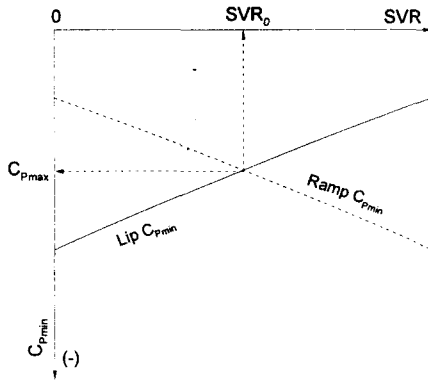


Fig. 4 Definition of C_{Pmax} and SVR₀

4.2 입구면 형상의 기술

평집형 이차원 물분사 추진장치의 입구면 형상은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 4개의 직선과 ramp 및 lip 곡면으로 이루어진다.

입구면 형상은 덕트의 경사각 θ 와 ramp 및 lip 곡면의 끝점인 T₁, T₂, T₃, T₄ 및 곡선형상에 의해 결정되게 되는데, 본 논문에서는 입구면에서의 곡면 표현을 위해서 T₁, T₂ 및 T₃, T₄ 사이의 거스 길이를 파라미터로 하는 3차식으로 근사시켜 곡면의 형상을 결정하였다.

곡선형상은 다음의 3차식으로 표현하였다.

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3 \\ y &= b_0 + b_1s + b_2s^2 + b_3s^3 \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, s는 거스 길이이며 계수 a_i, b_i (i=0,1,2,3)는 곡선이 T₁, T₂ 및 T₃, T₄를 통과하고, 그 점에서 직선에 접한다는 조건에서 얻어지게 된다. 4

개의 점 T₁ ~ T₄의 위치와 접하는 조건은 Fig. 2의 $\theta, h_R, h_L, x_R, x_L$ 에 의해 결정되기 때문에, duct의 두께 B로 무차원화한 형상은 다음의 5개 무차원 형상 parameter에 의해 결정된다.

- θ : duct의 경사각
- h_R/B : ramp 높이비
- h_L/B : lip 높이비
- λ_R : ramp 곡선종횡비 = x_R/h_R
- λ_L : lip 곡선종횡비 = x_L/h_L

4.3 최적형상의 제1차 탐색

최적형상을 구하기 위한 방법으로 파라미터법 (parametric study)을 준용하였다.

즉, 입구면 형상을 결정하는 5개의 파라미터중 4개를 같게 하고 나머지 파라미터에 대해 변화를 주어 각각의 파라미터에 대한 등급을 정하고 가장 큰 압력값을 가지는 형상의 파라미터에 변화를 주어 최적 형상을 찾도록 하였다.

1차 탐색의 최소 영역과 최대 영역은 각 파라미터에 대해 다음과 같이 지정하였다.

$$\begin{aligned} \theta = 30^\circ & , \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 1.0, \lambda_L = 0.5 \\ \theta = 50^\circ & , \frac{h_R}{B} = 5.0, \frac{h_L}{B} = 3.0, \lambda_R = 4.0, \lambda_L = 6.0 \end{aligned}$$

각각의 형상 파라미터에 대하여 C_{Pmax}의 거동을 미리 알 수 없고, 또, 이들 형상의 압력분포의 특성을 모르기 때문에 최적 형상을 빨리 찾기 위해서는 우선 각 형상 파라미터의 변화가 어떻게 영향을 주는지 인지하는 것이 필요하다.

형상 해석은 각각의 형상에 대하여 흡입 속도비 SVR = 0.0, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8, -1.0, -1.2, -1.4 인 8가지 경우에 대해 각기 계산을 수행하여 압력분포를 구하였다. 각각의 흡입 속도비에 대해서 구해진 lip 면과 ramp 면의 최저 압력 C_{Pmin}을 대응되는 흡입 속도비에 대해 도시한 후, SVR₀와 C_{Pmax}을 구하였다.

우선 Table 1의 형상들에 대한 형상 해석을 통해 1차 탐색을 수행하여 초기 최적 형상을 찾았다.

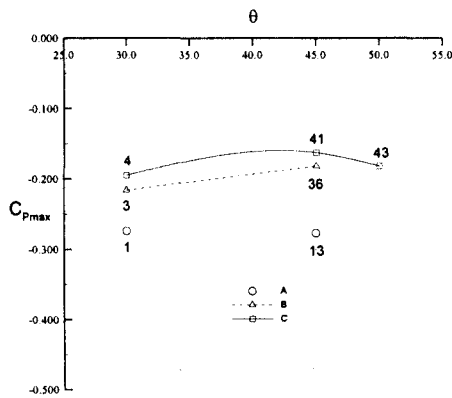


Fig. 5 Dependence of C_{Pmax} value on θ (1st survey)

Fig. 5에는 형상 파라미터중 θ 를 변화시키고, 다른 형상 파라미터들은 같게 했을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 그림과 같이 3종류의 등급으로 변화를 주었으며 3종류의 등급은 다음과 같다.

- A: $\theta = 30 \sim 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 1.5$, $\frac{h_L}{B} = 0.5$, $\lambda_R = 2.0$, $\lambda_L = 4.0$
- B: $\theta = 30 \sim 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$
- C: $\theta = 30 \sim 50^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 1.0$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$

그림으로부터 C등급의 $\theta = 45^\circ$ 인 41번 형상이 가장 큰 C_{Pmax} 값을 가지는 것을 알 수 있다.

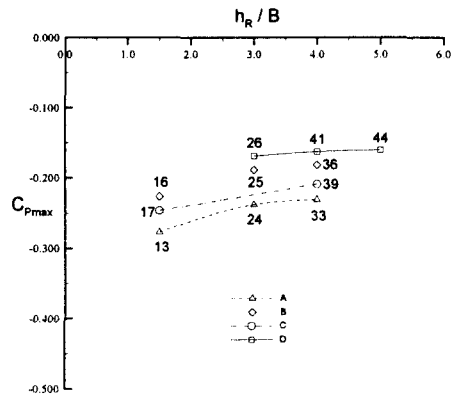


Fig. 6 Dependence of C_{Pmax} value on h_R/B (1st survey)

Fig. 6에는 h_R/B 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 4종류의 등급 변화를 주었으며 4종류의 등급은 다음과 같다.

- A: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 1.5 \sim 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5$, $\lambda_R = 2.0$, $\lambda_L = 4.0$
- B: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 1.5 \sim 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$
- C: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 2.0 \sim 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 1.0$, $\lambda_R = 2.0$, $\lambda_L = 4.0$
- D: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 3.0 \sim 5.0$, $\frac{h_L}{B} = 1.0$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$

그림으로부터 h_R/B 값이 클수록 큰 C_{Pmax} 값이 얻어짐을 알 수 있었고, D등급에서 $h_R/B = 5.0$ 을 갖는 44번 형상이 가장 큰 C_{Pmax} 값을 갖는 좋은 형상으로 나타났다.

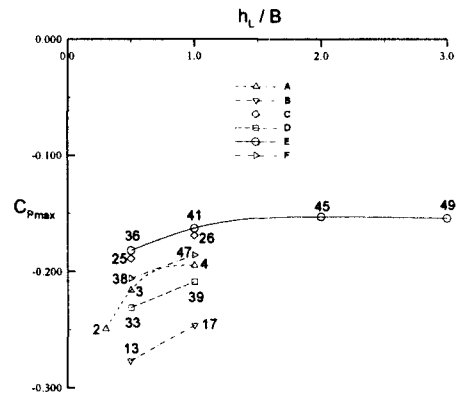


Fig. 7 Dependence of C_{Pmax} value on h_L/B (1st survey)

Fig. 7에는 h_L/B 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 6종류의 등급 변화를 주었으며 6종류의 등급은 다음과 같다.

- A: $\theta = 30^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.3 \sim 1.0$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$
- B: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 1.5$, $\frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 1.0$, $\lambda_R = 2.0$, $\lambda_L = 4.0$
- C: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 3.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 1.0$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$
- D: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 1.0$, $\lambda_R = 2.0$, $\lambda_L = 4.0$
- E: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 3.0$, $\lambda_R = 3.0$, $\lambda_L = 4.0$
- F: $\theta = 45^\circ$, $\frac{h_R}{B} = 4.0$, $\frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 1.0$, $\lambda_R = 4.0$, $\lambda_L = 4.0$

그림으로 부터 h_L/B 를 크게 할수록 각 등급에
서의 C_{Pmax} 값이 증가하는 경향을 보임을 알 수
있었고, E등급에서 $h_L/B = 2.0$ 의 45번 형상이 가
장 큰 C_{Pmax} 값을 얻는 좋은 형상으로 나타났다.

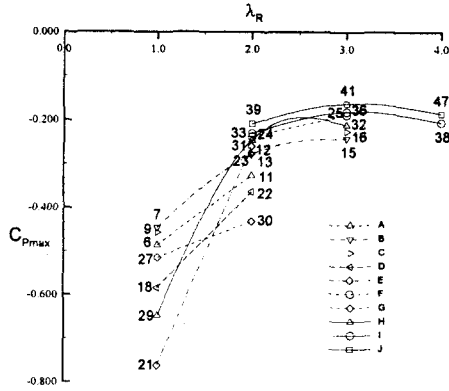


Fig. 8 Dependence of C_{Pmax} value on λ_R
(1st survey)

Fig. 8에는 λ_R 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을
도시하였다. 10종류의 등급변화를 주었으며 10종
류의 등급은 다음과 같다.

- A: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 1.0 \sim 2.0, \lambda_L = 2.5$
- B: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 1.0 \sim 3.0, \lambda_L = 3.0$
- C: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 1.0 \sim 3.0, \lambda_L = 4.0$
- D: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 2.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 1.0 \sim 2.0, \lambda_L = 0.5$
- E: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 2.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 1.0 \sim 2.0, \lambda_L = 3.0$
- F: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 3.0, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 2.0 \sim 3.0, \lambda_L = 4.0$
- G: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 3.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 1.0 \sim 2.0, \lambda_L = 0.5$
- H: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 3.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 1.0 \sim 3.0, \lambda_L = 3.0$
- I: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 2.0 \sim 4.0, \lambda_L = 4.0$
- J: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 2.0 \sim 4.0, \lambda_L = 4.0$

그림으로부터 10종류의 등급 모두 λ_R 값이 3.0보
다 작을 때는 C_{Pmax} 값이 증가하는 경향을 보이지

만, λ_R 값이 3.0보다 클 때는 오히려 C_{Pmax} 값이 감
소의 경향을 보임을 알 수 있다. C_{Pmax} 값의 비교
결과, J등급에서 $\lambda_R = 3.0$ 의 41번 형상이 가장 큰
 C_{Pmax} 값을 갖는 좋은 형상으로 나타났다.

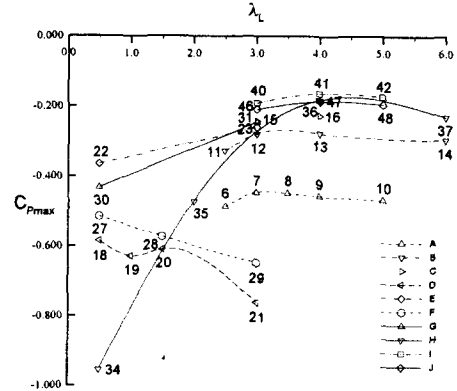


Fig. 9 Dependence of C_{Pmax} value on λ_L
(1st survey)

Fig. 9에는 λ_L 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을
도시하였다. 10 종류 of 등급 변화를 주었으며 10
종류의 등급은 다음과 같다.

- A: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 1.0, \lambda_L = 2.5 \sim 5.0$
- B: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 2.0, \lambda_L = 2.5 \sim 6.0$
- C: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 1.5, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 3.0 \sim 4.0$
- D: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 2.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 1.0, \lambda_L = 0.5 \sim 3.0$
- E: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 2.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 2.0, \lambda_L = 0.5 \sim 3.0$
- F: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 3.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 1.0, \lambda_L = 0.5 \sim 3.0$
- G: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 3.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 2.0, \lambda_L = 0.5 \sim 3.0$
- H: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 0.5, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 0.5 \sim 6.0$
- I: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 3.0 \sim 5.0$
- J: $\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 4.0, \lambda_L = 3.0 \sim 5.0$

그림으로부터 10종류의 등급 모두 λ_L 값이 4.0보
다 작을 때는 C_{Pmax} 값이 증가하는 경향을 보이지

만, λ_L 값이 4.0보다 클 때는 오히려 C_{Pmax} 값이 감소의 경향을 보임을 알 수 있다. C_{Pmax} 값의 비교 결과, 1등급에서 $\lambda_L = 4.0$ 의 41번 형상이 가장 큰 C_{Pmax} 값을 갖는 좋은 형상으로 나타났다.

1차 탐색에 의해 수행된 49개 형상들에 대한 등급간의 비교와 C_{Pmax} 값들의 크기 비교를 통해 공동 발생 억제에 관점에서 45번 형상이 가장 나은 초기 형상으로 나타났다.

45번 형상에 대한 각각의 파라미터 값은 다음과 같다.

$$\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 4.0$$

Table 1에 일정한 등급으로 분류하여 표기한 형상들을 대상으로 한 1차 탐색을 통해 최적 형상으로 나타난 45번 형상을 기준으로 각각의 형상 파라미터들에 대소변화를 주어 2차 탐색을 수행하여 최종적인 최적 형상을 구하였다.

4.4 최적형상의 제2차 탐색

2차 탐색에서는 1차 탐색에서 가장 좋게 나타난 45번 형상을 기준으로 1차 탐색 때와 마찬가지로 각각의 형상 파라미터들의 크기를 변화시켜가며 형상해석을 수행하였고, C_{Pmax} 값의 비교에 의해 가장 큰 C_{Pmax} 값을 갖는 최적 형상을 구하였다.

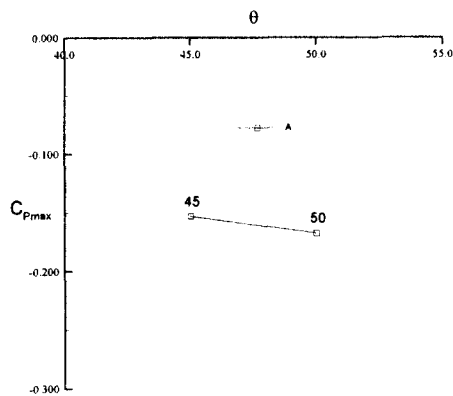


Fig. 10 Dependence of C_{Pmax} value on θ (2nd survey)

Fig. 10에는 형상 파라미터중 θ 를 변화시키고, 다른 형상 파라미터들은 같게 했을 때의 C_{Pmax} 값을 비교 도시하였다. θ 의 변화에서는 1차 탐색의 결과와 마찬가지로 $\theta = 45^\circ$ 가 가장 나은 결과를 주는 것으로 나타났다.

Fig. 11에는 h_R/B 만을 변화시켰을 때 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 1차 탐색의 최적 값으로 나타난 45번 형상에서 파라미터를 변화시켜 얻은 하나의 등급은 다음과 같다.

$$A: \theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0 \sim 8.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 4.0$$

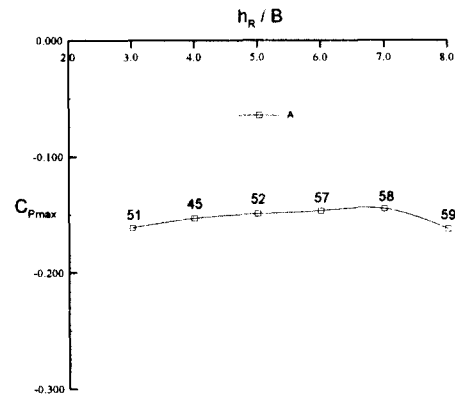


Fig. 11 Dependence of C_{Pmax} value on h_R/B (2nd survey)

45번 형상에서 h_R/B 를 1.0 증가시킨 52번 형상에 대해 형상해석을 통해 증가된 C_{Pmax} 값을 얻었고, h_R/B 파라미터값의 증가만으로 형상이 최적 형상으로 가고 있음을 알았다. 이로부터 h_R/B 의 파라미터가 최적형상의 결정에 큰 영향을 미치는 것으로 판단하여 h_R/B 를 더 증가시켜 형상해석을 수행하였다. 52번 형상에서 h_R/B 를 1.0 증가시킨 57번 형상에 대해 형상해석을 통해 52번 형상에 비해 증가된 C_{Pmax} 값을 얻었고, 57번 형상에서 h_R/B 를 1.0 증가시킨 58번 형상에 대해 형상해석을 통해 1차 탐색과 지금까지 수행된 2차 탐색의 계산결과들 중에서 가장 큰 C_{Pmax} 값을 얻었으

나, 58번 형상에서 h_R/B 를 1.0 증가시킨 59번 형상에 대해서는 그림에서와 같이 오히려 58번 형상에 비해 감소된 C_{Pmax} 값을 얻는 것으로 나타났다. 이로부터 h_R/B 를 7.0이상으로 증가시키는 것은 공동 발생 억제에 관점에서 오히려 나쁜 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12에는 h_L/B 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 1차 탐색의 최적 값으로 나타난 45번 형상에서 파라미터를 변화시켜 얻은 하나의 등급은 다음과 같다.

$$A: \theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 0.5 \sim 2.0, \lambda_R = 2.0, \lambda_L = 4.0$$

그림에 보인 바와 같이 B등급의 1차 탐색의 결과와 비교했을 때 2차 탐색의 결과는 h_L/B 의 증가가 C_{Pmax} 값의 증가로 이어지지 않고 오히려 C_{Pmax} 값이 감소하는 공동 발생 억제에 관점에서 나빠지는 것을 알 수 있었다.

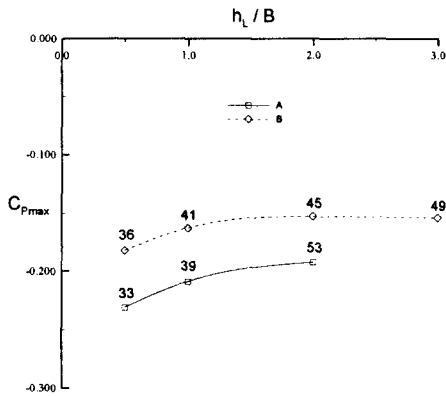


Fig. 12 Dependence of C_{Pmax} value on h_L/B (2nd survey)

Fig. 13에는 λ_R 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 한 종류의 등급을 이루어 계산하였으며, 등급은 다음과 같다.

$$A: \theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 2.0 \sim 4.0, \lambda_L = 4.0$$

1차 탐색의 최적 값으로 나타난 45번 형상에서

파라미터를 대소 변화시킨 2차 탐색의 결과는 위의 h_L/B 의 변화 결과와 같음을 알 수 있었다.

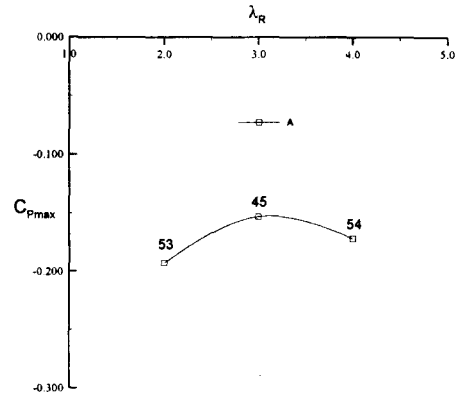


Fig. 13 Dependence of C_{Pmax} value on λ_R (2nd survey)

Fig. 14에는 λ_L 만을 변화시켰을 때의 C_{Pmax} 값을 도시하였다. 한 종류의 등급을 이루어 계산하였으며, 등급은 다음과 같다.

$$A: \theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 4.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 3.0 \sim 5.0$$

2차 탐색의 결과는 λ_L 의 변화가 오히려 공동 발생 억제에 나쁜 영향을 주는 것을 알 수 있다.

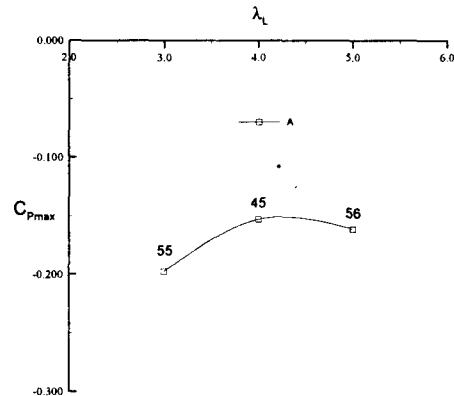


Fig. 14 Dependence of C_{Pmax} value on λ_L (2nd survey)

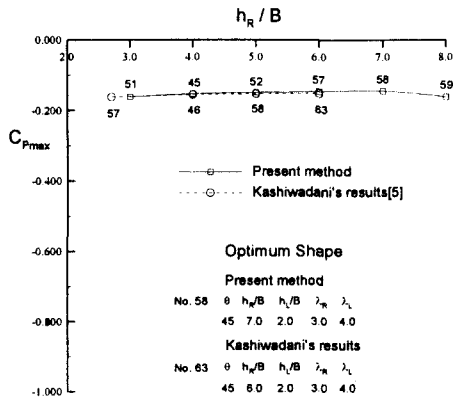


Fig. 15 Pressure distribution of final stage

Fig. 10, 12, 13, 14, 15에 도시한 각각의 형상 파라미터에 대한 형상해석의 수행 결과로 얻어진 C_{Pmax} 값을 비교한 결과, 58번 형상을 최적형상으로 택하였으며, 2차 탐색에서는 입구면 형상을 구성하는 파라미터중 h_R/B 를 제외한 나머지 파라미터들은 최적형상의 결정에 큰 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다.

1차와 2차 탐색의 수행 결과로 얻어진 최적형상은 Fig. 15에 보인 바와 같이 Kashiwadani[3]의 결과와 유사함을 알 수 있다.

h_R/B 를 58번보다 크게 한 형상은 Fig. 15와 같이 압력분포가 낮아지는 방향으로 변화하여, 공동 발생의 가능성이 있고, 또 h_R/B 를 너무 크게 하면, 선체의 전방까지 ramp부가 신장된 것으로 되기때문에, 본 논문에서는 58번 형상을 최적형상으로 택하였다.

최적형상으로 나타난 58번 형상에 대한 각각의 파라미터값은 다음과 같다.

$$\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 7.0, \frac{h_L}{B} = 2.0, \lambda_R = 3.0, \lambda_L = 4.0$$

5. 형상설계법의 적용

형상해석을 수행하여 얻어진 최적 형상 선택과 병행하여 본 논문에서는 원하는 압력분포를 주었

을 때 이에 대응하는 단면형상을 설계할 수 있도록 하였다. 그러나, 물분사 추진기의 최적 압력 분포를 모르기 때문에 본 논문에서는 형상해석을 통해 주어진 압력분포를 입력자료로 하여 단면을 설계할 수 있는 수치계산법을 확립하였다. 설계계산에 사용된 형상파라미터는 다음과 같다.

$$\theta = 45^\circ, \frac{h_R}{B} = 2.0, \frac{h_L}{B} = 1.0, \lambda_R = 4.0, \lambda_L = 2.0$$

이상의 파라미터로 얻어진 형상에 대해 흡입속도비를 -0.6으로 형상해석을 수행하여 얻어진 입구면 주위의 압력을 입력자료로 하여 주어진 압력분포가 되도록 단면을 구하고 원래의 단면형상이 되는가를 확인하였다. 단면형상의 설계는 ramp와 lip면에 대해 각각 수행하였다.

Lip면의 설계는 ramp면과는 달리 x 좌표가 다중 값이 되기 때문에, 이것을 고려하여 설계를 하여야만 한다. Ramp면의 압력을 입력자료로 하여 ramp면 설계를 수행한 결과를 Fig. 16에 도시하였다.

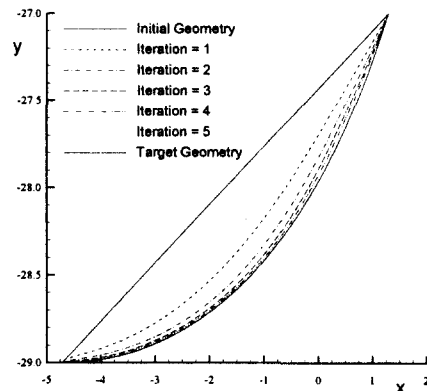


Fig. 16 Convergency history of a ramp shape

약 3회 정도의 반복계산으로 원래의 형상을 찾아가는 것이 확인되었다.

또, lip면의 압력을 입력자료로 하여 lip면 설계를 수행하였고, 계산결과를 Fig. 17에 도시하였다. Ramp설계와 마찬가지로 약 5회 정도 반복계산으로 원래의 형상을 찾아가는 것이 확인되었다. 따

라서 최고의 효율을 가질 수 있는 최적의 압력분포를 안다면 본 방법에 의해 최적 형상을 구할 수 있을 것으로 생각되며, 앞으로 최적의 압력분포를 알기 위한 실험적 연구가 지속적으로 수행되어야 하겠다.

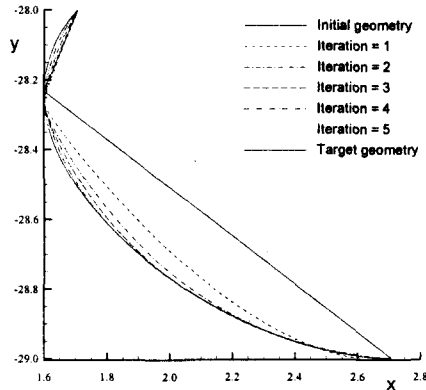


Fig. 17 Convergency history of a lip shape

6. 결 언

물분사 추진장치의 입구면 형상의 형상해석을 위한 수치기법을 개발하였다. 본 논문에서는 형상 해석 기법을 활용하여 공동 발생을 최소화하는 최적의 형상을 찾으려 하였다. 파라미터법을 사용하여 얻은 총 59개의 입구면 형상에 대해 입구면 주위의 압력분포를 계산하였고, 이 형상들에 대한 입구면 주위의 압력분포 결과를 토대로 공동의 발생이 최소화되는 최적의 입구면 형상을 찾을 수 있음을 보였다.

주어진 압력분포를 입력자료로 하여 이 압력분포에 대응하는 단면형상을 설계하는 수치계산법을 개발하였으나, 입구면 주위의 최적의 압력분포를 알지 못하므로 본 논문에서는 임의의 형상에 대한 형상해석을 통하여 얻어진 입구면 주위의 압력분포를 입력자료로 하여 주어진 압력분포에 대응하는 단면형상이 주어진 형상을 찾아감을 보였다.

앞으로 3차원 형상에 대한 포텐셜 유동 해석은

물론, Forde[5], Masuko[6]의 결과와 같이 점성의 영향을 고려하여 입구면 주위의 유동해석을 수행할 수 있는 수치계산 기법의 확보가 시급한 문제이며, 복잡한 단면 형상을 가지는 입구면에 대해서도 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 1993년도의 특정기초연구과제(93-0700-03-01-3)로 수행되었으며, 당재단에 심심한 사의를 표한다.

참 고 문 헌

- [1] Lee, C-S., Lew, J-M. and Kim, Y-G. : "Analysis of a two-dimensional partially- or supercavitating hydrofoil advancing under a free surface with a finite Froude number", Proc. 19th On Naval Hydrodynamics, 1992
- [2] Lee, C-S., Kim, Y-G. and Suh, J-C. : "A Surface Panel Method for Design of Hydrofoils", J.S.R. Vol. 38, No. 3, 1994
- [3] Kashiwadani, T. : "The study on the configuration of waterjet inlet (1st Report)", J.S.N.A., Vol. 157, 1985
- [4] Kashiwadani, T. : "The study on the configuration of waterjet inlet (2nd Report)", J.S.N.A. Vol. 159, 1986
- [5] Forde, M., Orbekk, E. and Kubberud, N. : "Computational fluid dynamics applied to high speed craft with special attention to water intake for water jets," Proc. FAST '91, Trondheim, 1991
- [6] Masuko, A., Abe, A. and Nakamura, H. : "Numerical Calculation of viscous flow passing through waterjet inlets," Proc. Hull Form '92, Inha Univ., 1992
- [7] T. Hoshino and E. Baba : "Self-Propulsion Test of a Semi-displacement Craft Model with a Waterjet Propulsor", 일본조선학회논문집, 제 155호, 1984

Table 1 Shape parameters of the inlet configurations. (1st survey)

Inlet No.	θ °	h_R/B	h_L/B	λ_R	λ_L
1	30	1.5	0.5	2.0	4.0
2	30	4.0	0.3	3.0	4.0
3	30	4.0	0.5	3.0	4.0
4	30	4.0	1.0	3.0	4.0
5	45	1.0	0.3	1.0	4.0
6	45	1.5	0.5	1.0	2.5
7	45	1.5	0.5	1.0	3.0
8	45	1.5	0.5	1.0	3.5
9	45	1.5	0.5	1.0	4.0
10	45	1.5	0.5	1.0	5.0
11	45	1.5	0.5	2.0	2.5
12	45	1.5	0.5	2.0	3.0
13	45	1.5	0.5	2.0	4.0
14	45	1.5	0.5	2.0	6.0
15	45	1.5	0.5	3.0	3.0
16	45	1.5	0.5	3.0	4.0
17	45	2.0	1.0	2.0	4.0
18	45	2.0	1.0	1.0	0.5
19	45	2.0	1.0	1.0	1.0
20	45	2.0	1.0	1.0	1.5
21	45	2.0	1.0	1.0	3.0
22	45	2.0	1.0	2.0	0.5
23	45	2.0	1.0	2.0	3.0
24	45	2.0	1.0	2.0	4.0
25	45	3.0	0.5	3.0	4.0
26	45	3.0	1.0	3.0	4.0
27	45	3.0	2.0	1.0	0.5
28	45	3.0	2.0	1.0	1.5
29	45	3.0	2.0	1.0	3.0
30	45	3.0	2.0	2.0	0.5
31	45	3.0	2.0	2.0	3.0
32	45	3.0	2.0	3.0	3.0
33	45	4.0	0.5	2.0	4.0
34	45	4.0	0.5	3.0	0.5
35	45	4.0	0.5	3.0	2.0
36	45	4.0	0.5	3.0	4.0
37	45	4.0	0.5	3.0	6.0
38	45	4.0	0.5	4.0	4.0
39	45	4.0	1.0	2.0	4.0
40	45	4.0	1.0	3.0	3.0
40	45	4.0	1.0	3.0	3.0
41	50	4.0	1.0	3.0	4.0
42	45	4.0	1.0	3.0	5.0
43	50	4.0	1.0	3.0	4.0
44	45	5.0	1.0	3.0	4.0
45	45	4.0	2.0	3.0	4.0
46	45	4.0	1.0	4.0	3.0

Inlet No.	θ °	h_R/B	h_L/B	λ_R	λ_L
47	45	4.0	1.0	4.0	4.0
48	45	4.0	1.0	4.0	5.0
49	45	4.0	3.0	3.0	4.0

Table 2 Shape parameters of the inlet configurations. (2nd survey)

Inlet No.	θ	h_R/B	h_L/B	λ_R	λ_L	C_{Pmax}	SVR_0
45	45	4.0	2.0	3.0	4.0	-0.1530	-0.3260
50	50	4.0	2.0	3.0	4.0	-0.1677	-0.3519
51	45	3.0	2.0	3.0	4.0	-0.1613	-0.1320
52	45	5.0	2.0	3.0	4.0	-0.1490	-0.5140
41	45	4.0	1.0	3.0	4.0	-0.1630	-0.6520
49	45	4.0	3.0	3.0	4.0	-0.1542	-0.0630
53	45	4.0	2.0	2.0	4.0	-0.1925	-0.1358
54	45	4.0	2.0	4.0	4.0	-0.1715	-0.1936
55	45	4.0	2.0	3.0	3.0	-0.1973	-0.7878
56	45	4.0	2.0	3.0	5.0	-0.1613	-0.4730
57	45	6.0	2.0	3.0	4.0	-0.1464	-0.7021
58	45	7.0	2.0	3.0	4.0	-0.1448	-0.8939
59	45	8.0	2.0	3.0	4.0	-0.1620	-1.0170