

이산와법에 의한 원호형 Sea Anchor의 유동장 수치해석

노기덕* · 권병국** · 안희춘***

(1997년 8월 18일 접수)

Numerical Analysis for Flowfield of a Circular Arc Type Sea Anchor by Discrete Vortex Method

Ki-Deok Ro, Byeong-Guk Kwon and Heui-Chun An

Key Words : Fluid Dynamics(유체역학), Numerical Analysis(수치해석), Unsteady Flow(비정상류), Separation(박리), Vortex Method(와법), Sea Anchor(물뚝)

Abstract

The fluid dynamic properties of a circular arc type sea anchor were calculated by a discrete vortex method. The flow for the surface of the sea anchor was represented by arranging bound vortices at adequate intervals. The simulations were performed by assuming that the separations occur at edges. With time, the drag coefficient was almost constant but the lift coefficient oscillated in a cycle by von Karman's vortex street. As the camber ratios increase, the drag coefficient and Strouhal number were almost constant but the oscillating amplitude of the lift coefficient increased largely.

기호 설명			
B	: 캠버 또는 적분경로	t	: 시간
C	: 현장 또는 대표길이	Δt	: 시간간격
C_D	: 항력계수	U	: 일정류
C_L	: 양력계수	W	: 복소속도
F(z)	: 복소포텐셜	X	: x방향 유체력
i	: 허수($=\sqrt{-1}$)	Y	: y방향 유체력
j	: 속박와	z	: 복소수($=x + iy$)
ℓ	: 자유와	θ	: 경사각
m	: 속박와의 수	κ	: 와의 강도
n	: 자유와의 수	ρ	: 유체의 밀도
R	: 곡률반경	σ	: 와핵반경
r	: 반경	v_0	: 선회속도
St	: Strouhal 수	Ψ	: 유동함수
		Ψ_0	: 물체표면의 유동함수
		$\bar{}$: 공액복소수
		\sim	: 자유와
		\cdot	: 시간차분

*회원. 경상대학교 기관공학과 · 해양산업연구소

**부경대학교 해양생산관리학과

***국립수산진흥원 수산공학과

1. 서 론

오징어 채낚기 어업⁽¹⁾은 주광성이 강한 오징어를 야간에 집어등의 불빛을 이용하여 어선 부근으로 유집하고, 긴 줄에 여러 개의 속임 낚시를 달아서 수동 또는 자동조획기로서 낚시줄을 상하로 이동시키면 탐식성이 강한 오징어가 유인되어 발로 낚시를 감싸안을 때 낚시줄을 감아들여 어획하는 것이다. 이때 수중에 떠 있는 선체와 드리운 낚시줄이 같은 속도로 이동해야 낚시줄이 선체 밑쪽에 생긴 배 그림자 영역에 드리우게 되어 오징어가 낚시에 쉽게 유인되며, 낚시줄이 서로 엉키지 않으므로 계속적인 조업이 가능하다. 그런데 낚시줄은 수중에 드리워져 해류 및 조류의 흐름(이하 해수의 흐름이라 한다)과 같은 속도로 이동하나, 선체는 공기 저항을 받기 때문에 해수의 흐름과 같은 속도로 이동하지 않는다. 따라서 선체와 낚시줄이 같은 속도로 이동하기 위해서 낙하산 형태의 Sea anchor⁽²⁾를 수중에서 해수의 흐름과 수직방향으로 펼쳐, 그 유체저항을 이용하여 선체를 해수의 흐름과 같은 속도로 끌게 한다.

우리 나라 연근해에서 채낚기 어업에 종사하는 어선은 약6000여척이나 되나, 그 Sea anchor는 유체역학적 특성을 파악하여 설계 제작한 것이 아니며, 일반 천막사에서 경험에 의해 임의로 제작되고 있기 때문에 어선의 크기에 비해 그 규모가 너무 크며, 수중에서 전개형상이 바람직하지 못해 그 형상이 시시각각으로 변하고 있고, 그 주위의 심한 와류 발생으로 역학적 균형이 깨어져서 캔버스가 찢어지는 일까지 발생하고 있다. Sea anchor에 관한 연구는 아직 국내에서는 이루어진 바가 없으며, 이웃 일본에서도 Sea anchor의 수중저항 및 수중전개특성⁽³⁾을 조사한 것 외에는 보이지 않고 있다.

그래서 본 연구에서는 효율이 좋은 Sea anchor의 설계를 위한 기초자료를 제공하기 위해서 이산와법(Discrete vortex method)을 이용하여 Sea anchor 주위의 흐름패턴, 항력 및 양력 특성을 파악하고자 한다. 본 계산에 이용한 이산와법은 경계층과 같이 와도(Vorticity)가 집중된 영역을 다수의 와사(Vortex filament)의 집합으로 보고, 각 와사의 운동을 추적해서 유동장을 해석하는 방법이다. 이 방법은 차분법, 유한요소법 등 다른 계산법에 비해 흐름의 모델화가 간단하고, 그 위에 물리

적 의미가 쉽게 이해되며, 격자형성이 필요 없고 소규모의 계산에 의해 시뮬레이터가 가능하여 최근 여러 가지 형태의 유동장계산에 널리 이용되고 있다. 이산와법에서 물체주위의 흐름을 나타내는 데는 일반적으로 물체주위의 흐름을 원주주위의 흐름으로 사상(mapping)해서 해석하고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 그러나 이 경우 각각의 물체에 대해 그 물체를 원주에 사상하는 함수를 도출해야 하기 때문에, 꽤 번거롭고 실용성이 부족하다. 그래서 복잡한 물체에 대해서는 물체표면을 일정수의 속박와(Bound vortex)로 근사시켜 이것과 이산와법을 조합하여 계산한다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 본 연구에서는 계산의 간편을 위해 후자의 방법을 채택했다. 이산와법은 원래 고 레이놀즈 수의 비정상 박리흐름의 유동장계산을 위해 개발되었으나 그 후 소위 와해확산법⁽⁷⁾, 랜덤워크법^(12,15) 및 확산속도법⁽¹³⁾으로 유체의 점성확산효과를 나타낼 수 있었고, 최근에는 이산와법에 열전달항을 도입하는 시도⁽¹⁴⁾를 하고 있으며, 3차원 흐름해석⁽¹⁵⁾에도 이산와법을 확장적용하고 있다.

한편 Sea anchor는 수중에서의 전개형상에 따라 혼형(Horn type), 콘형(Cone type) 및 원호형(Circular arc type)등으로 대별되는데, 그 중에서 원호형이 항력계수가 가장 크며, 2차원으로 그 특성계산이 가능하여 계산대상을 원호형으로 잡았다.

2. 계산방법

2.1 해석모델 및 경계조건

먼저 원호형 Sea anchor의 해석모델을 Fig. 1에 나타낸다. 그림에서 Sea anchor의 곡률중심을 직교좌표의 원점으로 잡고, x축을 일정류 U와 역방향, y축을 일정류와 직각방향으로 잡는다. 또한 Sea anchor의 각 연과 x축과 이루는 각을 θ , 곡률

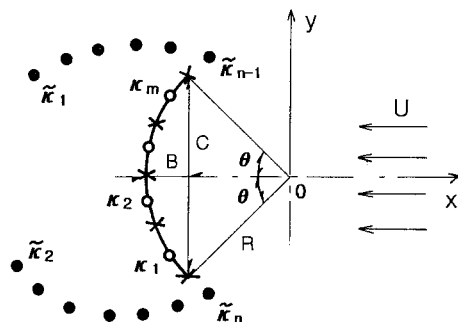


Fig. 1 An analytical model.

반경을 R로 표시한다. Sea anchor는 두께가 없는 원호형 날개로 보고 Fig. 1에서와 같이 m개의 속박와(그림에서 ○표시)를 등간격으로 배치시켜 나타내었고, 자유와(그림에서 ●표시)는 Sea anchor의 각 연에서부터 원주 방향으로 속박와 간격의 절반 되는 곳에서 방출하는 것으로 했다. 이때 Sea anchor주위의 유동장 전체를 나타내는 복소포텐셜 F(z)는 다음과 같다

$$F(z) = i \sum_{j=1}^m x_j \log(z - z_j) + i \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \log(z - \bar{z}_i) - Uz \quad (1)$$

여기서 i 는 허수 ($\sqrt{-1}$), x_j , z_j 는 Sea anchor표면의 흐름을 나타내는 m개의 속박와의 강도 및 위치이고, \bar{x}_i , \bar{z}_i 는 각각 박리전단층을 나타내는 n개의 자유와 (Free vortex)의 강도 및 위치이다. 그리고 본 논문 전체에서 z는 복소수 ($=x+iy$)로 표시한 위치좌표이다.

Sea anchor의 각 연에서 방출된 와는 그 강도를 유지하면서 후류중으로 이동하기 때문 각 타임스텝마다 결정해야 할 미지수는 m개의 속박와의 강도, 두 개의 자유와의 강도 및 물체표면의 유동함수 Ψ_0 이며, 모두 m+3개이다. 연립방정식을 풀기 위해 역시 m+3개의 경계조건이 필요한데 인정하는 속박와의 중점(그림에서 ×표시), 즉 m+1개의 검사점에서 유동함수 Ψ 의 조건

$$\Psi = \Psi_0 = constant \quad (2)$$

Kelvin의 정리

$$\sum_{j=1}^m x_j + \sum_{i=1}^n \bar{x}_i = 0 \quad (3)$$

아랫연 또는 윗연에서 Kutta의 조건

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

$$Real \left\{ e^{-i\theta} \cdot \frac{dF}{dz} \Big|_{z=z_{m+1}} \right\} = 0 \quad (5)$$

을 이용한다. 여기서 Real은 실수부, dF/dz는 복소속도, z_1 , z_{m+1} 는 아랫연 및 윗연의 위치를 나타낸다. 위의 Kutta의 조건은 아랫연 또는 윗연 어느 한 곳에서만 적용해도 문제는 없으나, 이론상으로 흐름의 완전한 대칭을 고려하여, 본 계산에서는 매 타임스텝마다 (4), (5)조건을 번갈아 적용했다.

물체주위의 흐름을 원주주위의 흐름으로 사상(mapping)하는 경우는 자유와가 원주내부의 경상

(mirror)의 위치(역방향의 순환을 가진다)에도 놓여지기 때문 자동적으로 Kelvin의 정리를 만족한다. 그러므로 이 경우에는 (3)식의 조건은 필요가 없다.

또한 수치계산에서는 통상 물체주위의 경계조건으로 속도의 조건 즉 물체표면에서 유체의 법선속도성분이 그 점에서의 물체의 이동속도의 법선성분과 같다(정지물체의 경우 0이다)는 조건을 이용한다. 그리고 본 계산법에서와 같이 속박와로서 폐곡선으로 된 임의의 물체주위의 흐름을 나타낼 경우, 검사점의 수와 미지수인 속박와의 수는 같게 된다. 따라서 이 경우 Kelvin의 조건을 적용시키면 미지수에 비해 조건수가 1개 더 많은 불균형이 생겨 1개의 검사점을 생략해야 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 유동함수의 조건을 이용하면 물체표면의 유동함수 Ψ_0 도 미지수가 되므로 상술한 불균형의 문제가 해결된다.

박리점에 자유와의 도입에 대해서는 박리점 근방에 와도입 위치를 가정해서 Kutta의 조건으로 와의 강도를 결정하는 방법과, 경제층 이론으로 와의 강도 $x(x=(1/4\pi)v_s^2 \Delta t)$, v_s : 박리점에서 유속, Δt : 타임스텝)를 결정하는 방법이 자주 이용된다. 본 연구에서는 전자의 방법을 이용했는데, 즉 Fig. 1에 나타낸바와 같이 Sea anchor의 각 연방향으로 속박와를 하나씩 더 배치해서 이 속박와를 자유와로서 매 타임스텝마다 방출했다.

2.2 유동장의 시뮬레이션

Sea anchor의 각 연에서 나오는 l번째의 자유와 \bar{z}_l 의 이동은 다음의 Euler식을 이용하여 행한다.

$$\begin{aligned} \bar{z}_l(t+\Delta t) &= \bar{z}_l(t) + \bar{W} \cdot \Delta t \\ W &= \frac{d}{dz} [F(z) - i\bar{x}_l \log(z - \bar{z}_l)] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\bar{}$ 는 공액복소수, W는 l번째의 자유와 \bar{z}_l 를 제외한 유동장내 전 속박와 및 자유와로부터 유기된 복소속도이며, Δt 는 타임스텝을 표시한다. 비점성와류에서는 선회속도의 크기가 중심으로부터의 거리에 반비례하는 자유와이며, (6)식의 복소속도에서 알 수 있듯이 자유와 상호가 접근했을 경우, 또는 자유와가 물체 표면에 접근했을 경우 비현실적인 속도가 유기된다. 그래서 이를 방지하기 위해 다음과 같은 선회속도 v_0 를 유기하는 점성와 모델을 이용했다.

$$v_{\theta} = \begin{cases} \frac{x}{r} (r \geq \sigma) \\ \frac{Xr}{\sigma^2} (r < \sigma) \end{cases} \quad (7)$$

여기서 x 는 와류의 강도, r 은 와중심으로부터의 반경, σ 는 점성와류의 와핵반경을 나타낸다. Inamuro⁽⁷⁾는 유체의 점성효과를 나타내기 위해 (7)식에서 와핵반경을 시간에 따라 확장시키는 소위 와핵확산법을 시도했다. 그러나 실제로 해상에서 사용되는 Sea anchor는 직경이 20 m정도이고, 유동장이 고 레이놀즈 수 영역이므로 점성의 효과가 적을 것으로 예상되어, 단지 상술한 비현실적인 유도속도를 방지하기 위해 와핵반경을 일정(여기서는 각 검사점과 이웃하는 속박와의 거리를 기준으로 $\sigma=0.025 C$ 로 했다)하게 유지시키는 방법을 채택했다.

한편 유동장의 시뮬레이션에 있어 각각의 유맥선(여기서는 25개 유맥선으로 했다)은 상류측의 어느 한점을 트레이서(Tracer)원으로 하고 그곳에 타임스텝 Δt 마다 트레이서를 넣어 계산했다. 그리고 각 트레이서의 이동은 (6)식을 이용하지만 이때 복소속도 $W=dF/dz$ 로 계산한다. 타임라인은 상류측에 트레이서원을 흐름에 수직한 한 개의 직선상으로 배열(여기서는 60개의 점으로 배열했다)해서 일정한 시간간격(여기서는 $5\Delta t$ 로 했다)마다 일제히 방출시켜 행하였고, 그 이동방법은 유맥선에서와 같다. 또한 속도벡터장은 유동장에 등방형의 격자(여기서는 $0.2 C$ 간격으로 20×15 개로 했다)를 구축하여 각 격자점에서 복소속도를 계산해서 얻었고, 유선은 이 속도벡터장으로 부터 구했다.

2.3 양력, 항력 및 특성계수

Fig. 1에서 x방향, y방향으로 Sea anchor에 작용하는 유체력을 각각 X , Y 라고 하면 그것은 비정상류로 확장한 Blasius공식을 이용해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} X - iY &= \frac{i\rho}{2} \oint_B \left(\frac{dF}{dz} \right)^2 dz + i\rho \oint_B \frac{d\bar{F}}{d\bar{z}} d\bar{z} \\ &= 2\pi\rho \left\{ U i \sum_{j=1}^m x_j - \sum_{j=1}^m \sum_{l=1}^n x_j \bar{x}_l \right. \\ &\quad \times \frac{1}{\bar{z}_l - z_j} + i \sum_{j=1}^m \dot{x}_j \bar{z}_j \\ &\quad \left. + i \sum_{l=n-1}^n \frac{\bar{x}_l}{\Delta t} \bar{z}_l \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, B 는 Sea anchor 표면

에 따른 적분경로, $\bar{\cdot}$ 는 공액복소수를 나타내며, \dot{x}_j 는 시간차분으로 다음과 같이 계산한다.

$$\dot{x}_j = \frac{x_j(t) - x_j(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (8)$$

또한 (7)식의 우변 마지막 항에서 $l=n-1$, n 에 매 타임스텝마다 Sea anchor의 각 연에서 새로이 발생한 자유와를 의미한다.

한편 Sea anchor의 유체역학적 특성을 나타내는 양력계수 C_L 및 항력계수 C_D 는 스판을 단위길이로 하면 다음과 같이 정의된다

$$C_L = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho U^2 C} \quad (9)$$

$$C_D = \frac{-X}{\frac{1}{2} \rho U^2 C} \quad (10)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, C 는 Sea anchor의 현장을 나타낸다.

3. 계산결과 및 고찰

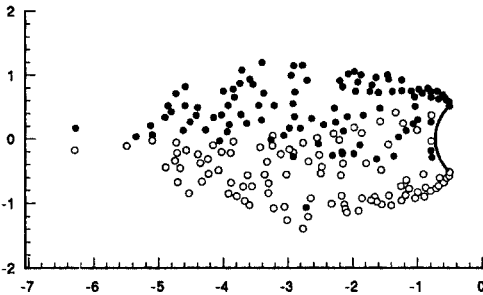
본 계산에서 계산조건(Fig. 1 참조)은 Sea anchor의 현장 $C=1$, 일정류 $U=1$, 속박와의 수 $m=20$ 및 타임스텝 $\Delta t=0.1$ 로 했다. 그리고 Sea anchor의 캠버비(Camber ratio) B/C 및 무차원 시간 Ut/C 를 계산 변수로 해서 유동장을 계산했다. 본 계산에 사용한 컴퓨터는 삼성매직파워(SPC8200 PG) 퍼스널 컴퓨터이며, 1개의 변수로 400스텝까지의 계산시간은 유체력 및 와류분포의 경우 10분, 유맥선의 경우 38분, 타임라인의 경우 25분, 속도벡터 및 유선의 경우 10분이 걸렸다. 매 타임스텝마다 2개씩 자유와가 방출되므로 400스텝까지 유동장내의 총 자유와의 수는 800개가 된다.

일반적으로 이산와법으로 유동장을 계산하는 데 있어 둔한 물체의 경우 또는 랜덤워크법으로 유체의 점성확산을 나타낼 경우 유동장내에 충분히 많은 와요소를 도입해야 정도 좋게 유동장을 계산할 수 있다. 왜냐하면 전자의 경우 박리점이 일정하지 않아 물체의 전 주위에 와요소를 배치시켜 와요소의 상호작용으로 박리점이 자동적으로 결정되기 때문, 후자의 경우는 분자의 브라운운동에 대응시켜 정규난수를 각 와요소의 위치좌표에 부가해서 점성 확산효과를 나타내는 방법으로 통계적인 관점에 기

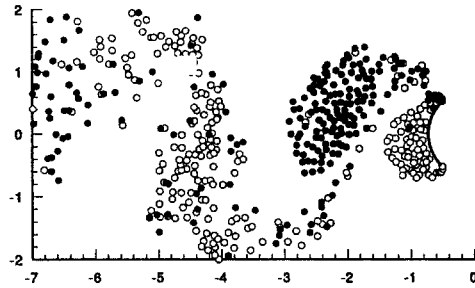
초한 방법이기 때문이다. 그러나 Sea anchor의 경우 그 기하학적 형태상 박리점을 유추할 수 있고, 유동장 역시 점성효과가 적은 고 레이놀즈 수 영역이므로 이전의 연구^(7~11)에서 보는 바와 같이 상술한 와요소 수로도 정성적으로는 충분한 결과를 얻을 수 있다.

먼저 Fig. 2에 초기시스템에서 방출된 자유와에 아무런 교란을 주지 않은 경우 시간변화에 따른 와류분포를 나타낸다. 그림에 나타낸 바와 같이 와류분포는 100스텝까지는 거의 x축에 대칭이고, 300스텝에서야 비로소 칼만와가 형성되기 시작했으며, 500스텝에서 +, -방향 교대로의 완전한 칼만와가

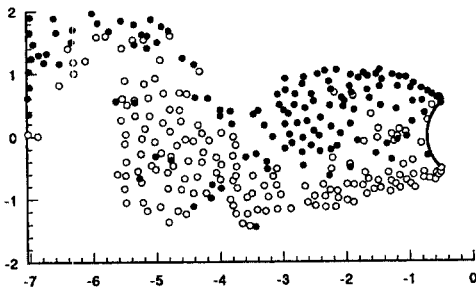
형성되었다. x축 흐름의 대칭이 깨어지기 시작한 것은 아주 미소한 계산오차에 기인한 것으로 사료되며, 사실 이산와법은 사용한 컴퓨터의 종류에 따라서도 약간 상의한 결과를 보인다는 보고도 있다.⁽⁴⁾ Fig. 2에 보는 바와 같이 자유와에 아무런 교란을 주지 않아도 어느 일정시간이 경과하면 칼만와가 형성되지만 계산시간상, 사용한 컴퓨터의 메모리 용량상, 계산시간을 어느 한도 이상으로 할 수 없다. 그래서 계산시간을 줄이기 위해 초기시스템에 유동장을 강제적으로 교란시켰다. 즉 초기 20스텝까지 Sea anchor의 윗면, 아랫면에서 발생하는 자유와의 강도를 교대로 1.0, -1.0으로해서 방출



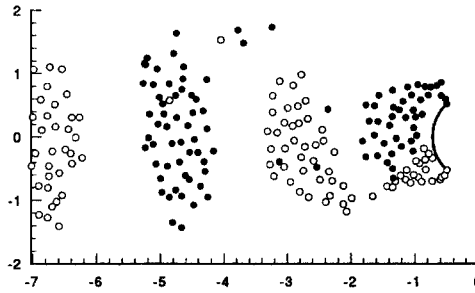
(a) $Ut/C=10$



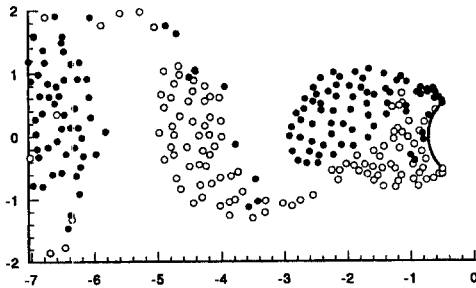
(a) $\Delta t=0.05$



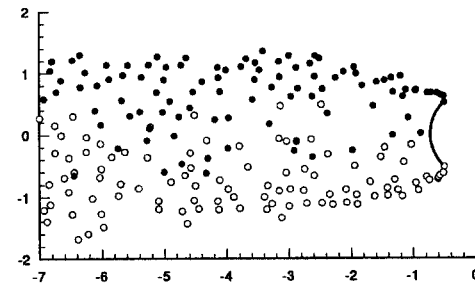
(b) $Ut/C=30$



(b) $\Delta t=0.1$



(c) $Ut/C=50$



(c) $\Delta t=0.15$

Fig. 2 Vortex distributions with time (No disturbance).

Fig. 3 Vortex distributions for various time steps Δt ($Ut/C=40$).

시켰다. 한편 초기교란의 시간변화가 계산결과에 미치는 영향을 검토하기 위해, 초기교란 스텝을 10, 20, 30스텝으로 변화시켜 400스텝에서의 와류분포를 계산한 결과 서로 유사한 칼만와의 분포를 나타냈다. 그러나 양력계수의 시간변화를 계산해 본 결과 10스텝까지 교란을 준 경우 260스텝이 지나고부터 비로소 양력계수의 주기적인 진동이 명확히 나타났고, 20스텝, 30스텝의 경우는 초기교란 후 곧 바로 양력계수의 주기적인 진동이 형성되어 이하 초기교란을 20스텝으로 했다.

또한 이산와법은 라그랑제(Lagrange)적으로 입자를 추적해서 유동장을 해석하고 있기 때문 타임스텝 Δt 및 속박와의 수 m 에도 민감한 특성을 가지며 먼저 이들 변수에 대한 유동장의 의존성을 검토한다.

Fig. 3에 타임스텝 Δt 변화에 따른 와류분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 $\Delta t=0.05$ 및 $\Delta t=0.1$ 경우는 윗연에서는 반시계방향(그림에서 ● 표시), 아랫연에서는 시계방향(그림에서 ○ 표시)의 와류가 발생하고 있으며 그것이 후류측에서 교대로 커다란 칼만와를 형성하고 있어 정성적으로 유사한 특성을 보이고 있다. 그러나 $\Delta t=0.15$ 경우는 $\Delta t=0.05, 0.1$ 의 경우와는 달리 전혀 후류측에 칼만와가 형성되지 않고 있으며, 이것은 타임스텝을 어느 일정정도 이상으로 하면 계산오차가 크게되어 실제와 다른 유동장으로 될 수 있음을 보여준다. 본 방법과 유사한 방법으로 연구한 이전의 연구⁽⁹⁻¹¹⁾에서 $U\Delta t/C=0.06\sim 0.1$ 로 했을 경우 실험결과와 비교적 잘 일치했으므로 이하 Sea anchor계산에서는 $U\Delta t/C=0.1$ 로 했다.

Fig. 4에 물체주위의 흐름을 나타내는 속박와(Bound vortex)의 수 m 의 변화에 따른 와류분포를 나타낸다. 속박와의 수 $m=15$ 의 경우와는 달리 $m=20$ 및 30의 경우는 후류측에 교대로 명확한 칼만와가 형성되고 있으며, 칼만와의 간격 및 그 규모도 서로 유사하다. 이것은 본 계산법으로 유동장을 계산할 경우 속박와의 간격을 어느 정도 작게 할 필요가 있음을 나타내고 있다. 실제로 본 방법과 유사한 방법으로 연구한 이전의 연구⁽⁹⁻¹¹⁾에서 $m=20$ 즉 속박와 사이의 간격 $\Delta x=0.05C$ 로 했을 경우 비교적 실험결과와 잘 일치했다. 그래서 이하 Sea anchor의 계산에서도 그 값을 그대로 적용했다.

이상의 Fig. 3 및 Fig. 4를 종합하면 본 이산와법

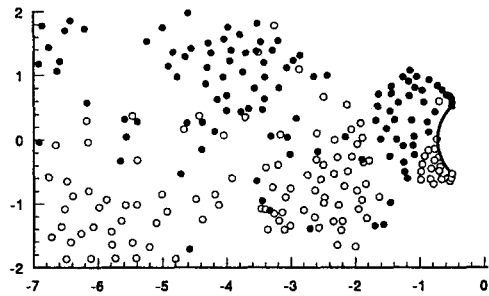
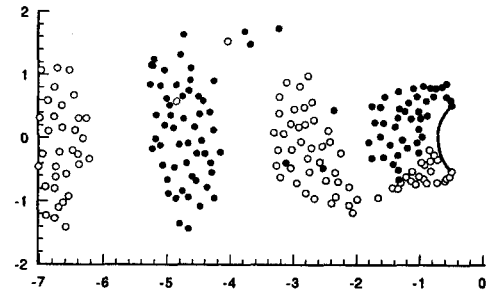
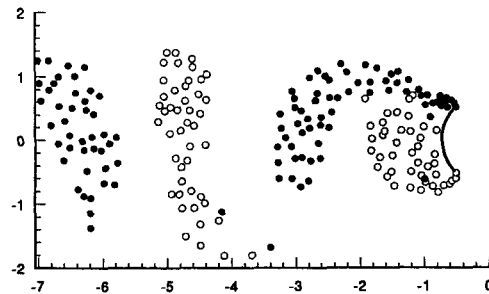
(a) $m=15$ (b) $m=20$ (c) $m=25$

Fig. 4 Vortex distributions for various bound vortices $m(Ut/C=40)$.

을 이용할 경우, 유동장의 계산결과는 타임스텝 및 속박와의 수에 크게 의존하며, 본 계산에서는 경험적으로 $\Delta x/\Delta t=0.5U$ 로 잡아 계산했으나 이 후 실험결과가 잘 알려진 유동장을 계산대상으로 잡아 $\Delta x/\Delta t$ 의 최적치에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다.

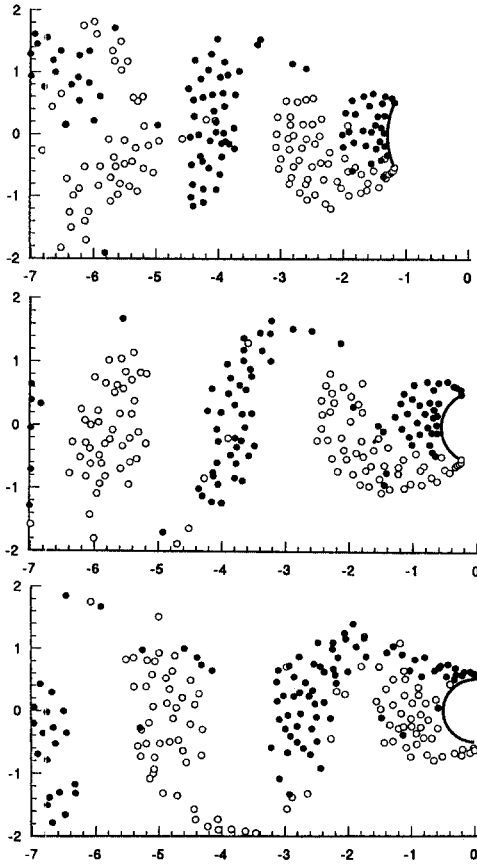
Fig. 5에 캠버비 $B/C=0.1, 0.3, 0.5$ 에서의 와류분포 및 유선을 나타낸다. 와류분포를 보면 캠버비에 관계없이 윗연에서는 반시계방향(그림에서 ● 표시), 아랫연에서는 시계방향(그림에서 ○ 표시) 와류가 발생하고 있으며, 그것이 후류측에서 교대로 커다란 칼만와를 형성하고 있다. 그리고 칼만와의

간격은 캠버비가 클수록 약간 크게 나타나 있다.

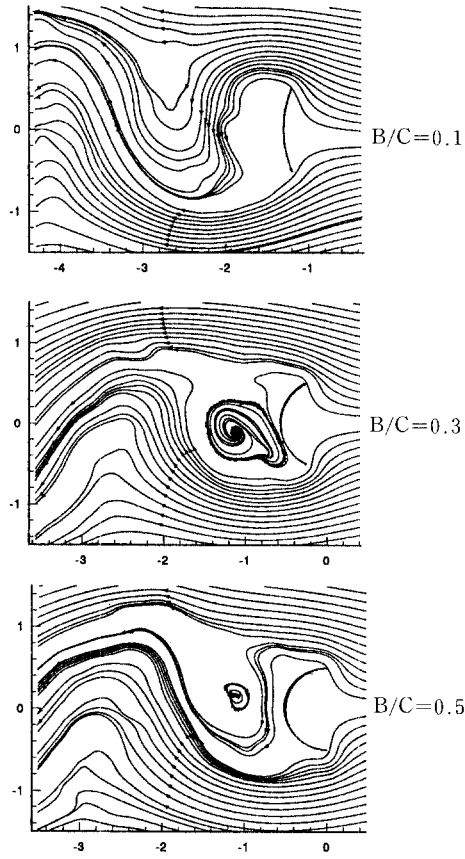
Fig. 6에 캠버비 $B/C=0.1$ 의 경우 항력계수 C_D 및 양력계수 C_L 의 시간변화를 나타낸다. 항력계수

는 시간이 증가해도 거의 일정하나 양력계수는 0축을 기준으로 해서 일정한 주기로 진동하고 있다.

Fig. 7에 캠버비 $B/C=0.2$ 에서의 항력계수 C_D



(a) Vortex distributions



(b) Stream lines

Fig. 5 Flow patterns for various camber ratios ($Ut/C=40$).

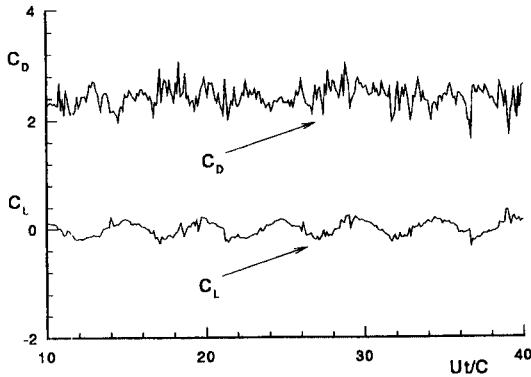


Fig. 6 Drag and lift coefficients with time ($B/C=0.1$).

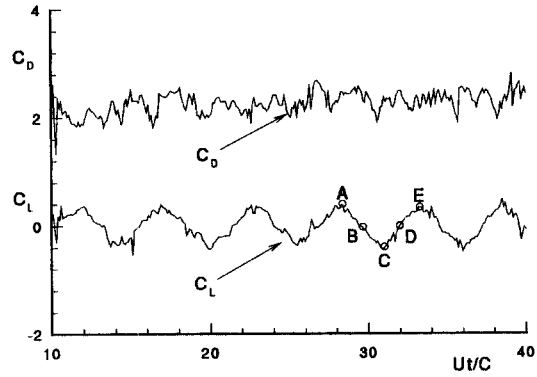
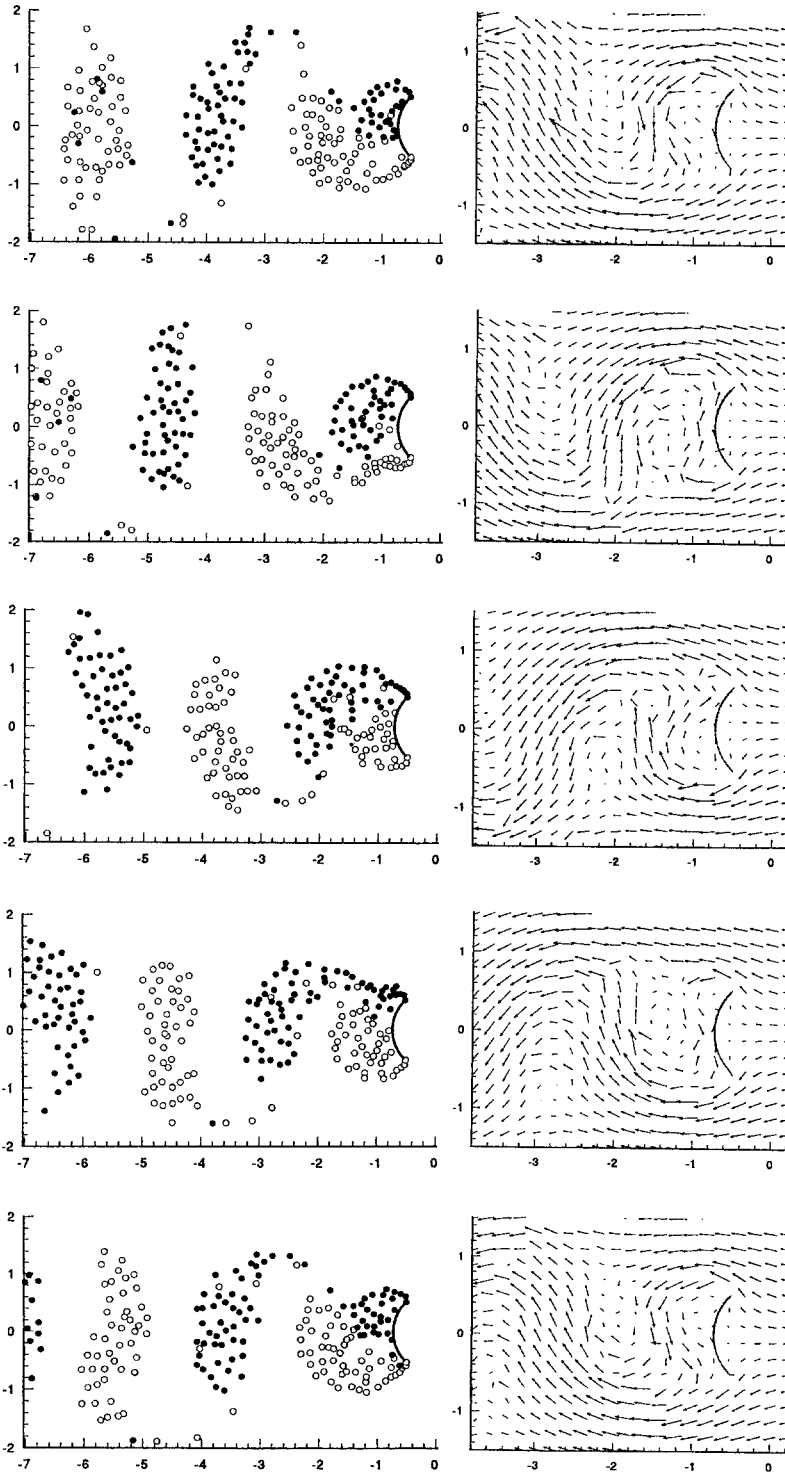


Fig. 7 Drag and lift coefficients with time ($B/C=0.2$).



(a) Vortex distributions

(b) Velocity vectors

Fig. 8 Flow patterns with time (A~E on the figure correspond to those points on Fig. 7).

및 양력계수 C_L 의 시간변화를 나타낸다. 정성적으로 각 계수는 Fig. 6에서와 거의 같은 경향을 보이고 있으나 캠버비 $B/C=0.2$ 의 경우가 $B/C=0.1$ 의 경우보다 항력계수는 약간 작게 양력계수의 진폭은 훨씬 크게 나타나고 있다.

Table 1에 다양한 캠버비 B/C 에 따른 항력계수 C_D , 양력계수 C_L 및 Strouhal 수 St 를 나타낸다. 여기서 각 값은 400스텝까지 계산하여, 흐름이 충분히 발달한 영역, 즉 양력계수의 마지막 2주기간을 기준으로 한 평균값이다. 단 양력계수는 최대값, 최소값을 각각 평균했으며, Strouhal 수 $St=fC/U$ (f : 무차원 진동수)로 계산했다. 먼저 항력계수를 보면 캠버비가 클수록 그 값이 약간 감소한다. 양력계수를 보면 캠버비가 클수록 그 진폭 값이 대폭적으로 증가하고 있다. 또한 Strouhal 수는 캠버비가 클수록 약간 그 값이 감소한다. 즉 Table 1을 전체적으로 보면 항력계수, Strouhal 수는 거의 변화가 없으나 양력계수 값은 캠버비가 증가함에 따라 대폭 증가하고 있어, Sea anchor를

설계할 경우 캠버비가 작은 쪽이 다른 성능에서는 거의 차이가 없으면서 특히 동적 안정성이 탁월함을 알 수 있다.

Fig. 8는 시간변화에 따른 볼텍스분포 및 속도벡터장의 변화를 나타낸다. 그림의 우측에 표시한 A~E는 각각 Fig. 7의 양력곡선의 1주기 상에 표시한 각점 A~E에 상당한다. 먼저 와류분포를 보면 Sea anchor의 배면 즉 좌표 $(-1, 0)$ 근방을 주목해 보면 그림 중의 A와 B에서는 뒷연에서부터 발생한 반시계 방향(그림에서 ●표시)의 와류가 그 배면을 지배하고 있고, C와 D에서는 반대로 아랫연에서 발생한 시계방향의 와류(그림에서 ○표시)가 그 배면을 지배하고 있다. 또한 양력계수의 최대점(A 또는 E)에서와 최소점(C)에서 Sea anchor 배면의 와류분포의 형상이 서로 반대로 나타나 있다. 즉 그림의 A에서 E까지를 연속해서 보면, +, -방향의 와류 덩어리가 교대로 Sea anchor 배면에 생성되어 그것이 일정간격의 칼만와를 형성하면서 후류측으로 흘러가고 있다. 이 칼만와가 Fig. 7에 나타난 바와 같은 양력계수의 주기적인 진동을 가져와, Sea anchor의 동적 불안정의 원인이 됨을 알 수 있다. Fig. 8의 속도벡터장을 보면 Sea anchor의 배면에 A와 B에서는 반시계 방향의 와류가 C와 D에서는 시계방향의 와류가 형성되고 있음을 볼 수 있다. 또한 속도벡터장 A의 $(-1, 0)$ 점 부근에 위치한 와류가 B에서는 $(-1.2, 0)$ 점, C에서는 $(-2, 0)$ 점, D에서는 $(-2.8, 0)$ 점, E에서는 $(-3.6, 0)$ 점 부근으로 점차 이동해 가는 것

Table 1 Drag coefficients(C_D), lift coefficients(C_L) and Strouhal numbers(St) for various camber ratios(B/C).

B/C	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
C_D	2.5	2.3	2.4	2.3	2.3
C_L	± 0.25	± 0.44	± 0.60	± 0.72	± 0.88
St	0.208	0.196	0.204	0.187	0.185

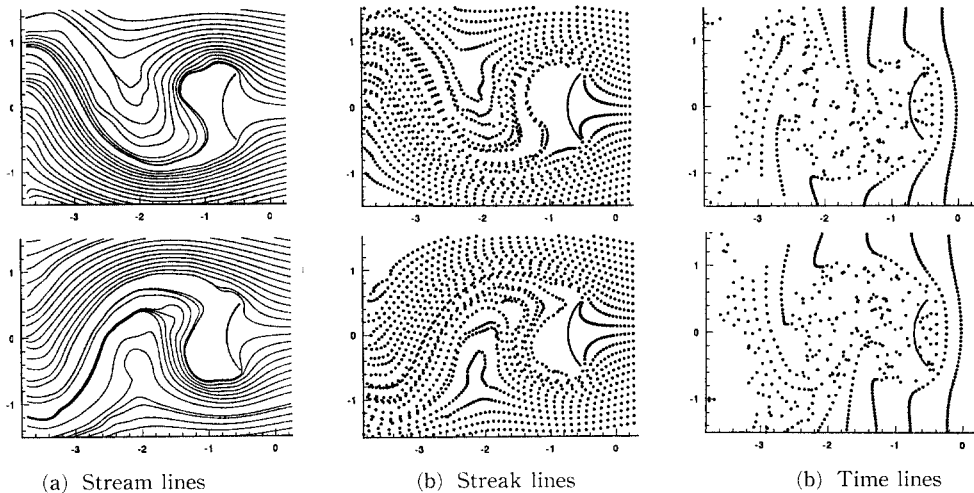


Fig. 9 Flow patterns with time (A and C on the figure correspond to those points on Fig.7).

을 볼 수 있다.

Fig. 9에 시간변화에 따른 유선, 유맥선 및 타임라인을 나타낸다. 그림의 우측에 표시한 A와 C는 각각 Fig. 7에 표시한 양력계수곡선의 최대점 A와 최소점 C에 대응한다. 양력의 최대점과 최소점에서의 유선, 유맥선 및 타임라인 모두 서로 x축에 대칭으로 나타나있다. 유선분포를 보면 A에서는 Sea anchor의 윗연 부근의, C에서는 아랫연 부근의 유선간격이 좁게 나타나 있다. 일반적으로 유선간격이 좁은 부분이 유속이 빠르고 압력이 낮아 A에서는 +방향, C에서는 -방향을 양력이 작용됨을 유선분포에서도 유추 할 수 있다. 유맥선과 타임라인에서, 특히 Sea anchor 압력면 부근의 타임라인을 보면 중앙부분이 불룩한 형태를 취하고 있어, 중앙부근의 흐름이 양 측면 보다 느림을 알 수 있다. 또한 유선, 유맥선 및 Fig. 8의 속도벡터장에서도 알 수 있듯이 Sea anchor의 압력면측에 정체한 유체가 서서히 양 연 쪽으로 흘러감을 알 수 있다.

4. 결 론

원호형 Sea anchor의 비정상 흐름특성 및 역학적 특성을 이산화법에 의한 수치계산으로 명확히 했다. 속박와를 등간격으로 배치하여 Sea anchor 주위의 흐름을 나타냈으며, 박리는 Sea anchor의 윗연과 아랫연에서 일어난다고 가정했다. 캠버비 및 무차원 시간을 변수로 잡아 역학적 특성 및 유동장을 계산했으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 시간변화에 따라 항력계수는 거의 일정하나 양력계수는 주기적으로 진동하며, 그 진동의 원인은 각 연에서 발생하는 칼만와의 영향이다. 캠버비가 증가함에 따라 항력계수 및 Strouhal 수는 거의 변화가 없으나 양력계수의 진폭은 대폭 증가한다. 압력면측의 유체는 거의 정체상태에 있다. 또한 본 이산화법의 경우 타임스텝 및 속박와의 수에 따라 계산결과가 민감한 변화를 보였으며 앞으로 이들 값의 최적치에 대한 보다 구체적인 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 1996년도 농림수산 특정연구과제의 현장애로기술사업으로 수행되었음.

참고 문헌

- (1) 이병기, 박승원, 김진진, 1985, 연근해어업개론, 태화출판사, 부산, pp. 112~116.
- (2) 조태현 등, 1989, 현대한국어구도감, 국립수산진흥원, 경남, pp. 89~91.
- (3) Nomura, M., Mori, K., Tawara, Y. and Osawa, Y., 1967, "Hydraulic Resistance of Current Parachute," Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab., No. 52, pp. 49~74.
- (4) Kuwahara, K., 1973, "Numerical Study of Flow past an Inclined Flat Plate by an Inviscid Model," J. of the Physical Society of Japan, Vol. 35, No. 5, pp. 1545~1551.
- (5) Sarpkaya, T., 1986, "An Analytical Study of Separated Flow about Circular Cylinders," Trans. of the ASME, J. of Basic Engineering, Vol. 90, pp. 511~518.
- (6) Sung, H. T., Kim, Y. N. and Hyun, J. M., 1994, "Discrete Vortex Simulation of Pulsating Flow Behind a Normal Plate," Trans. of the ASME, J. of Fluids Engineering, Vol. 116, pp. 862~869.
- (7) Inamuro, T. Saito, T. and Adachi, T., 1984 "A Numerical Analysis of Unsteady Separated Flow by the Discrete Vortex Method Combined with the Singularity Method," Computer & Structure, Vol. 19, No. 1-2, pp. 75~84.
- (8) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., 1989, "Unsteady Pressure and Force in the Discrete Vortex Methods," Trans. of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 32, No. 97, pp. 129~142.
- (9) 노기덕, 1993, "Weis-Fogh형 선박 추진기구의 개발 (유동장의 가시화 및 수치해석)," 대한기계학회논문집, 제17권, 제2호, pp. 426~437.
- (10) 노기덕, 1997, "Weis-Fogh형 선박 추진기구의 역학적 특성계산," 대한기계학회논문집, 제21권, 11호, pp. 1518~1526.
- (11) Tsutahara, M., Kimura, T. and Ro, K. D., 1994, "Ship's Propulsion Mechanism of Two-Stage "Weis-Fogh" Type," Trans. of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 116, pp.

- 278~286.
- (12) Chorin, A. J., 1982, "Numerical Study of Slightly Viscous Flow," J. of Fluid Mechanics, Vol. 57, pp. 785~796.
- (13) Ogami, Y. and Akamatsu, T., 1991, "Viscous Flow Simulation Using the Discrete Vortex Method - The Diffusion Velocity Method," Computers and Fluids, Vol. 19, Pt. 3, pp. 433-441.
- (14) Ogami, Y., 1997, "Simulation of Natural Convection by the Vortex Method for Heat Transfer," Japan Soc. of CFD, 11th Symposium paper, pp. 373~374.
- (15) Ro, K. D. and Tsutahara, M., 1997, "Numerical Analysis of Unsteady Flow in the Weis-Fogh Mechanism by the 3D Discrete Vortex Method with GRAPE3A," Trans. of the ASME, Journal of Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 96~102.