

2 단식 Weis-Fogh형 선박 추진기구의 유동장 특성계산

노 기 덕*

Flowfield Calculation for Ship's Propulsion Mechanism of Two-Stage Weis-Fogh Type

K. D. Ro

Key words : Hydraulic Machine (유체기계), Numerical Analysis(수치해석), Unsteady Flow (비정상류), Separation(박리), Visualization(가시화), Fluid Force (유체력), Discrete Vortex Method (이산와법), Ship Propulsion(선박추진)

Abstract

The flow patterns and dynamic properties of ship's propulsion mechanism of two-stage Weis-Fogh type are studied by the discrete vortex method. In order to study the effects of the interaction of the two wings, two cases of the phase differences of the wings' motion are considered, the same phase and the reverse phase. The flow patterns by simulations correspond to the photographs obtained by flow visualization and the flowfield of the propulsion mechanism which is unsteady and complex is clearly visualized by numerical simulations. The time histories of the thrust and the drag coefficients on the wings are also calculated and the effects of the interaction of the two wings are numerically clarified.

1. 서 론

작은 벌의 정지비행으로부터 발견한 소위 Weis-Fogh 메커니즘^(1,2)은 효율이 좋고 양력발생 메커니즘이 독특하여, 많은 유체역학자들의 관심을 모으고 있으며^(3~6), 최근 이 메커니즘의 공학적 응용도 활발히 시도되고 있다^(7~12).

저자 등은 이 메커니즘의 2차원 모델을 수로 내에 설치한 Weis-Fogh형 선박추진기구를 제안, 모형선 주형시험을 행하여 이 추진기구가 새로운 선박 추진기로서 유효하게 동작됨을 보였다.⁽⁶⁾ 또한 실험과 수치 시뮬레이션을 병행하여 이 추진기구가 동작할 때 날개 주위에 일어나는 비정상 유동장을 명확히 가시화 했고,⁽⁹⁾ 날개에 작용하는 추력

* 경상대학교 기관공학과 · 해양산업연구소 (원고접수일 : 98년 2월)

및 항력계수의 시간변화도 파악했다.⁽¹⁰⁾

그러나 상술한 추진기구는 1단으로 날개동작의 1행정중 추력변동이 크고, 성능을 향상시키는 데는 한계가 있다. 그래서 본 연구에서는 이 추진기구를 직렬 2단으로 확장시키고, 이 2단식 Weis-Fogh형 선박추진기구에 대해, 이산와법(Discrete vortex method)을 이용한 수치계산을 행하여, 두 날개의 상호간섭의 효과를 중심으로 그 유체역학적 특성을 파악하고자 한다

2. 계산방법

2.1 유동장의 시뮬레이션

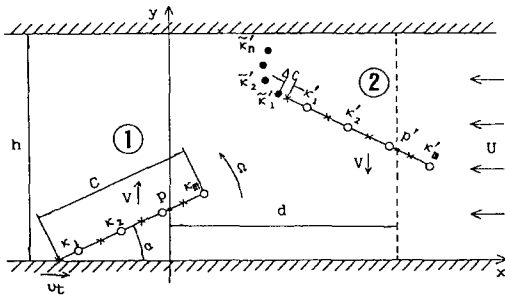


Fig. 1 Model of the numerical analysis

먼저 2단식 Weis-Fogh형 선박 추진기구의 해석 모델을 Fig. 1에 나타낸다. 이것은 1단의 해석모델^(9,10)을 단순히 직렬 2단으로 확장한 것이나 본 연구의 이해를 돕기 위해 간단히 설명한다. 그림에 나타낸 바와 같이 폭 h인 수로 내에서 날개현장 C인 두 날개, 가 일정한 거리 d 및 위상차 ΔT를 유지하면서 기준점 p, p'를 중심으로 속도 V로 y방향으로 왕복운동하는 경우를 생각한다. 이때 각 날개의 움직임은 먼저 아랫벽으로부터 p, p'점을 중심으로 회전해서 열리고(열리는 과정), 열림각 α를 유지하면서 y방향으로 병진운동하여(병진운동의 과정), 위벽에서 p, p'점을 중심으로 회전해서 닫힌다(닫히는 과정). 또한 다시 위벽에서 열리고, 병진운동하여, 아랫벽에서 닫히는 운동을 반복한

다. Fig. 1에서 날개 ①, ②를 각각 뒷날개 앞날개로 하고, 날개동작에서 동위상이라 함은 위상차 ΔT=0°이며 두 날개가 같은 벽에서 동시에 움직이는 경우를, 역위상이라 함은 위상차 ΔT=180°이며 두 날개가 서로 수로의 반대측에서 움직이기 시작한 경우를 나타낸다.

또한 각 날개는 두께가 없는 평판날개로 보고, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 m, m'개(여기서는 m=m'=20개로 했다)의 속박와(Bound vortex)를 같은 간격으로 배치시켜 나타냈으며, 앞서 설명한 바와 같은 날개동작을 하도록 타임스텝마다 날개를 이동시켜 가며 유동장을 계산했다. 각 날개의 속박와의 위치를 z_j, z'_j 및 방출와의 위치를 z_l, z'_l로 하고, 수로를 나타내기 위해 무한개의 경상을 취하면 이 해석모델의 유동장 전체를 나타내는 복소포텐셜 F(z)는 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 F(z) = & i \sum_{j=1}^m \chi_j \left\{ \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - z_j)}{2h} \right\} \right. \\
 & \left. - \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - \bar{z}_j)}{2h} \right\} \right\} \\
 & + i \sum_{j=1}^m \chi'_j \left\{ \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - z'_j)}{2h} \right\} \right. \\
 & \left. - \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - \bar{z}'_j)}{2h} \right\} \right\} \\
 & + i \sum_{l=1}^n \tilde{\chi}_l \left\{ \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - z_l)}{2h} \right\} \right. \\
 & \left. - \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - \bar{z}_l)}{2h} \right\} \right\} \\
 & + i \sum_{l=1}^n \tilde{\chi}'_l \left\{ \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - z'_l)}{2h} \right\} \right. \\
 & \left. - \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - \bar{z}'_l)}{2h} \right\} \right\} - Uz \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 i는 허수(√-1), h는 수로폭, $\bar{}$ 는 공액복소수, U는 일정류, 그리고 χ_j (j=1, 2, ..., m), χ'_j 및 $\tilde{\chi}_l$ (l=1, 2, ..., n), $\tilde{\chi}'_l$ 는 각 날개에 있어 속박와 및 자유와(Free vortex)의 강도를 나타낸다. 한편 와의 강도를 결정하는 경계조건은 인접하는 속박와의 중점을 검사점으로 잡아 그 점에서의 유동함수의 조건, 속도의 조건 및 Kelvin의 정리를 이용했는데, 그 구체적인 방법은 1단^(9,10)에서와 동일

하다. 또한 자유와는 각 날개의 뒷전으로부터 ΔC (여기서는 $\Delta C=0.05C$ 로 했다)떨어진 곳에서 부터 타임스텝 Δt 마다 방출시키고, l 번째의 자유와 \bar{z}_l 의 이동은 다음의 Euler식을 이용했다.

$$\left. \begin{aligned} \bar{z}_l(t+\Delta t) &= \bar{z}_l(t) + \bar{W} \cdot \Delta t \\ W &= \frac{d}{dz} \left[F(z) - i \tilde{x}_l \log \left\{ \sinh \frac{\pi(z - \bar{z}_l)}{2h} \right\} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

여기서 W 는 \bar{z}_l 를 제외한 유동장 전체의 속박와, 자유와 및 일정류로부터 유도된 복소속도를 의미한다. 유동장의 시물레이션에 있어 유맥선은 상류측의 어느 한점을 트레이서(Tracer)원으로 하고 그곳에 Δt (여기서는 $\Delta t=0.06$ 으로 했다)마다 트레이서를 넣어 계산했다. 그리고 각 트레이서의 이동은 (2)식을 이용하지만 이때 복소속도 $W = dF/dz$ 로 계산한다. 타임라인은 상류측에 트레이서원을 흐름에 수직한 한 개의 직선상으로 배열해서 일정한 시간간격(여기서는 $7\Delta t$ 로 했다)마다 일제히 방출시켜 행하였고, 그 이동방법은 유맥선에서와 같다.

2.2 힘, 모멘트 및 특성계수

날개에 작용하는 힘 및 모멘트의 계산방법은 Fig. 1에서의 두 날개 ①, ②에서 모두 동일하므로 이하 날개 ①에 대해서만 설명한다. 날개에 작용하는 유체력의 x 방향의 성분, y 방향의 성분을 각각 X, Y 라 하면 이것은 압력을 날개면에 따라 전주 적분해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X - iY = \frac{i\rho}{2} \oint_B \left(\frac{dF}{dz} \right)^2 dz + i\rho \oint_B \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} d\bar{z} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, 는 날개단면의 경계선에 따른 적분경로이다. 또한 $\coth\{\pi(z - z_j)/2h\}$ 는 $z=z_j$ 에서 1위의 극을 가지며, 그 점에서 유수는 $2h/\pi$ 이므로 (3)식의 우변 제1항은 유수의 정리에 의해 쉽게 구해진다. (3)식의 우변 제2항은 저자 등이 제안한 계산방법⁽⁴³⁾으로 즉 날개면을 대수 특이점의 절단면으로 생각해서 날개 윗면과 아랫면의 편각 차로써 구하며, 그 결과는 1단⁽⁴⁰⁾에서와 같다.

또한 Fig. 1에서 P점 둘레의 모멘트 M_p 는 계산

을 쉽게 하기 위해, 먼저 뒷전 둘레의 모멘트 M_t 를 구해, 이것과 (3)식에서 구한 X, Y 를 이용해서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} M_p &= M_t + Im \{ (X - iY)(z_p - z_t) \} \\ M_t &= -Re \left\{ \frac{\rho}{2} \oint_B \left(\frac{dF}{dz} \right)^2 (z - z_t) dz \right. \\ &\quad \left. + e^{-2i\alpha} \rho \oint_B \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} (\bar{z} - \bar{z}_t) d\bar{z} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

여기서 Im 및 Re 는 각각 허수부와 실수부를 나타내며 z_p 및 z_t 는 $z (=x+iy)$ 로 표시된 P점 및 뒷전의 위치이다. 또한 윗식에서 뒷전 둘레의 모멘트 M_t 는 힘의 계산에서와 유사한 방법으로 구할 수 있다. 한편 본 추진기구의 역학적 특성을 나타내는 각 계수 즉 추력계수 C_T , 항력계수 C_D 는 다음과 같이 계산한다. Fig. 1에서 날개의 축에 상당하는 P점에 작용하는 x 방향의 성분 즉 일정류 U 와 반대방향의 힘의 성분을 추력 T, y 방향의 성분 즉 날개의 이동속도 V 와 반대방향의 힘의 성분을 항력 D 로 하면 이들 힘은 각각 (3)식의 $X, -Y$ 에 대응한다. 그러나, 열리는 과정 및 닫히는 과정에서는 날개축 둘레의 모멘트 M_p 에 의한 반력도 항력에 고려해 넣어야 한다. 즉 날개의 뒷전에서 P점까지의 거리를 r_p 로 했을 때, 열리는 과정에서 날개에 반시계 방향의 모멘트가 작용하면 벽면에서의 반력 $Y_w = M_p \cos \alpha / r_p$ 로 되며, 닫히는 과정에서 시계방향으로 모멘트가 작용하면 반력 $Y_w = M_p \cos \alpha / (C - r_p)$ 로 되고 이것을 항력에 더한다. 따라서 계산은 2차원으로 행하고 있으므로 날개의 스패를 단위길이로 하면 날개축에 작용하는 추력계수 C_T 및 항력계수 C_D 는 다음과 같이 계산된다.

$$C_T = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho V^2 C} \quad (5)$$

$$C_D = \frac{-Y + Y_w}{\frac{1}{2} \rho V^2 C} \quad (6)$$

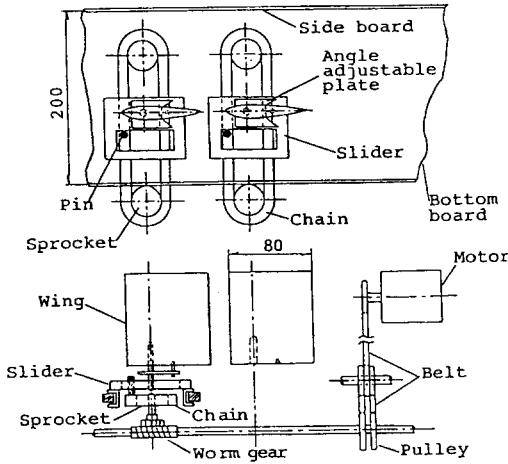


Fig. 2 Driving system of the wings(unit:mm)

3. 가시화 실험장치 및 방법

실험에 사용된 날개구동장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 가시화 실험은 전보⁹⁾의 회류수조내에 이 날개구동장치를 설치하여 수소기포법으로 행하였다. 장치의 크기의 기준이 되는 각 날개의 날개현장은 80mm이다. 또한 날개구동장치는 Fig. 1의 해석모델에서와 같은 날개동작을 하도록 다음과 같이 제작했다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 먼저 모터의 동력은 벨트, 풀리 웜기어 및 스프로킷을 경유해서 체인을 돌린다. 그리고 날개축이 부착되어 있는 각 슬라이드의 왕복운동은 이 체인의 상부에 고정되어 있는 핀에 의해 행하여진다. 또한 날개는 날개축에 끼워져있는 슬라이드가 왕복운동하면 날개의 날개축둘레로 모멘트가 작용하여 날개가 열리게 되지만, 일정한 열림각을 유지하도록 슬라이드 상부에 각도조절판을 부착했다. 일정류 U 및 날개의 이동속도 V 는 각 모터의 회전수를 제어해서 행하였다. 한편 가시화 사진은 암실에서 수조의 상류측에 음극을 설치하여 수소기포를 발생시켜 흘러보내고, 날개의 이동방향(Fig. 1에서의 y 방향)으로 슬라이드 프로젝트

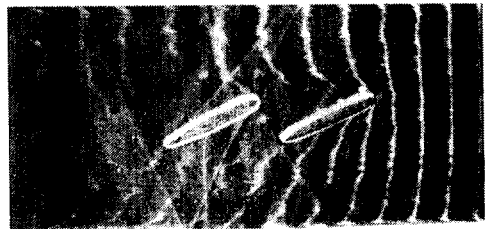
(150W×3대)에 의한 스크린상의 조명광을 비추어, 수로 중앙의 수직 상부에서 아래방향으로 촬영했다. 실험장치에서 각 수로벽 및 날개는 빛이 잘 통과하도록 아크릴판으로 제작했으며, 동력전달장치의 일부는 수로 밑판의 하부에 설치했다.

4. 결과 및 고찰

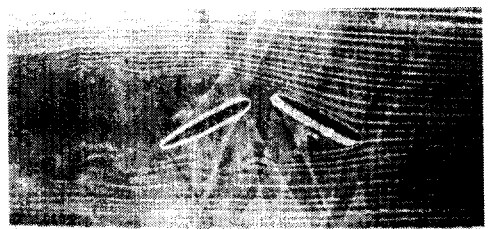
4. 1 날개주위의 흐름패턴

여기서는 이 추진기구의 두 날개주위의 흐름패턴을 명확하게 파악하기 위해, 시뮬레이션 결과를 가시화사진과 비교검토하고 1행정에서의 연속적인 날개주위의 흐름패턴을 분석 고찰하고자 한다. 그 결과의 비교를 쉽게 하기 위해 시뮬레이션과 가시화실험은 같은 조건으로 행하였으며, 그 기본 조건으로서 열림각 $\alpha=30^\circ$, 수로 폭 $h=2.5C$, 날개의 이동속도와 일정류와의 속도비 $V/U=1.0$, 두 날개 사이의 거리 $d=1.15C$ 및 각 날개의 뒷전으로부터 날개축까지의 거리 $r_p=0.75C$ 로 했다.

Fig. 3에 일정류 $U=8 \text{ cm/sec}$ (레이놀즈 수로 5900정도) 흐름 중에 두 날개가 모두 정지해 있을 때 s 날개주위의 타임라인 및 유맥선의 가시화 사진이다. 여기서 일정류는 오른쪽에서 왼쪽으로 흐

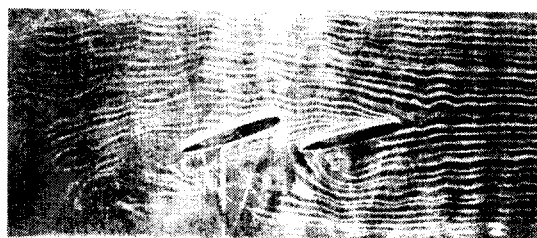


(a) Timelines

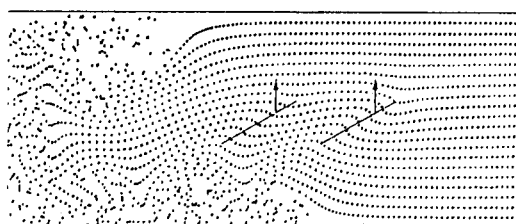


(b) Streaklines

Fig. 3 Timelines and streaklines for stationary wings



(a) Photograph



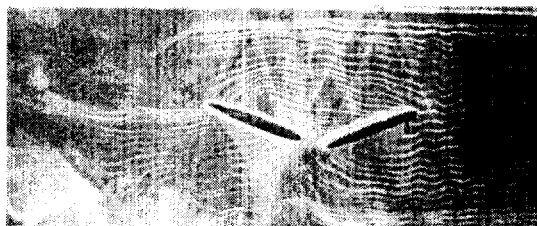
(b) Simulation

Fig. 4 Streaklines for the same phase

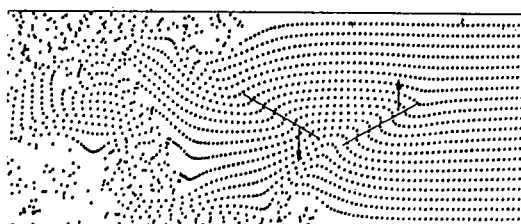
르고 있다. 흐름은 Fig. 3 (a), (b) 모두 앞날개의 앞, 뒷전으로부터 박리하고 있고, 뒷날개 전체가 이 박리역 안에 들어있다. 이에 대해 같은 조건에서 두 날개가 흐름에 수직방향으로 일정류와 같은 속도로 움직일 경우 Fig. 4(a), Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이 각 날개의 앞전에서의 박리현상은 보이지 않고 날개배면 전체의 유맥선도 명확하게 보이고 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5에 각각 동위상 및 역위상에서 날개가 수로의 중앙에 왔을 때 유맥선의 가시화 사진과 계산결과를 나타낸다. 두 경우 모두 사진과 계산결과는 날개주위 뿐만 아니라 후류의 패턴까지 정성적으로 잘 일치하고 있어, 본 시뮬레이션 방법의 유효성과 타당성을 입증해 준다.

Fig. 6에 동위상에서 1행정에서의 연속적인 날개주위의 흐름패턴을 나타낸다. 그림 중에 1은 열리는 과정, 2, 3, 4는 병진운동의 과정, 5는 닫히는 과정이며, 그림의 좌측은 유맥선, 우측은 같은 타임스텝에서의 타임라인이다. 전 과정에 있어 날개를 지나는 유맥선을 보면 날개가 움직이는 방향으로 굽어져 있는데 그 구부러진 정도는 앞, 뒷날개 및 수로에서의 날개의 위치에 따라 다르다. 이것은 두 날개가 전 과정에 있어 항상 서로 간섭을 하



(a) Photograph



(b) Simulation

Fig. 5 Streaklines for the reverse phase

고 있는 것을 의미한다. 또한 그림 중에 3, 4를 주목해서 각 날개를 지나는 타임라인의 경사를 보면 두 날개 모두 압력면에서의 흐름이 가속되고 있는 것을 알 수 있고, 또한 두 날개에는 같은 방향(시계 방향)의 순환이 존재하고 있음을 유추할 수 있다. 그리고 이 순환의 방향을 날개의 이동방향과 관련지어 보면 각 날개에 일정류와 반대방향의 추력이 발생됨을 알 수 있다. 또한 후류측의 흐름을 보면 1단추진기구의 그것과 마찬가지로 수로의 양벽 부근에는 교대적으로 커다란 흐름의 교란 혹은 재순환이 형성되어 있고, 이것이 일정류와 함께 하류 측으로 이동하고 있다.

Fig. 7에 Fig. 6과 같은 조건에서 위상만을 역위상으로 했을 경우 흐름패턴을 나타낸다. 먼저 유맥선을 보면 각 날개의 뒷전에서 벽면방향으로 경사지게 흐름의 불연속선이 보이는데 이것은 날개의 이동과 동반하여 날개뒷전에서 발생한 방출와의 영향이다. 그림 중의 3, 4를 주목해서 두 날개를 지나는 타임라인의 굽어진 방향으로부터 두 날개 서로 스쳐지나간 후, 두 날개 사이의 흐름 즉 각 날개의 압력면에서의 흐름이 가속되고 있음을, 그리고 앞날개에는 반시계방향의, 뒷날개에는 시계방향의 순환이 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 이

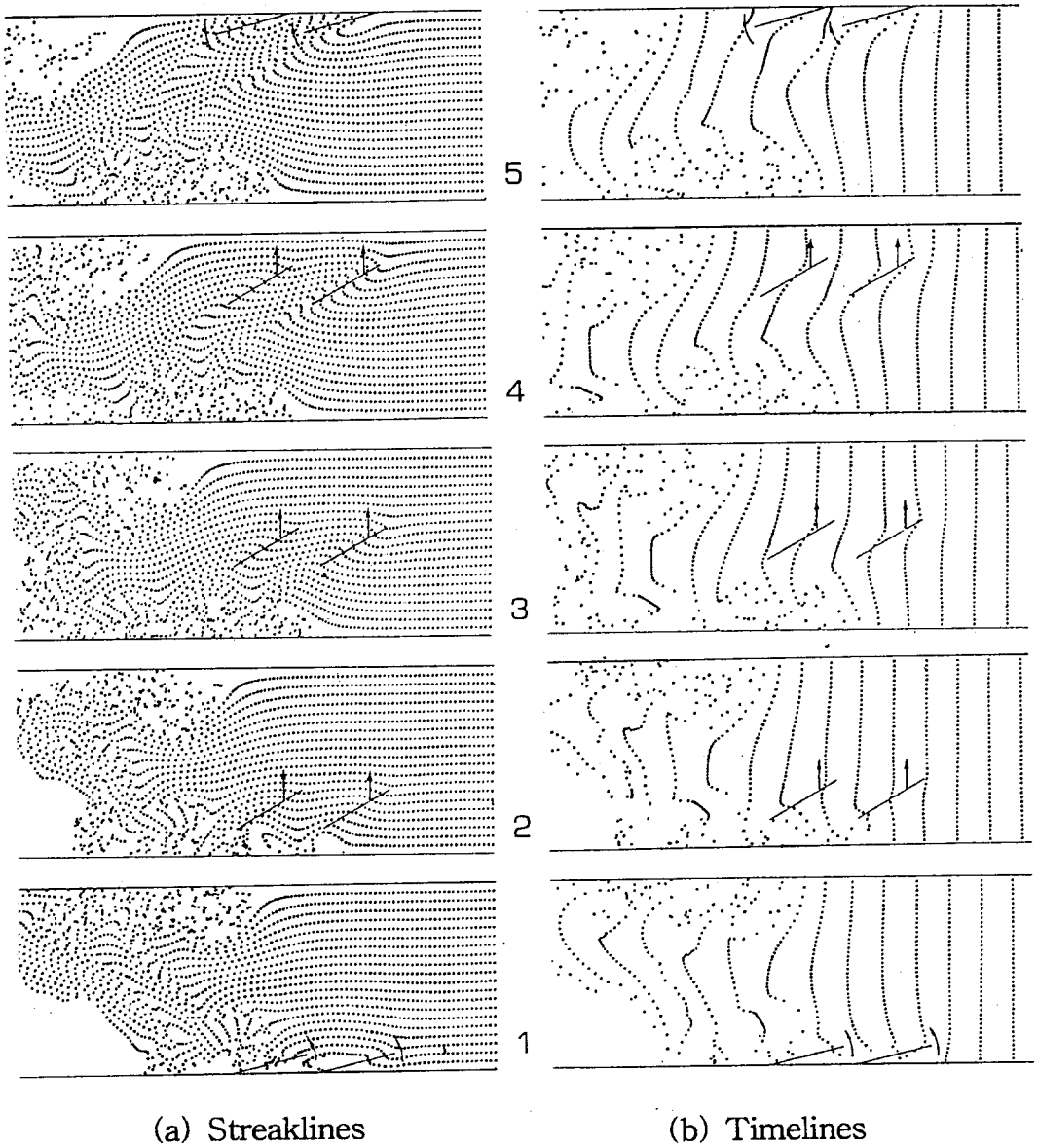
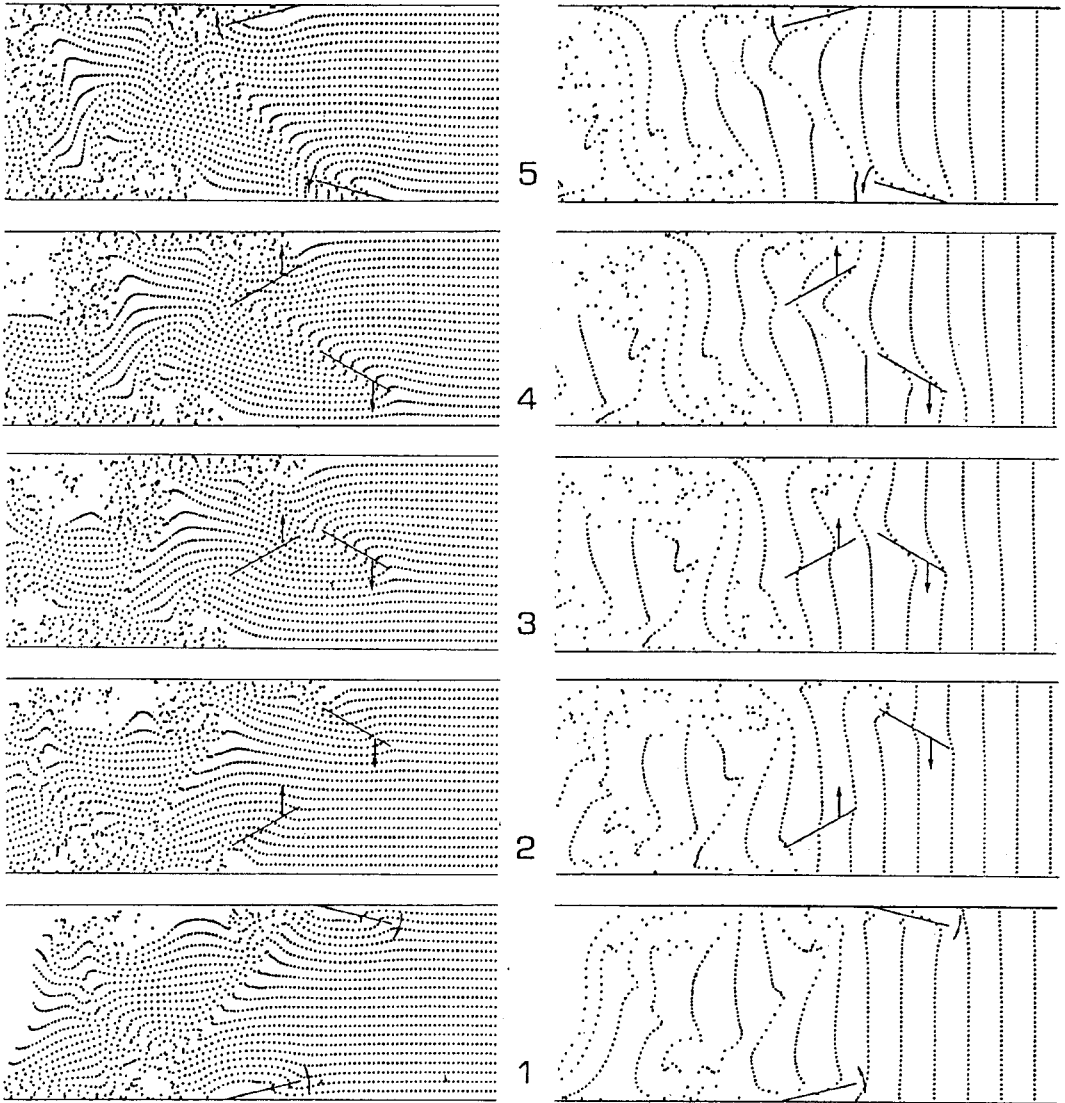


Fig. 6 Streaklines and timelines for the same phase through a stroke



(a) Streaklines

(b) Timelines

Fig. 7 Streaklines and timelines for the reverse phase through a stroke

순환의 방향을 이때의 각 날개의 이동방향과 관련 지어 보면 두 날개 모두 일정류와 반대방향의 추력이 발생됨을 유추할 수 있다. 또한 후류층의 흐름을 보면 수로의 양벽 부근에 흐름의 교란이 보이지만 동위상(Fig. 6 참조)의 그것에 비해 작다.

4.2 역학적 특성

여기서는 이 추진기구의 각 날개에 작용하는 추력 및 항력계수의 시간변화를 계산해서 그 역학적 특성을 고찰하고자 한다. 특히 두 날개 사이의 상호간섭의 효과를 정확하게 파악하기 위해 두 날개 사이의 거리 및 날개운동의 위상차를 계산변수로 잡았다. 또한 1단과 2단과의 역학적 특성의 비교를 쉽게 하기 위해 계산조건은 1단⁽¹⁰⁾에서와 같게 했으며, 그 기본조건으로서 열림각 $\alpha=30^\circ$, 수로 폭 $h=4C$, 날개의 이동속도와 일정류와의 속도비 $V/U=1.0$ 및 각 날개의 뒷전으로부터 날개축까지의 거리 $r_p=0.75C$ 로 했다.

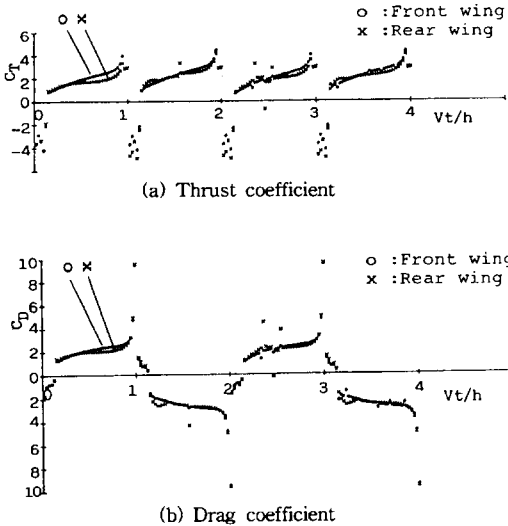


Fig. 8 Thrust and drag coefficients in the same phase and the distance $d=2C$

Fig. 8에 동위상에서 두 날개사이의 거리 $d=2C$ 로 한 경우 추력계수 C_T 및 항력계수 C_D 의 계산결과를 나타낸다. 그림에서 횡축은 날개축의 이동거

리를 수로폭으로 나눈 값이며, 날개의 행정수에 상당한다. 추력계수 및 항력계수를 보면 앞, 뒷날개에서 그 값의 차이는 거의 보이지 않고 있으며, 1단⁽¹⁰⁾에서의 각 계수의 값과 동일하다. 즉 이것은 두 날개가 서로 떨어져 있을 때는 날개사이의 상호간섭이 발생하지 않음을 나타낸다.

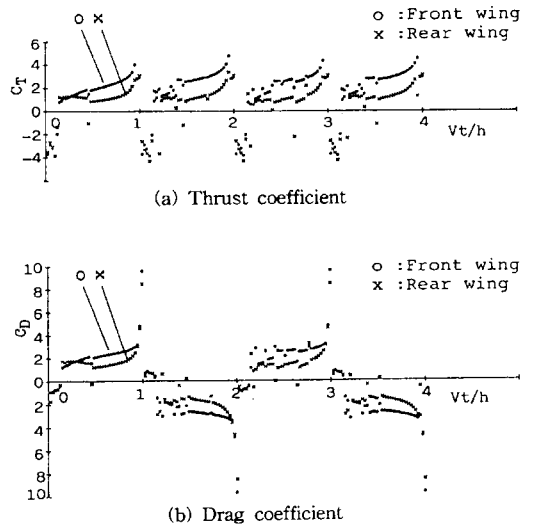


Fig. 9 Thrust and drag coefficients in the same phase and the distance $d=1.1C$

Fig. 9에 Fig. 8과 같은 조건에서 두 날개사이의 거리 d 만을 $1.1C$ 로 한 경우 추력계수 C_T 및 항력계수 C_D 의 계산결과를 나타낸다. 날개사이의 거리를 작게 하면 그림에서 보는 바와 같이 두 날개는 1행정중 늘 간섭하고 있고, 각 계수 모두 앞날개는 뒷날개보다 크게 나타나 있다. 또한 추력계수 및 항력계수를 Fig. 8에서의 그것과 비교해 보면 각 계수 모두 앞날개는 그것보다 증가해 있는데 비해, 뒷날개는 감소해 있다. 즉 동위상의 경우 날개간의 간격을 작게 하면 두 날개는 항상 서로 간섭하고 있으나 각 계수의 평균치는 단단 추진기구에서의 그것과 거의 같다.

Fig. 10에 Fig. 9와 같은 조건에서 각 날개운동의 위상만을 서로 역위상으로 한 경우 추력계수 C_T 의 계산결과를 나타낸다. 이 경우 그림에서 보

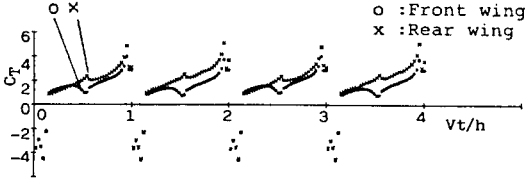


Fig.10 Thrust coefficient in the reverse phase and the distance $d=1.1C$

는 바와 같이 두 날개의 상호간섭은 수로의 중앙부에서 두 날개가 가까이 다가갈수록 크게 나타나 있다. 또한 상호간섭의 특성은 동위상에서와는 달리 앞날개의 추력계수의 값은 두 날개가 가까이 다가갈수록 감소하는데 비해, 뒷날개의 그것은 증가하고 있다. 그러나 두 날개의 추력계수의 평균 값은 동위상에서와 같이 Fig. 8에서 추력계수의 값과 같다.

이상 설명한 위상에 따라 상호간섭의 특성이 다른 이유는 다음의 날개주위의 순환으로부터 설명할 수 있다.

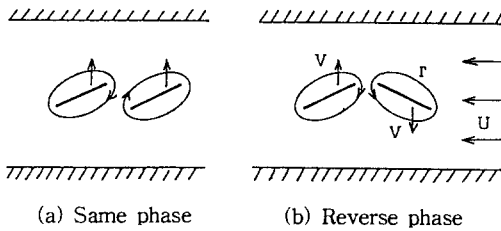


Fig.11 Circulations about two wings

먼저 Fig. 11에 일정류와 반대방향의 추력을 양으로 했을 경우 각 날개주위의 순환의 방향을 나타낸다. 이 순환방향에 대해서는 이미 Fig. 6 및 Fig. 7에서도 설명한 바 있다. 동위상의 경우 Fig. 11(a)에서 나타낸 바와 같이 두 날개 사이의 순환의 방향은 서로 반대로 되어있기 때문에 그곳에서의 유속이 느리게 되어 압력이 높게된다. 그래서 상술한 바와 같이 앞날개의 각 계수의 값은 보다

크게 되고 뒷날개의 그것은 보다 작게 된다. 이에 대해 역위상의 경우 Fig. 11(b)에 나타낸 바와 같이 각 날개에는 서로 반대방향의 순환이 존재하고 있다. 그래서 날개가 서로 가까이 다가갈 때 두 날개 사이의 영역에서는 동위상의 경우와 반대로 순환의 방향이 같기 때문 그곳의 유속이 빠르게 되어 압력이 저하하고, 이것이 앞날개의 추력의 감소, 뒷날개의 추력의 증가의 원인이 된다.

5. 결 론

2단식 Weis-Fogh형 선박추진기구의 유동장 특성을 이산와법에 의한 수치계산으로 파악하였다. 시뮬레이션 결과는 가시화 사진과 잘 일치했으며, 비정상적이고 복잡한 본 추진기구의 유동장을 명확히 나타냈다. 또한 날개에 작용하는 추력 및 항력계수의 시간변화를 계산하여, 두 날개 사이에 일어나는 상호간섭의 영향을 명확하게 규명하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 날개가 정지해 있을 때는 날개 앞, 뒷전에서 박리가 일어나지만 같은 조건에서 날개가 흐름의 수직 방향으로 움직일 경우 두 날개 모두 앞전에서의 박리는 일어나지 않는다.
- (2) 날개가 병진운동을 행할 때 각 날개의 압력면 측의 흐름은 가속된다.
- (3) 두 날개가 동위상으로 움직일 경우 날개는 항상 상호간섭이 일어나며, 추력 및 항력계수 모두 1단 추진기구에 비해 앞날개는 증가하고 뒷날개는 감소한다.
- (4) 두 날개가 역위상으로 움직일 경우는 날개가 서로 가까워질수록 간섭이 크게 일어나며, 추력계수는 1단추진기구에 비해 앞날개는 감소하고 뒷날개는 증가한다.
- (5) 날개를 지나는 타임라인으로부터 각 날개 주위의 순환의 방향을 유추할 수 있고, 순환의 방향으로 부터 위상에 따른 두 날개의 상호간섭의 특성을 설명할 수 있다.

참고문헌

- (1) Weis-Fogh, T., "Quick Estimates of Flight

- Fitness in Hovering Animals, Including Novel Mechanisms for Lift Production," *Journal of Experimental Biology*, Vol.59, pp. 169~230, 1973.
- (2) Lighthill, M. J., "On the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.60, Part1, pp. 1~17, 1973.
 - (3) Maxworthy, T., "Experiments on the Weis-Fogh Mechanism of Lift Generation by Insects in Hovering Flight. Part1. Dynamics of the 'Fling'," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.93, pp.47~63, 1979.
 - (4) Edwards, R. H. and Cheng, H. K., "The Separation Vortex in the Weis-Fogh Circulation-Generation Mechanism," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.120, pp. 463~473, 1982.
 - (5) Spedding, G. R. and Maxworthy, T., "The Generation of Circulation and Lift in a Rigid Two-Dimensional Fling," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.165, pp. 247~272, 1986.
 - (6) Ro, K. D. and Tsutahara. M., "Numerical Analysis of Unsteady Flow in the Weis-Fogh Mechanism by the 3D Discrete Vortex Method with GRAPE3A," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol.119 pp. 96~102, 1997.
 - (7) Furber, S. B. and Ffowcs Williams, J. E., "Is the Weis-Fogh Principle Exploitable in Turbomachinery?," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.94, Part3, pp. 519~540, 1979.
 - (8) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., "Ship Propulsion Using the Weis-Fogh Mechanism," *Bulletin of the Marine Engr. Soc. in Japan*, Vol.17, No.2, pp. 49~55, 1989.
 - (9) 노기덕, "Weis-Fogh형 선박추진기구의 개발(유동장의 가시화 및 수치해석)", *대한기계학회논문집*, 제17권, 2호, pp. 426~437, 1993.
 - (10) 노기덕, "Weis-Fogh형 선박 추진기구의 역학적 특성계산", *대한기계학회논문집*, 제21권, 11호, pp. 1518~1526, 1997.
 - (11) Tsutahara, M. and Kimura, T., "A Pilot Pump using the Weis-Fogh Mechanism and its Characteristics," *Transactions of the JSME*, Vol.54, No.498, pp. 393~397, 1987.
 - (12) Tsutahara, M. and Kimura, T., "Study of a Fan Using the Weis-Fogh Mechanism(An Experimental Fan and Its Characteristics)," *Transactions of the JSME*, Vol.60, No.571, pp.910~ 915, 1994.
 - (13) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., "Unsteady Pressure and Force in the Discrete Vortex Methods," *Transactions of the Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol.32, No.97, pp. 129~142, 1989.

저 자 소 개



노기덕 (盧基德)

1953년 6월생. 1977년 부산수산대학 기관과 졸업(공학사). 1986년 3월 코오베 대학 졸업(석사), 1989년 3월 동 대학원 졸업(박사), 1977년~1979년 모빌오일(수), 1979년~현재 경상대학교 해양과학대학 기관공학과 교수, 당학회 평의원.