

展開板에 대한 數値解析*

— 5. 渦絲近似法에 의한 特性計算 —

高冠瑞 · 權炳國 · 盧基德**

부산수산대학교 · 통영수산전문대학**

(1992년 5월 6일 접수)

Computational Fluid Analysis for the Otter Boards*

— 5. Simulation for the Fluid Characteristics of the Otter Boards
by the Discrete Vortex Method —

Kwan-Soh KO, Byeong-Guk KWON and Ki-Deok Ro**

National Fisheries University of Pusan, **National Tongyeong Fisheries Junior College

(Received May 6, 1992)

This paper presents a method in order to calculate the vortex distribution, the streak-line and the time-line around the flat and the cambered otter board in two dimensional flow using the discrete vortex method, and to calculate C_L and C_D of the otter boards varied with the passage of time by the numerical simulation using the Blasius's formula.

The results obtained are summarized as follows :

1. Flow pattern around the otter boards calculated by the discrete vortex method was resembled closely that of the visualized photograph.
2. C_L and C_D calculated by the numerical simulation was very similar to the model test.
3. The circulation direction around the otter boards and the action direction of the shearing force can be recognized from the time-line around the otter boards.
4. Flow speed in the back side of the otter boards was faster than that in the front side, and the difference of the flow speed in both side of the cambered otter boards was about 1.3 times greater than that of the flat otter boards.
5. The clockwise vortex was generated in the trailing edge, and the counter-clockwise vortex was generated the leading edge of the otter boards. And they were shown the shape of Kärman's vortex varied with the passage of time.

* 이 논문은 1991년도 한국과학재단의 기초연구비에 의하여 연구되었음.

緒 論

前報에서 언급한 바와 같이 展開板에 대한 이제까지의 研究報告는 그 대부분이 실험에 근거하고 있어, 계측기기의 精度, 실험조건 등에 기인하여 같은 형태의 展開板이라 할지라도 연구자에 따라 서로 다른 결과를 보이고 있다. 또한 水素氣泡法에 의한 流動場의 可視化實驗의 경우, 물을 전기분해하므로써 발생하는 水素氣泡를 tracer로 이용하기 때문에 그 제어가 비교적 간단하고, tracer의 확산이 적다는 잇점이 있지만, 기포의 부상속도가 있기 때문에 展開板의 後流測에서의 흐름까지를 가시화하는 것이 어렵다는 단점도 있다.

그리고 展開板은 動的特性에 의해서 安定性에 미치는 영향이 크다고 판단되기 때문에 시간적으로 변화하는 流動特性을 理論적으로 명확하게 파악하는 것은 展開板의 精確한 設計 및 효율적인 運用 뿐만 아니라 나아가서는 성능이 보다 우수한 展開板의 開發을 위한 基礎資料로도 유용하리라고 생각된다.

따라서 本 報에서는 展開板의 力學的 性能 및 流動場을 보다 명확하게 규명하기 위하여 여러 종류의 전개판중 가장 기본적인 형태인 平板型 및 單純彎曲型 展開板에 대하여 최근 航空 및 造船分野에서 사용하고 있는 渦絲近似法(Discrete Vortex Method)을 이용한 流動場의 數值시뮬레이션 및 力學的 特性計算을 행하여, 그 결과를 前報에서의 可視化實驗 및 力學的 性能實驗의 결과와 비교·고찰하고자 한다.

計算方法

1. 解析모델 및 境界條件

높은 레이놀즈수 영역에 있어 2次元 物體 주위의 흐름은, 角部로부터 剝離하여, 剝離點으로부터 後流中으로 剝離剪斷層(Free Shear

Layers)이 생긴다. 이 剝離剪斷層은 Kirchhoff의 定常死水와 달리 불안정하다. 이 얇은 剝離剪斷層의 운동을 渦列의 운동으로 근사시켜 流動場을 해석하는 방법이 渦絲近似法이다.

한편 물체 주위의 흐름을 표시하는 데는 그것을 잘 알려져 있는 원주 둘레의 흐름에 寫像하는 방법(Sarpkaya, 1968, 1975; Kuwahara, 1973; Clements, 1973; Kiya etc, 1977, 1977; 永野 등, 1981; 龜本 등, 1983; 鳥原 등, 1986) 혹은 물체 표면을 일정수의 特異點으로 근사하는 방법(坂田 등, 1983; Ogawa, 1984; 稻室 등, 1986; 林 등, 1986; 新井 등, 1987) 등이 있다. 그러나 전자의 경우 각각의 물체에 대해서 그 물체를 원주에 사상하는 함수를 도출하지 않으면 안되기 때문에 형상이 복잡한 물체 주위의 흐름을 해석하는 데는 상당히 복잡하고, 번거로운 과정이 요구된다는 단점이 있다.

그래서 本 研究에서는 후자인 물체 표면을 일정수의 特異點으로 근사하는 방법으로 平板形 및 彎曲型 展開板 주위의 흐름을 나타내었다.

먼저 해석모델은 拘束渦(Bound vortex)를 등간격으로 배치시켜 平板形 및 彎曲形 展開板의 형상으로 근사시켜 Fig. 1과 같이 설정하여 나타내었다. 이 경우 각 展開板의 流動場을 나타내는 복소포텐셜 $F(z)$ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$F(z) = \sum_{j=1}^m i\alpha_j \log(Z - Z_j) + \sum_{i=1}^n i\tilde{\alpha}_i \log(Z - \tilde{Z}_i) + Uz \quad (1)$$

여기서 α_j , Z_j 는 전개판의 표면을 나타내는 m 개의 구속와의 강도 및 위치이고, $\tilde{\alpha}_i$, \tilde{Z}_i 는 각각 박리전단층을 표시하는 n 개의 自由渦(Free Vortex)의 강도 및 위치, 그리고 U 는 일정류를 나타낸다.

그리고 自由渦는 각 展開板의 前·後緣 근처에서 박리하여 그 강도를 유지하면서 후류중으로 방출한다. 따라서 각 time step마다 결정해야 할

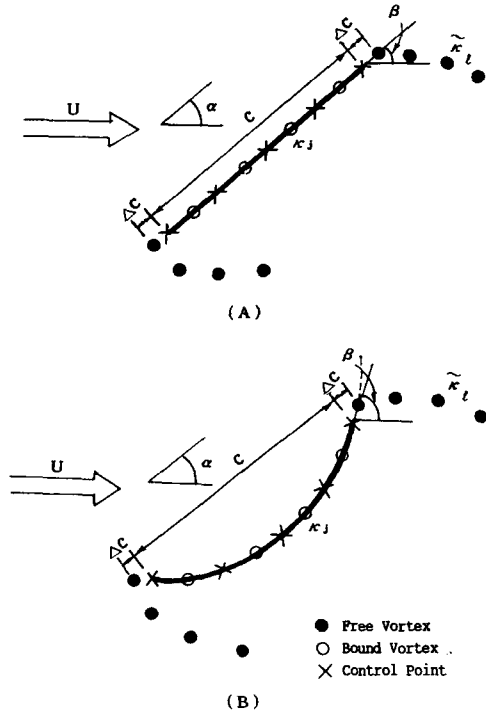


Fig. 1. Analytic models.
 (A) flat otter board.
 (B) single cambered otter board.

미지수는 m 개의 구속와의 강도(χ_j), 2개의 자유와의 강도 및 물체 표면의 유동함수 ψ_0 이며, 모두 $m+3$ 개이다.

이 미지수를 결정하는 境界條件으로는 인접하는 拘束渦의 중점(그림중의 X 표시), 즉 $m+1$ 개의 검사점에서의 유동함수 조건인

$$\psi = \psi_0 = \text{constant} \quad (2)$$

와 Kelvin의 정리

$$\sum_{j=1}^m \chi_j + \sum_{l=1}^n i\tilde{\chi}_l = 0 \quad (3)$$

및 후연에서의 Kutta의 조건

$$-Im\left\{e^{i\beta} \cdot \frac{dF}{dz} \Big|_{z=z_1}\right\} = 0 \quad (4)$$

을 이용했다. 여기서 ψ 는 복소포텐셜의 유동함

수, Im 은 허수부, β 는 후연 Z 에서 전개판의 접선과 일정류가 이루는 각도를 나타낸다.

2. 流動場의 시뮬레이션

流動場의 시뮬레이션(본 연구에서는 渦의 분포, 流脈線 및 타임라인)은 각각의 유체역학적 정의를 이용하여 복소포텐셜 식(1)을 근거로 해서 계산하며, 본 연구에서의 시뮬레이션 방법을 다음과 같이 간단히 설명한다.

먼저 自由渦는 각 전개판의 전·후연으로부터 ΔC 떨어진 곳에서 박리하여 time step Δt 마다 후류중으로 방출하며, l 번째의 자유와 \tilde{Z}_l 의 이동은 Euler방법을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_l(t + \Delta t) &= \tilde{Z}_l(t) + W \cdot \Delta t \\ W &= \frac{1}{2} \{F(z) - i\tilde{\chi}_l \log(Z - \tilde{Z}_l)\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \tilde{Z}_l 은 l 번째의 자유와의 위치, $-$ 는 공액복소수, W 는 l 번째의 자유와를 제외한 모든 와로부터 유기되는 속도이며, Δt 는 자유와를 이동시키는 시간간격이다.

다음으로 流脈線은 유동장의 상류측 임의의 일 점을 *tracer* 源으로 하고, 그곳에서 Δt 마다 계속 해서 *tracer*를 넣어 계산한다. 그리고, 그 점을 차례로 통과해가는 *tracer*의 이동은 자유와의 이동에서와 같이 식(5)를 이용하지만, 이때 복소속도 W 는 구속와를 포함하여 모든 자유와로부터 구한다.

또한 타임라인은 *tracer* 源을 흐름에 수직인 하나의 직선상으로 배열시켜 일정시간간격(본 연구에서는 $8\Delta t$)으로 일제히 방출시켜 계산하며, 그 移動方法은 流脈線에서와 같다.

3. 力學的 特性計算

각 전개판에 작용하는 힘, 즉 전개력 L 및 항력 D 는 전개판의 표면에 작용하는 비정상압력을 전주(全周) 적분하여 구하는 방법(盧, 1989) 혹

은 비정상영역으로 확장한 Blasius 공식(坂田, 1983)을 이용해서 구할 수 있는데, 본 연구에서는 전개판이 정상류중의 단독물체이므로 계산의 간소화를 위하여 후자를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 D-iL &= i\rho \oint_B \frac{\partial F}{\partial t} dZ \\
 &+ \frac{i\rho}{2} \oint_B \left(\frac{dF}{dZ}\right)^2 dZ \\
 &= -2\pi\rho \left[iU \sum_{j=1}^m \chi_j \right. \\
 &\left. + \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n \chi_j \left\{ \tilde{\chi}_l \cdot \frac{1}{Z-Z_l} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

$$-i \sum_{j=1}^m \chi_j Z_j - i \tilde{\chi}_l^{new} \tilde{Z}_l^{new} \quad (6)$$

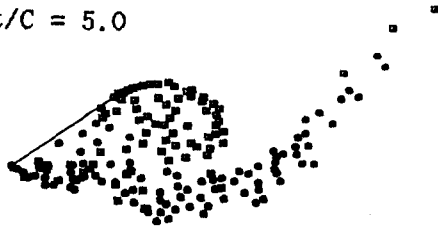
여기서 ρ 는 유체의 밀도, B는 물체 둘레의 적분 경로, $\tilde{\chi}_l^{new}$, \tilde{Z}_l^{new} 는 각 time step 마다 새로이 방출되는 자유와의 강도 및 위치를 나타낸다. 그리고, \cdot 는 시간차분으로 다음과 같이 계산된다.

$$\chi_j = \frac{\chi_j(t+\Delta t) - \chi_j(t)}{\Delta t}$$

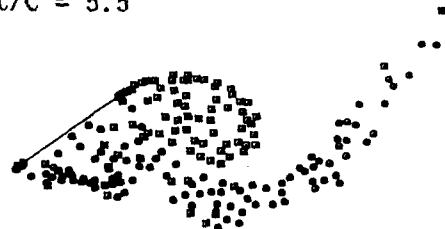
計算結果 및 考察

먼저 計算條件은 익현장 $C=1$, 일정류 $U=1$,

Ut/C = 5.0



Ut/C = 5.5



Ut/C = 6.0



Ut/C = 6.5



Ut/C = 7.0



Ut/C = 7.5



Fig. 2. Distribution of vortex varied with the passage of time around the flat otter board at $\alpha=35^\circ$.

구속와의 수 $m=20$, time step $\Delta t=0.05sec$ 및 전·후연에서 자유와까지의 거리 $\Delta C=0.025C$ 로 하였다. 또한 계산결과와 실험결과와의 비교를 쉽게 하기 위하여 전개판의 기하학적 형태는 실험에서의 그것과 일치시켰다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 영각 35° 인 평판형전개판 및 영각 30° 인 만곡형전개판 주위에서의 時間的으로 변화하는 渦分布에 대한 시뮬레이션의 결과 중 time step 100에서 150까지를 10step 간격으로 나타낸 것이다. 그림에서 $Ut/c=5.0$ 은 time step=100을 뜻한다.

그림에서 보면, 兩展開板 모두 前緣쪽에서는

反時計方向의 渦가, 後緣쪽에서는 時計方向의 渦가 계속적으로 발생하여 시간이 변화함에 따라 후류측으로 이동해가면서 칼만볼텍스의 모양을 이루는 것을 알 수 있다.

1. 流脈線

영각 $15\sim 30^\circ$ 에서 5° 간격으로 실시한 平板形展開板 주위에서의 流脈線에 대한 可視化寫眞과 數値시뮬레이션의 결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 나타내었다.

각각의 영각에 있어서 시뮬레이션의 결과는 가시화사진과 비교적 잘 일치하고 있다. 그리고, 영각 20° 부터 展開板의 前·後緣에서 剝離가 강

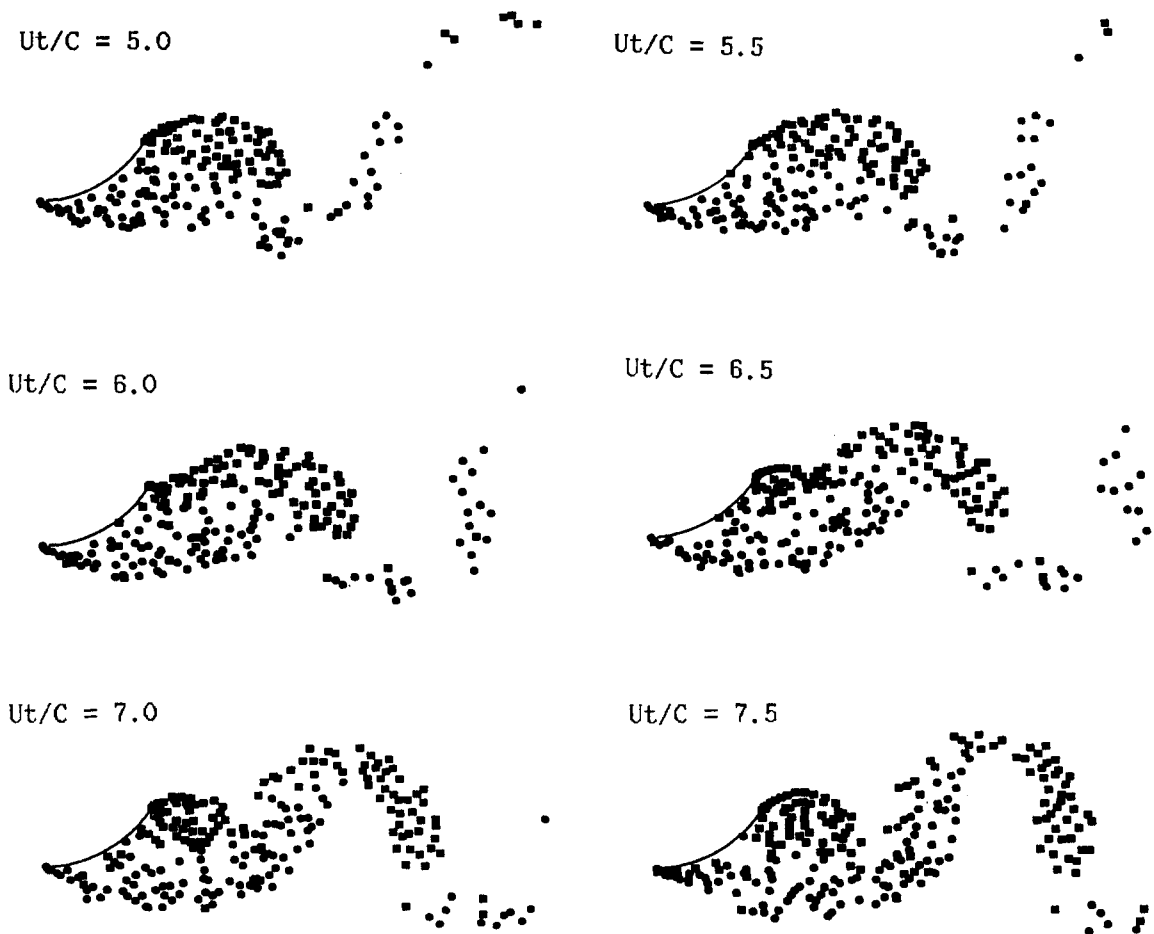


Fig. 3. Distribution of vortex varied with the passage of time around the single cambered otter board at $\alpha=30^\circ$.

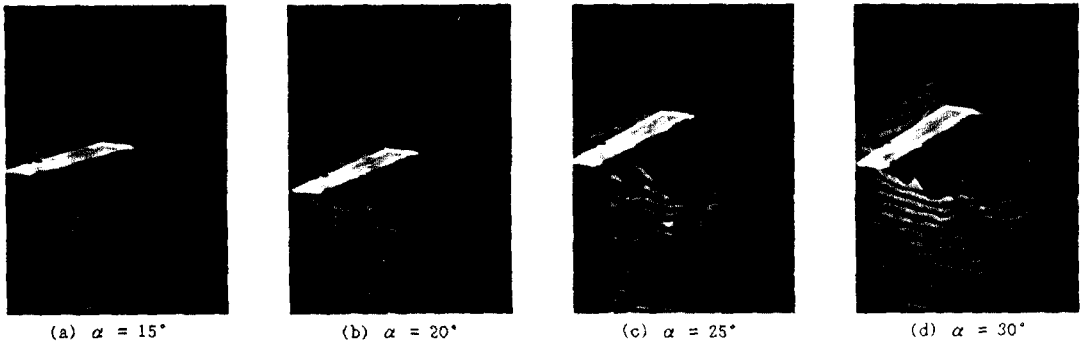


Fig. 4. Photographs for the streak-line around the flat otter board at $\alpha=15, 20, 25$ and 30° .

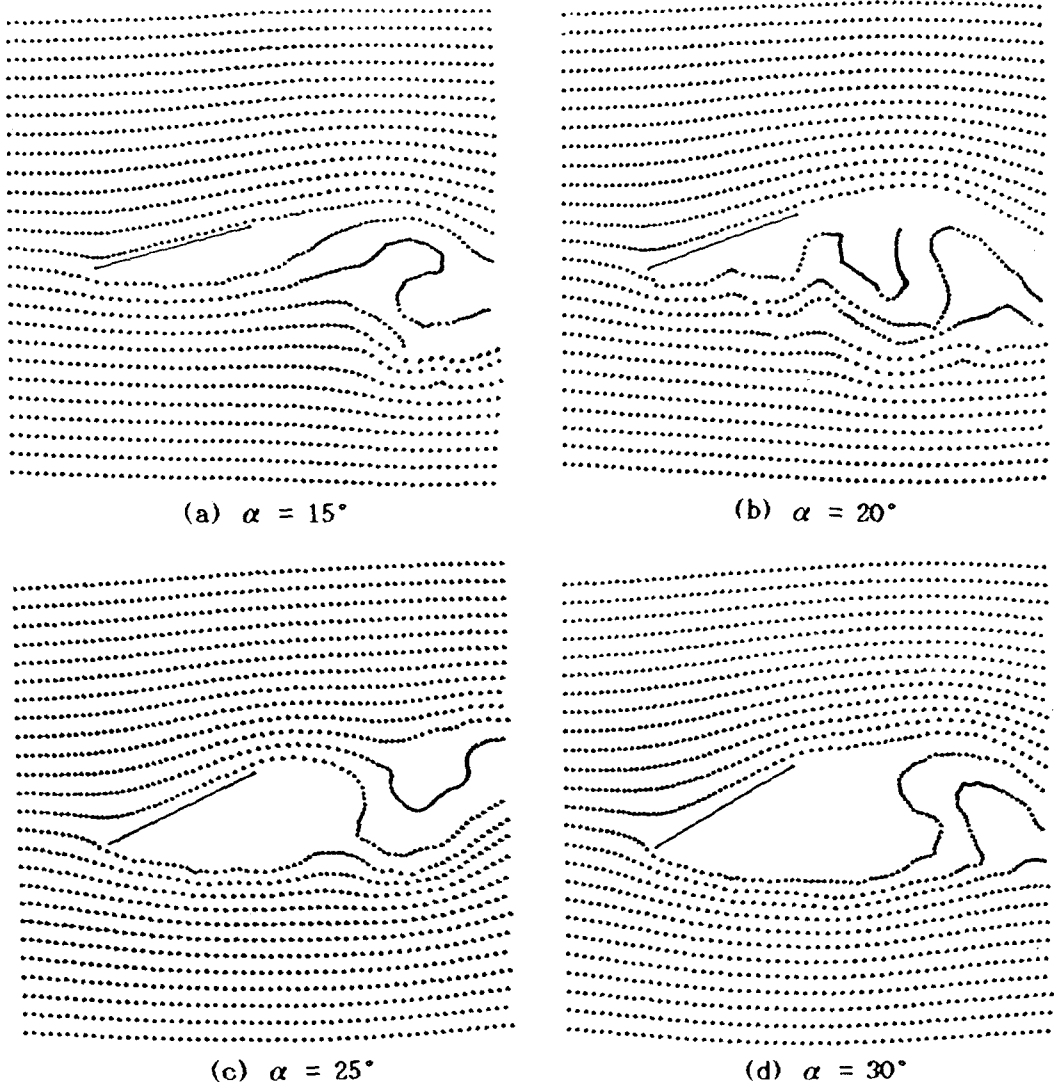


Fig. 5. Results of the computational analysis for the streak-line around the flat otter board at $\alpha=15, 20, 25$ and 30° .

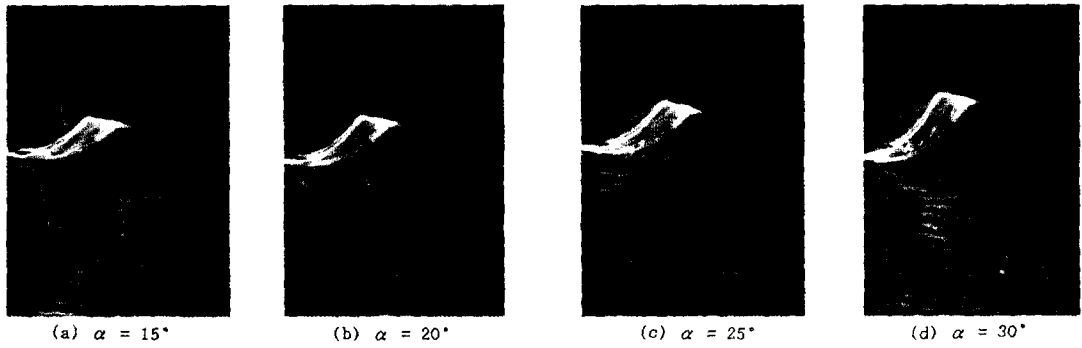


Fig. 6. Photographs for the streak-line around the single cambered otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

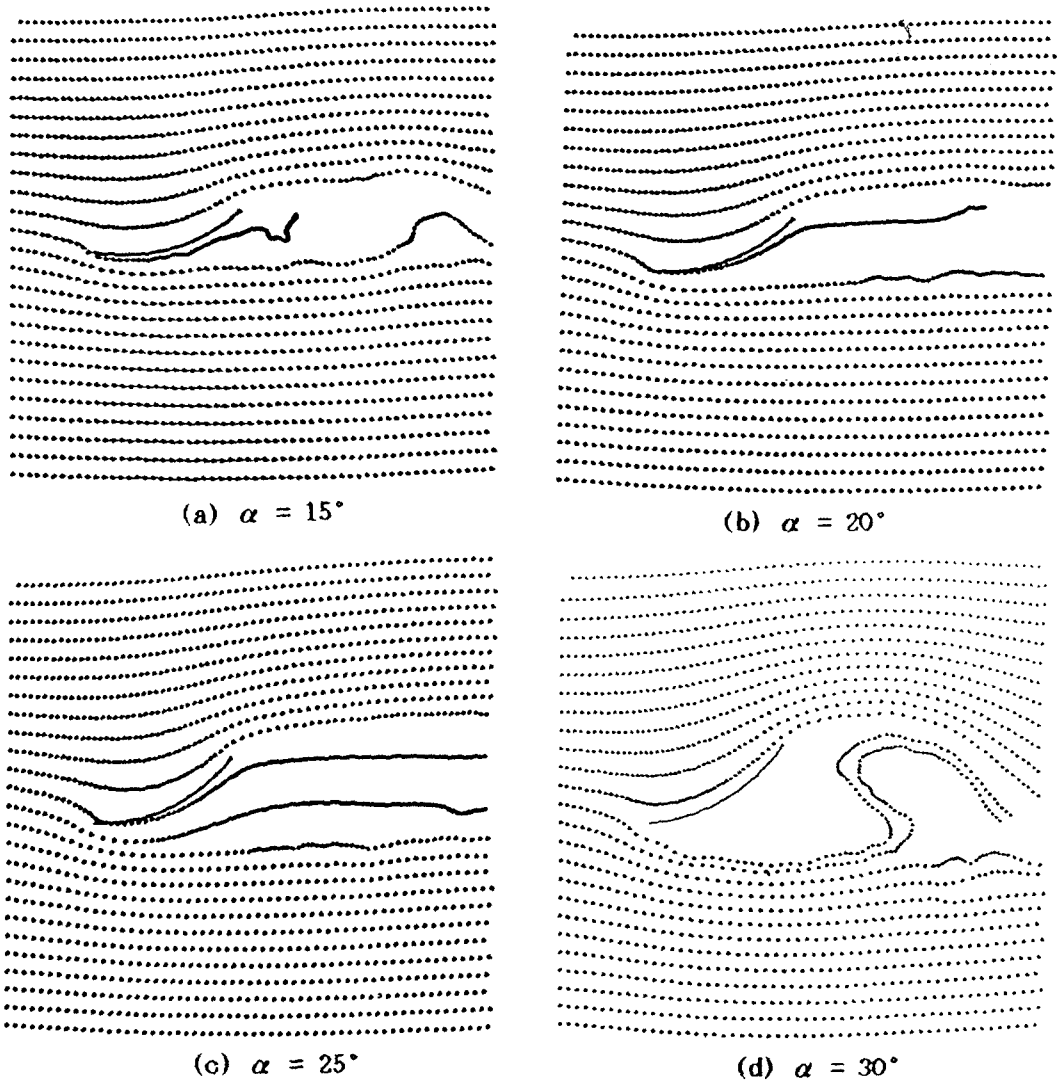


Fig. 7. Results of the computational analysis for the streak-line around the single cambered otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

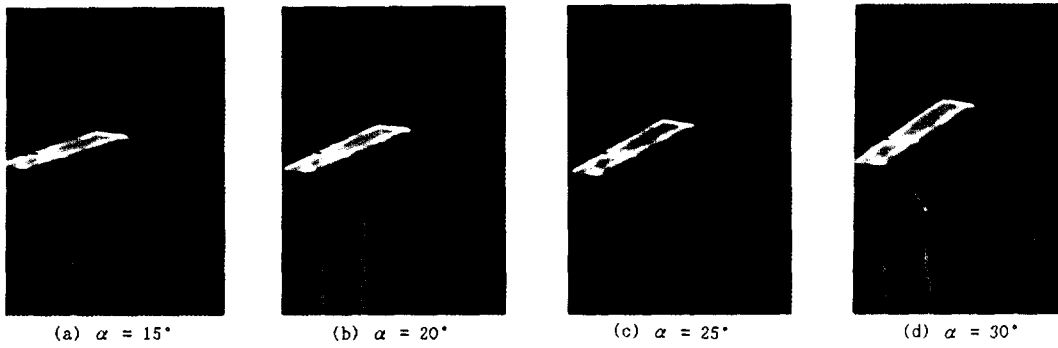


Fig. 8. Photographs for the time-line around the flat otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

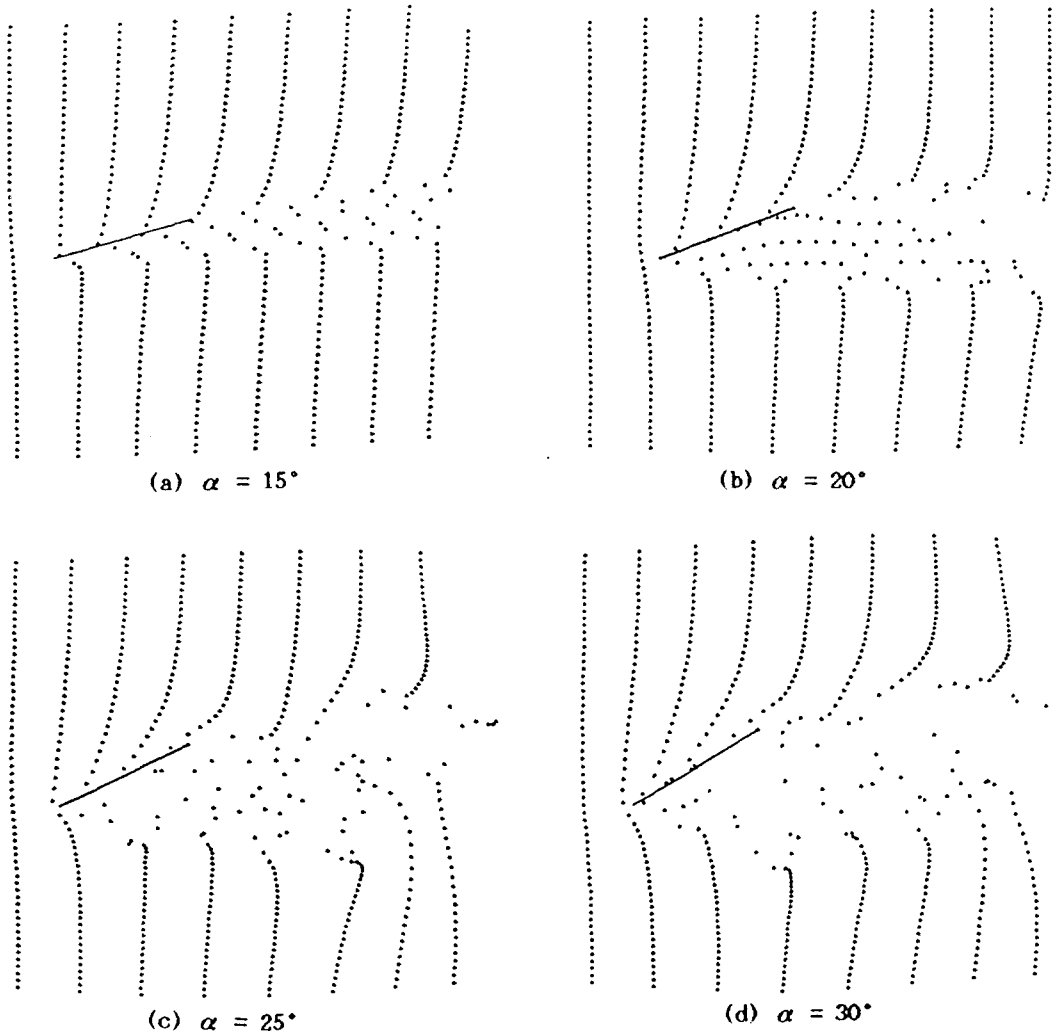


Fig. 9. Results of the computational analysis for the time-line around the flat otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

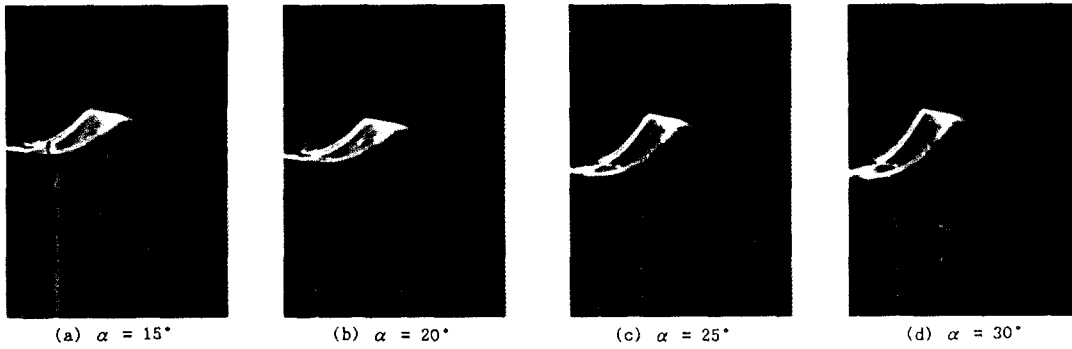


Fig. 10. Photographs for the time-line around the single cambered otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

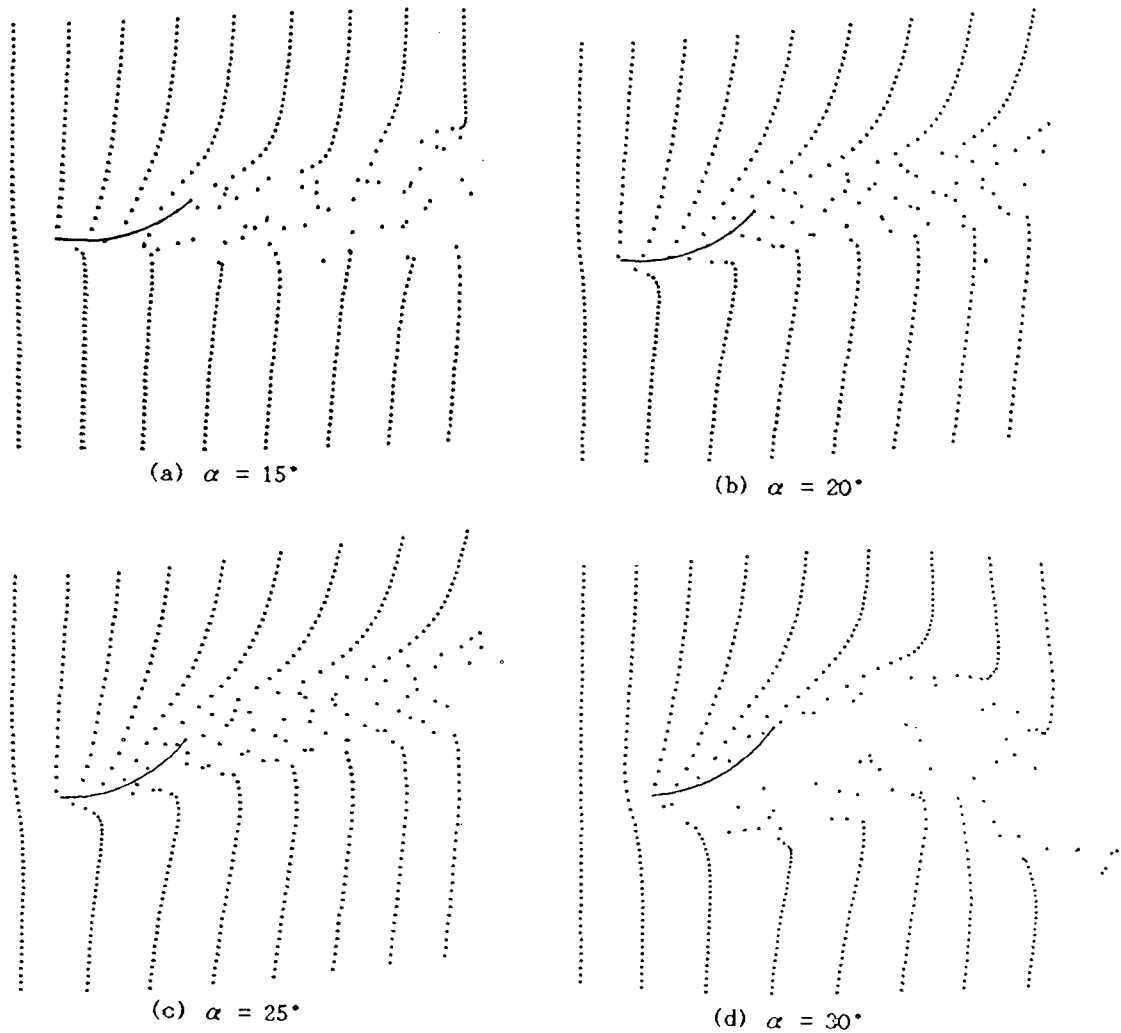


Fig. 11. Results of the computational analysis for the time-line around the single cambered otter board at $\alpha = 15, 20, 25$ and 30° .

하게 일어나며, 영각이 클수록 剝離域이 더욱 크게 형성하고 있음을 알 수 있다. 또한 전개판 하류측에서의 流脈線이 불규칙적으로 굽어져 있는 것이 보이나, 이것은 展開板의 前·後緣에서 발생하는 自由渦의 영향에 의한 것으로 사료된다.

영각 15~30°에서 5° 간격으로 실시한 彎曲型 展開板 주위에서의 流脈線에 대한 可視化寫眞 및 數値시뮬레이션의 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. 이 경우에도 각 영각에서의 시뮬레이션의 결과는 가시화사진과 잘 일치하고 있으며, 영각 25°까지는 전개판의 전연에서의 박리가 보이지 않다가 영각 30°에서부터 전·후연에서 박리현상이 나타나고 있다.

Fig. 5의 平板形에서의 流脈線과 비교해 보면, 彎曲型은 전개판의 전·후연에서 동시에 박리가 일어나는 영각이 평판형에 비하여 약 10°정도 크며, 또한 같은 영각에서는 박리역의 크기가 평판형의 그것보다 작게 나타났다. 따라서 彎曲型이 平板形보다 展開力이 크고 抗力이 작게 됨이 예상되며, 전개판으로써 더 효율 좋게 동작됨을 알 수 있다.

2. 타임라인

영각 15~30°에서 5°간격으로 실시한 平板形 展開板의 주위에서의 타임라인에 대한 可視化寫眞과 數値시뮬레이션의 결과를 Fig. 8 및 Fig. 9에, 그리고 彎曲型 展開板 주위에서의 타임라인에 대해서는 Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다.

각 전개판에서의 각각의 영각에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 8 및 Fig. 10에서의 가시화사진과 매우 잘 일치하고 있다. 각 전개판에 있어 후면측에서의 타임라인 간격이 압력면인 전면에서의 그것보다 넓게 나타나고 있는데, 이것은 후면측의 유속이 전면측의 유속에 비하여 빠른 것을 의미한다. 또한 전면부근의 타임라인은 前緣方向으로, 후면부근의 타임라인은 後緣方向으로 굽어져 있는데, 이 굽어진 방향으로 미루어 각 전개판의 둘레에는 反時計方向의 循環이 존재함을 알 수

있고, 항상 下方向으로 展開力이 作用함을 이 타임라인으로부터 예측할 수 있다.

그리고, 같은 영각에 있어 두 전개판에서의 박리역의 크기, 혹은 타임라인의 간격 및 그 형태를 비교해 보면 彎曲型의 경우가 平板形에 비하여 더 효율 좋게 동작됨을 알 수 있다.

3. 展開力係數 및 抗力係數

전개판에서 전개력계수 C_L 및 항력계수 C_D 는 각각 $C_L = L / (\frac{1}{2} \rho A U^2)$, $C_D = D / (\frac{1}{2} \rho A U^2)$ 로 정의하며, 여기서 L 은 전개력, ρ 는 유체의 밀도, A 는 전개판의 최대투영면적으로 익현장 C 와 전개판의 길이 H 의 곱 즉 $A = C \times H$, U 는 일정류, D 는 항력을 표시한다.

Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 平板形($\alpha = 35^\circ$) 및 彎曲型($\alpha = 30^\circ$) 展開板의 전개력계수 C_L 및 항력계수 C_D 의 계산결과를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축은 시간변화를 표시하며, 계산시간 t 를 U 및 C 로 무차원화한 것이다.

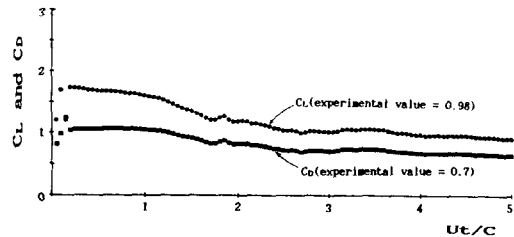


Fig. 12. Result of the computational analysis for C_L and C_D of the flat otter board at $\alpha = 35^\circ$.

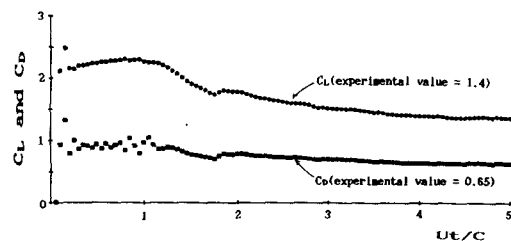


Fig. 13. Result of the computational analysis for C_L and C_D of the single cambered otter board at $\alpha = 30^\circ$.

각 전개판에 있어 計算初期에는 C_L 및 C_D 값은 모두 실험치보다 약간 크게 나타나고 있으나 $Ut/C=2(40step)$ 근방에서부터 각 계산값은 실험치와 잘 일치하고 있다. 또한 만곡형의 경우 평판형보다 영각이 5° 작음에도 불구하고 전개력 계수의 값은 30%정도 크며, 평판형에 비하여 만곡형전개판이 훨씬 효율 좋게 전개력을 발생시키고 있는 것을 보여준다.

要 約

시간적으로 변화하는 展開板의 流動特性을 이론적으로 명확하게 파악하는 것은 展開板의 정확한 設計 및 효율적인 運用 뿐만 아니라 나아가서는 성능이 보다 우수한 展開板의 開發을 위한 基礎資料로도 유용하게 이용되리라 생각된다.

이러한 관점에서 현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 平板型 및 彎曲型 展開板 주위에서의 시간적으로 변화하는 非正常流動場을 渦絲近似法을 이용하여 해석하고, 數値시뮬레이션을 실시하여 展開力係數 및 抗力係數를 구하여 前報에서의 水槽實驗으로 구한 可視化寫眞 및 係數들의 값과 비교하므로써 해석모델의 유용성을 구하였다.

그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 渦絲近似法에 의한 數値시뮬레이션으로 구한 展開板 주위에서의 유체흐름은 可視化寫眞에서의 그것과 잘 일치한다.
2. 數値시뮬레이션으로 구한 展開力係數 및 抗力係數는 模型實驗에서의 그것과 비교적 잘 일치한다.
3. 展開板 주위의 타임라인으로부터 展開板 둘레의 循環方向 및 展開力의 作用方向을 알 수 있다.
4. 展開板 前後面에서의 타임라인의 간격을 비교하면 後面에서의 流速이 前面(壓力面)에서의 流速에 비하여 빠르며, 그 차이는 彎曲型이 平板型에 비하여 약 30% 큼을 알 수 있다.
5. 展開板의 前緣에서는 時計方向, 後緣에서는

反時計方向의 渦가 계속적으로 발생하며, 시간이 경과함에 따라 후류측으로 흘러가면서 시간적으로 변화하는 칼만볼텍스의 양상을 보인다.

參 考 文 獻

- 1) Sarpkaya, T. (1968) : An Analytical Study of Separated Flow about Circular Cylinders. Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 90, 511-518.
- 2) Kuwahara, K. (1973) : Numerical Study of Flow Past an Inclined Flat Plate by an Inviscid Model. Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 35, No. 5, 1545-1551.
- 3) Clements, R.R. (1973) : An Inviscid Model of Two-Dimensional Vortex Shedding. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 57, Part 2, 321-336.
- 4) Sarpkaya, T. (1975) : An Inviscid Model of Two-Dimensional Vortex Shedding for Transient and Asymptotically Steady Separated Flow over an Inclined Plate. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 68, Part 1, 109-128.
- 5) Kiya, M. and M. Arie (1977) : A Contribution to an Inviscid Vortex-Shedding Model for an Inclined Flat Plate in Uniform Flow. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 82, Part 2, 223-240.
- 6) Kiya, M. and M. Arie (1977) : An Inviscid Numerical Simulation of Vortex Shedding from an Inclined Flat Plate in Uniform Flow. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 82, Part 2, 241-253.
- 7) 永野·内藤·高田 (1981) : うず點法による長方形まわりの流れの解析. 日本機械學會論文集 (B編), 47(413), 32-37.

- 8) 巽友情(1982)：流體力學。164-175, 257-267, 培風館。
- 9) 佐藤浩(1982)：亂流。115~123, 共立出版。
- 10) 坂田・足立・稻室(1983)：うず放出モデルを用いたはく離を伴う非定常流れの一解法(第1報, 單獨正方形柱まわり流れ)。日本機械學會論文集(B編), 49(440), 801-807。
- 11) 龜本・小尺・鈴木(1983)：離散うず法による並列2平板非定常はく離流れの數値實驗(その1), 日本機械學會論文集(B編)。49(444), 1619-1627。
- 12) Ogawa, T. (1984)：Theoretical Study on the Flow about Savonius Rotor, Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, Vol. 106, 85-807。
- 13) 鳥源・木村(1986)：回轉する圓柱をすぎる高レイノルズ數の流れ。日本航空宇宙學會誌, 34(387), 188-194。
- 14) 林・麻生(1986)：パネル法と離散渦法を用いた剝離流の數値シミュレーション, 日本航空宇宙學會誌, 34(390), 350-355。
- 15) 稻室・足立(1986)：うず放出用モデルを用いたはく離を伴う非定常流れの一解法(第2報, 單獨圓柱まわりの流れ), 日本機械學會論文集(B編), 52(496), 1600-1606。
- 16) 新井・田口・谷(1987)：離散渦法に用いた圓柱まわりの流れの解析。日本機械學會論文集(B編), 53(486), 363-369。
- 17) 盧基德(1989)：Weis-Foghメカニズムの推進装置に関する研究。神戸大學大學院 博士學位論文。
- 18) 高冠瑞・權炳國・盧基德(1990)：展開板에 대한 數値解析 — 1. 展開板 주위에서의 유체흐름의 패턴 —。漁業技術 26(4), 333-340。
- 19) 朴環鉉(1991)：縱型單板彎曲型展開板의 性能分析。釜山水產大學校 産業大學院 碩士學位論文。
- 20) 高冠瑞・權炳國・盧基德(1991)：展開板에 대한 數値解析 — 2. 展開板의 形狀別 性能分析 —。漁業技術 27(3), 163-169。
- 21) 高冠瑞・權炳國・李寬熙・盧基德(1991)：展開板에 대한 數値解析 — 3. 슬롯에 따른 單純彎曲型展開板의 性能分析 —。漁業技術 27(4), 278-285。
- 22) 高冠瑞・權炳國・李寬熙・盧基德(1991)：展開板에 대한 數値解析 — 4. 渦發生器에 따른 彎曲型展開板의 性能分析 —。漁業技術 27(4), 286-292。