

에크만 분출 모델을 이용한 캐버티 내의 비정상 유동특성에 관한 수치해석

서 용 권* · 박 춘 근* · 최 윤 환** · 문 중 춘***

(97년 5월 26일 접수)

A Numerical Analysis of an Unsteady Flow in a Cavity Using an Ekman Pumping Model

Yong-Kweon Suh · Chun-Kun Park · Yoon-Hwan Choi · Jong-Chun Moon

Key Words : Ekman Pumping Effect (에크만 분출 효과), Vortex (와도), Rectangular Cavity (직사각형 캐버티), Residual Flows(잔류유동)

Abstract

A two dimensional shallow-water flow around a cavity driven by a sinusoidally oscillating external flow was studied numerically with an Ekman pumping model. A container model of "T" shape was constructed in the numerical computation for comparison with the experimental observation. The material transport in the external region is in good agreement with the experimentally recorded particle trajectories. It turns out that two large coherent vortices situated in the exterior region of the cavity are responsible for clockwise and counterclockwise drift motions, in large scale, of particles. The Ekman pumping model suggested in this study was found to be satisfactory.

1. 서론

본 연구는 외부 유동에 의한 직사각형 캐버티 내의 비정상 유동에 관한 것이다. Fig. 1은 본 연구의 대상이 되는 유동모델을 도시한 것이다. 그림에서 ①지역은 캐버티를 ②지역은 그 외부를 나타내며, 시편의 반복적 기울임에 따른 x^* 방향의 주기

적인 외력에 의하여 외부에 유동이 형성된다. 이때 형성된 외부유동은 캐버티 내부의 유동을 형성하는 요인이 된다. 이러한 유동 모델은 실제 연안에서 일어나는 유동현상을 단순한 형태로 모델링한 것이라 할 수 있다. 즉 Fig. 1에서 ①지역은 항만(港灣)이나 만(灣)에 해당되며, ②지역에서의 x^* 방향의 주기적인 외부유동은 조류(tidal flow)에 해

* 동아대학교 기계공학과

** 동아대학교 대학원 기계공학과

*** 경동전문대학 건축설비과

당한다. 서 등¹⁾은 이러한 유동모델에 대한 가시화 실험을 통하여 유동특성을 연구한 바 있으며, 이들의 연구를 제외하면 이와 같은 유동 모델에 대한 연구는 전무한 실정인 듯하다. 지금까지 연구되어 온 본 연구의 유동모델 보다 간단한 구조에 대한 연구는 Soh & Goodrich²⁾ 그리고 Iwatsu^{3),4)} 그룹이 연구한 oscillatory-lid-driven-cavity에 관한 연구이며, 이들의 연구는, 본 연구에서 사용한 외부 유동의 구동매체가 유체인 것에 반하여, 수직평판을 캐버티에 부착시켜 x^* 방향으로 요동시키는 방법을 사용하였다. 한편, 서⁵⁾는 이와 같이 간단한 유동 모델에 대하여 더욱 높은 레이놀즈 수에 대하여 수치해석한 결과 비대칭 유동장이 형성되는 것을 밝혀냈다.

본 연구의 목적은 크게 세가지이다. 첫째, 외력의 주파라미터의 변화에 따라 유동의 형태가 어떻게 달라지는지를 규명하는 것이며, 둘째, 실제 연안에서의 조류에 의한 물질전달 특성을 이해하는 것이며, 셋째, 본 연구모델에 대한 본 에크만 분출 모델의 적합성 여부를 판단하는 것이다.

2. 이론적 배경 및 수치해석 방법

Fig. 1과 같은 유동모델에서 x^* 를 가로 방향 y^* 를 세로 방향, z^* 를 수직 방향의 좌표로 하면 유동에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \nu \nabla^{*2} u^* + g \Delta \theta \cos \omega t^* \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} + \nu \nabla^{*2} v^* \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial w^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p^*}{\partial z^*} + \nu \nabla^{*2} w^* - g \end{aligned} \quad (4)$$

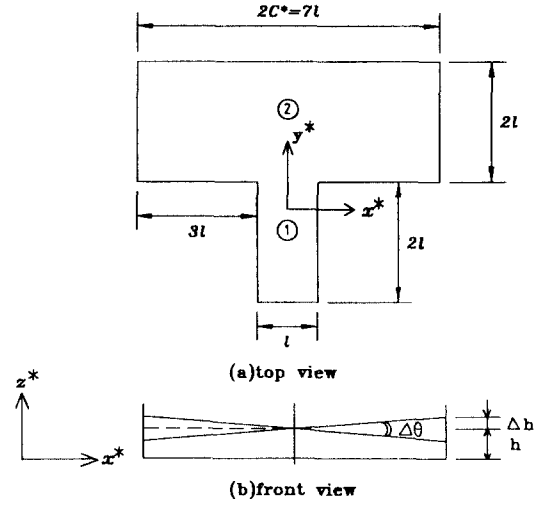


Fig. 1. Geometry of the model basin and the variation of the water level

$$\nabla^{*2} = \frac{\partial^2}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial z^{*2}} \quad (5)$$

여기서, u^* , v^* 및 w^* 는 각각 x^* , y^* 및 z^* 방향의 속도, p^* 는 압력, t^* 는 시간, g 는 중력가속도, ω 는 각속도, ν 는 동점성계수, ρ 는 밀도를 나타내며, Fig. 1에서 $\Delta \theta$ 는 테이블의 요동 각진폭을 나타낸다.

유체의 자유표면을

$$z^* = \eta^*(x^*, y^*, t^*) \quad (6)$$

로 표시하면, 경계조건은 다음과 같다. 고체벽면에서는

$$u^* = v^* = w^* = 0 \quad (7)$$

이며, 자유표면 $z^* = \eta^*(x^*, y^*, t^*)$ 에서는

$$\frac{\partial u^*}{\partial n^*} = \frac{\partial v^*}{\partial n^*} = 0 \quad (8a)$$

$$p^* = 0 \quad (8b)$$

$$\frac{d\eta^*}{dt^*} = w^* \quad (8c)$$

이 된다. 여기서 n^* 는 자유표면에서의 법선방향을

나타낸다

윗 식은 3차원 지배방정식이므로 계산기의 용량 및 수치해석상의 불안정성을 고려하여 2차원적 문제로 단순화할 필요가 있다. 본 유동 모델은 수심 h 에 비하여 l 이 충분히 크므로 천수근사법을 사용하여 2차원 문제로 단순화시킬 수 있다. 천수근사법의 기본요건은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{h}{l} \ll 1 \quad (9)$$

수평방향의 속도 성분인 u^* 와 v^* 의 기준되는 양을 U^* , 수직방향의 속도 성분인 w^* 의 기준량을 W^* , t^* 의 기준량을 T^* , p^* 의 기준량을 P^* 라 할 때, 식 (1)로부터 W^* 는 다음과 같다.

$$W^* = O(\varepsilon U^*) \quad (10)$$

식 (4)에서 각항의 크기를 비교하면, 좌변의 첫항은 $O(U^*/T^*)$, 좌변의 나머지 항들은 $O(U^{*2}/l)$, 우변의 압력항은 $O(P^*/\rho l)$ 등으로 그 크기를 나타낼 수 있다. 점성항과 체적력을 제외한 나머지 항들을 이와 같은 크기로 나타내어 힘의 균형을 생각한다면, P^* 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P^* = O\left[\rho gh, \varepsilon^2\left(\frac{\rho U^* l}{T^*}\right), \varepsilon^2(\rho U^{*2})\right]_{\max} \quad (11)$$

위 식은 식 (9)에 의해 우변의 둘째 항과 셋째 항을 무시할 수 있다. 그러므로 압력 기준량은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P^* = O[\rho gh] \quad (12)$$

위 식은 식 (4)의 좌변이 우변의 압력항에 비하여 무시할 수 있다는 것을 나타낸다. 그러므로 식 (4)는 다음과 같이 근사화 된다.

$$\frac{\partial \bar{p}^*}{\partial z^*} = -\rho g \quad (13)$$

위 식을 적분하면,

$$\bar{p}^* = -\rho gz^* + \bar{p}^*(x^*, y^*, t^*) \quad (14)$$

와 같다. 이제 경계조건 (8b)를 식 (14)에 적용하면, \bar{p}^* 는 다음과 같이 된다.

$$\bar{p}^*(x^*, y^*, t^*) = \rho g \eta^* \quad (15)$$

식 (14)를 (2)와 (3)에 대입하고 식 (15)를 사용하면 (2)와 (3)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \\ = -g \frac{\partial \eta^*}{\partial x^{*2+\nu}} \nabla^{*2} u^* + g \Delta \theta \cos \omega t^* \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*} \\ = -g \frac{\partial \eta^*}{\partial y^*} + \nu \nabla^{*2} v^* \end{aligned} \quad (17)$$

η^* 는 x^* , y^* 및 t^* 만의 함수이고 z^* 와는 무관하므로, 식 (16)과 (17)에 의해 u^* , v^* 도 z^* 와 무관함을 알 수 있다. 그러면 식 (1)로부터 w^* 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$w^* = z^* \bar{w}^*(x^*, y^*, t^*) + \bar{w}_0^*(x^*, y^*, t^*) \quad (18)$$

이러한 결과들을 식 (1), (16) 및 (17)에 대입하면 다음과 같은 2차원 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -\bar{w}^* \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -g \frac{\partial \eta^*}{\partial x^*} \\ + \nu \nabla^{*2} u^* + g \Delta \theta \cos \omega t^* \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = -g \frac{\partial \eta^*}{\partial y^*} \\ + \nu \nabla^{*2} v^* \end{aligned} \quad (21)$$

$$\nabla^{*2} = \frac{\partial^2}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial y^{*2}} \quad (22)$$

식 (18)을 경계조건 (8c)에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial \eta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \eta^*}{\partial y^*} = \eta^* \bar{w}^* \\ + \bar{w}_0^* \end{aligned} \quad (23)$$

벽면에서의 경계조건 (7)은 아래와 같다.

$$u^* = v^* = 0 \quad (24)$$

식 (18)을 (23)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial t^*} + \frac{\partial (u^* \eta^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial (v^* \eta^*)}{\partial y^*} = \overline{w_0^*} \quad (25)$$

이제 수치해석을 위하여 지금까지 구한 지배방정식(식 (19)-(21), (25))과 경계조건을 무차원화하여야 한다. 이를 위하여 아래 식과 같이 각각의 변수에 대한 무차원 관계식을 사용하였다.

$$(x^*, y^*) = l(x, y), \quad z^* = hz \quad (26a)$$

$$t^* = \frac{1}{\omega} t \quad (26b)$$

$$(u^*, v^*) = V_g(u, v), \quad \overline{w_0^*} = \varepsilon V_g \overline{w_0} \quad (26c)$$

$$\eta^* = h(1 + \eta) \quad (26d)$$

여기서 h 는 평균수심을 나타내며, V_g 는 평균속도를 나타내며 $V_g = \pi c^* \Delta h / (Th)$ 와 같다. 무차원 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + b \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right\} = -c \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{Re} \nabla^2 u + d \cos t \quad (28)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + b \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right\} = -c \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{Re} \nabla^2 v \quad (29)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + b \left\{ \frac{\partial u(1+\eta)}{\partial x} + \frac{\partial v(1+\eta)}{\partial y} \right\} = b \overline{w_0} \alpha t \quad z = 1 + \eta \quad (30)$$

위 식에서 사용한 무차원 변수들은 다음과 같다.

$$b = \frac{V_g}{\omega l} = \frac{V_g T}{2\pi l} \quad (31a)$$

$$c = \frac{gh}{\omega V_g l} = \frac{ghT}{2\pi V_g l} \quad (31b)$$

$$d = \frac{g\Delta\theta}{\omega V_g} = \frac{g\Delta h}{\omega V_g c^*} = \left(\frac{l}{c^*} \frac{\Delta h}{h} \right) c \quad (31c)$$

$$Re = \frac{\omega l^2}{\nu} = \frac{2\pi l^2}{\nu T} \quad (31d)$$

여기서 c^* 는 Fig. 1 (a)의 캐버티 외부의 x -방향의 크기를 나타낸다. 식 (30)의 우변의 $\overline{w_0}$ 는 에크만 분출 속도 즉 에크만층에서의 수직방향의 속도를 나타낸다.

분출속도를 구하기 위하여 식 (2), (3)에서 경계층에 수직인 방향의 점성항과 압력항, 및 외력만 고려하고 결과의 식을 무차원화 시킨 뒤 압력항을 천수근사에 따른 식 (14)와 (15)에 의해 처리하면 다음 식을 얻는다.

$$c \frac{\partial \eta}{\partial n} = \frac{1}{Re} \frac{1}{\varepsilon^2} \frac{\partial^2 V_n}{\partial z^2} - d \sin \theta \cos t \quad (32)$$

단, 여기서 n 은 경계층 상부지역 유동(2차원 천수근사 유동)의 유선에 수직인 방향의 좌표를 나타내며 V_n 은 경계층 내에서 그 방향의 속도성분을 나타낸다. 양변을 z 에 대해 두 번 적분하고 경계층 끝에서의 V_n 을 0으로 두면 다음을 얻는다.

$$V_n = Re \varepsilon^2 \left[d \sin \theta \cos t + c \frac{\partial \eta}{\partial n} \right] \left[\frac{1}{2} z^2 - \frac{1}{2} z \delta \right] \quad (33)$$

평균 유동속도는 다음과 같다.

$$\overline{V_n} = -\frac{Re \varepsilon^2 \delta^2}{12} \left[d \sin \theta \cos t + c \frac{\partial \eta}{\partial n} \right] \quad (34)$$

에크만 분출효과를 나타내는 계수인 γ 를 $\gamma = \delta \sqrt{Re}$ 로 두면 $\delta = \gamma / \sqrt{Re}$ 로 나타낼 수 있으며 위 식은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\overline{V_n} = \frac{-\gamma^2}{12} \varepsilon^2 \left[d \sin \theta \cos t + c \frac{\partial \eta}{\partial n} \right] \quad (35)$$

$\overline{V_n}$ 의 x, y -방향의 성분을 구하면,

$$\overline{V}_x = \frac{\gamma^2}{12} \varepsilon^2 \left[-\sin^2 \theta \left(c \frac{\partial \eta}{\partial x} - d \cos t \right) + \sin \theta \cos \theta \left(c \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right] \quad (36a)$$

$$\overline{V}_y = \frac{\gamma^2}{12} \varepsilon^2 \left[\sin \theta \cos \theta \left(c \frac{\partial \eta}{\partial x} - d \cos t \right) - \cos^2 \theta \left(c \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right] \quad (36b)$$

와 같으며 \overline{w}_0 는 경계층에서의 x, y 방향의 평균유속을 연속방정식에 적용하여 구할 수 있다:

$$\begin{aligned} \overline{w}_0 &= - \int_0^{\delta} \left[\frac{\partial \overline{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}_y}{\partial y} \right] dz \\ &= - \frac{\gamma}{\sqrt{Re}} \left[\frac{\partial \overline{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}_y}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (37)$$

즉, 분출속도는 평균속도 구배와 Re 그리고 γ 에 의하여 크기가 좌우됨을 알 수 있다.

본 연구에서 사용한 계산 알고리즘은 시간항에 대해서는 4계 룬계쿠타법(forth order Runge

-Kutta method)을 사용하였으며, 공간항에 대해서는 중심차분법을 이용하여 식을 차분화 하였으며, 격자계 형성에서는 엇갈림 격자계(staggered grid system)를 이용하였다. 이외의 수치해석 방법은 서와 문⁶⁾이 사용한 것과 근본적으로 같다.

3. 결과 및 검토

Fig. 2는 $Re=14000$ 그리고 $\gamma=2.7$ 일때의 수치해석 결과로서 유선(streamline)과 와류(vorticity)의 형태를 나타낸 것이다. 그림에서 유선은 순간속도에 대한 입자의 궤적에 의해 그려진 것이며, 와류를 나타내는 그림에서 어두운 부분은 반시계방향(counterclockwise)을 밝은 부분은 시계방향(clockwise)의 와도를 나타낸다. 그림에서 캐버티의 깊은 부분에서 시계방향의 와류가 생성되며, 이 와류는 한 주기동안 지속된다. 첫 번째 반주기 동안, 즉 주류(external current)의 방향이 왼쪽 방향

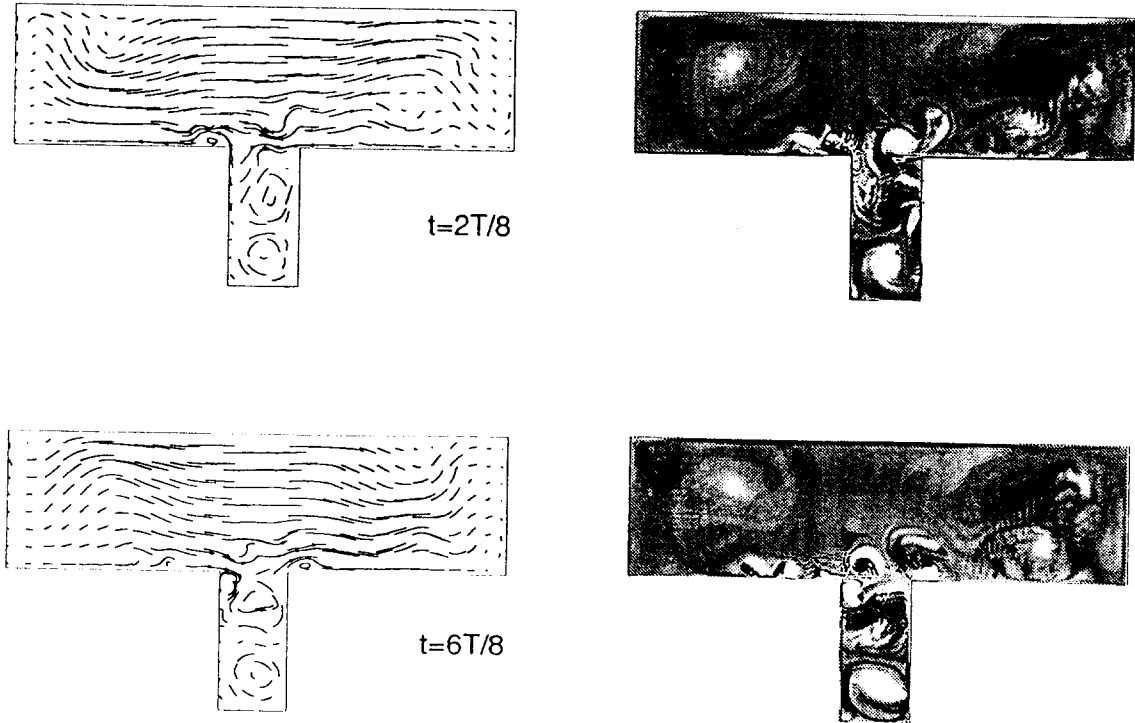
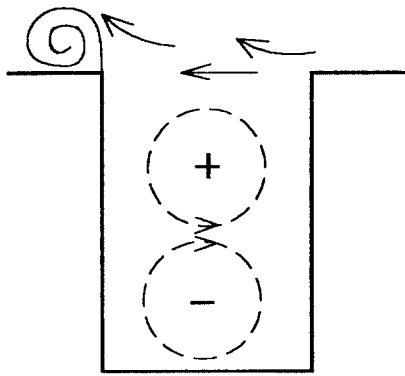


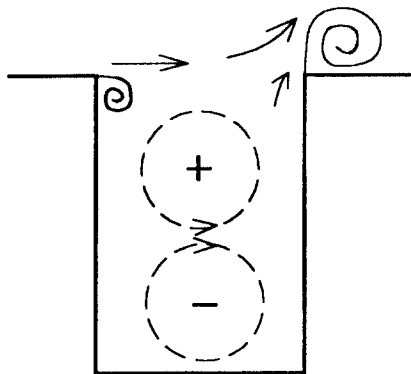
Fig. 2 Stream(left column) and vorticity(right column) plots for $\gamma=2.7$.

일 때 반시계 방향의 와류가 왼쪽 모서리에서 생성, 성장하기 시작하여 $t=4T/8$ 에서 유출하여 캐버티 안쪽의 반시계 방향의 와류에 혼합된다. 주류의 방향이 오른쪽인 두 번째 반주기 동안에는 첫 번째 반주기와는 달리 두 개의 시계방향의 와류가 $t=6T/8$ 일 때 생성되며(하나는 왼쪽 모서리에서 나머지 하나는 오른쪽 모서리에서 생성), 유출과 혼합은 첫 번째 반주기 동안의 형태와 유사한 양상을 보인다.

Fig. 3은 와류의 생성, 성장, 유출, 혼합에 대한 메카니즘을 나타낸다. 그림에서와 같이 캐버티 주위의 비대칭적으로 생성, 유출, 혼합되는 와류는 캐버티 내부에 잔류유동(residual flow: 점선부분)을 형성하는 요인이 되며, 반대로 캐버티 내의 잔류유동은 또한 이러한 비대칭적 와류운동의 요인이 된다.



(a) During the first half period



(b) During the second half period

Fig. 3 Processing of the vortex generation

Fig. 4 (a)는 레이놀즈수가 Fig. 2와 같지만 γ 가 작은 경우일 때 ($\gamma=1$) 유동 형태를 나타낸 것이다. 그림에서 캐버티 안쪽 지역의 유동은 Fig. 2와 유사하지만, 캐버티 바깥 지역에 여러개의 작은 와도들이 존재한다. 이는 γ 값이 작아져서 나타난 결과라고 볼 수 있다. 즉 γ 값이 작아졌기 때문에 에크만 분출효과가 Fig. 2에 비하여 상대적으로 감소하였기 때문이다. 이러한 사실은 Fig. 4 (b)에서 더욱 명백하게 드러난다. Fig. 4 (b)는 $\gamma=0$ 일때의 유동을 나타낸 것인데, 세가지 경우의 유동형태 중에서 가장 복잡한 유동을 보인다. 이러한 사실들을 종합해 보면 바닥에서의 에크만 분출효과는 캐버티 근처에서 발생하는 와류들을 소멸시키는 역할을 한다고 볼 수 있다.

Fig. 5는 서 등¹¹이 본 유동모델과 똑같은 모델에 대하여 유동가시화(flow visualization) 실험한 결과이다. 실험에서 수평방향의 체적력은 주기적으로 기울기(tilting) 용기(basin)에 의해 형성되며, 수치해석과 마찬가지로 $b=0.29$, $c=51.7$, $d=2.46$ 그리고 $Re=14000$ 일때의 유동에 대한 결과이다. 실험결과는 수치해석(Fig. 2)에서와는 반대로 처음 반주기 동안 두 개의 반시계 방향의 와도가 형성되며, 두 번째 반주기 동안에는 한 개의 반시계방향 와도가 발생한다. 이러한 사실은 실험에서 캐버티 내부의 잔류유동의 회전 방향이 수치해석에서의 회전방향과 반대방향이라는 사실에 기인한다고 볼 수 있다. 사실 잔류유동의 회전방향은 시계 또는 반시계 방향 모두 가능하기 때문에 이러한 실험결과는 근본적으로 수치해석 결과와 일치한다고 볼 수 있다. 실제 실험에서도 미세한 초기조건의 차이에 따라 반대되는 유동양상이 발견 되었었다.

Fig. 6 (a), (b), (c)는 각각 $\gamma=2.7$, $\gamma=1$ 그리고 $\gamma=0$ 일 때 10주기 동안의 평균속도장을 나타낸 것이다. 세 가지 모두에서 바깥지역의 오른쪽에서는 반시계방향의 잔류유동이 존재하며, 왼쪽에서는 시계방향의 잔류유동이 존재한다. 또한 바깥지역의 유동형태는 (a)를 제외한 나머지는 비대칭적 유동을 보인다. 실험에서는 바깥지역의 유동을 조사하기 위하여 수면에 하나의 입자를 띄워 긴시간 동안 추적하여 입자의 궤적을 구하였다¹¹. 수치해석과 실험결과를 비교하면 캐버티 외부유동이 대칭적인

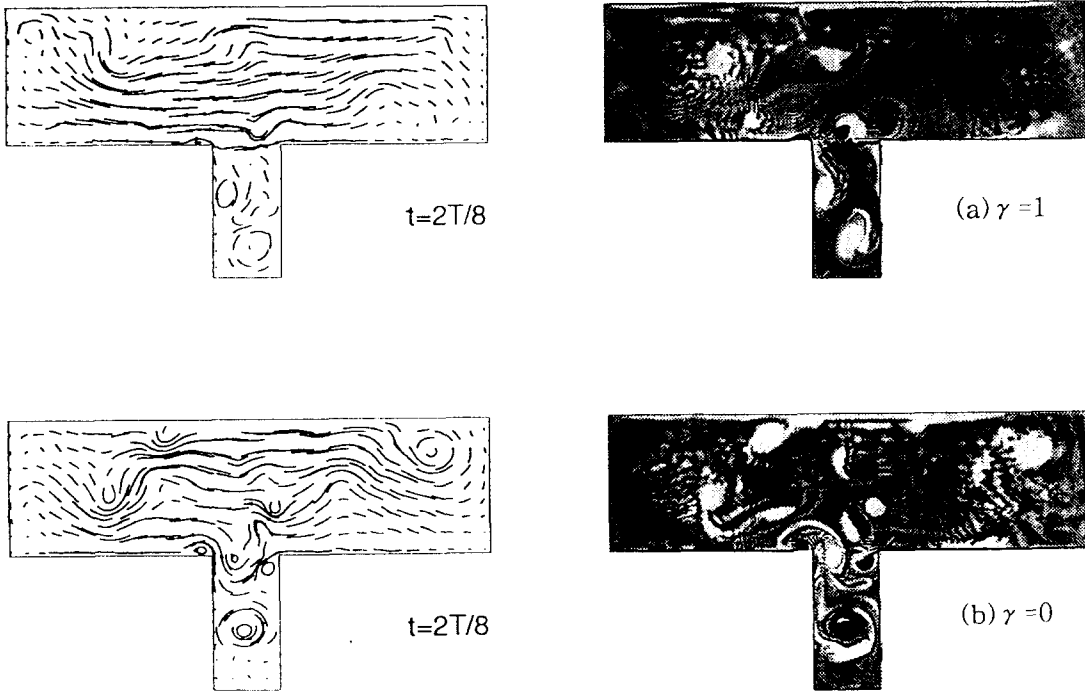


Fig. 4 Stream and vorticity plots ; (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 0$

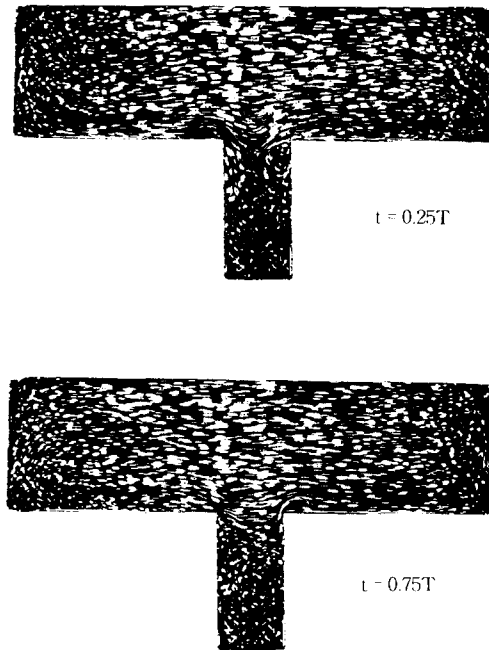


Fig. 5 Surface flow visualization

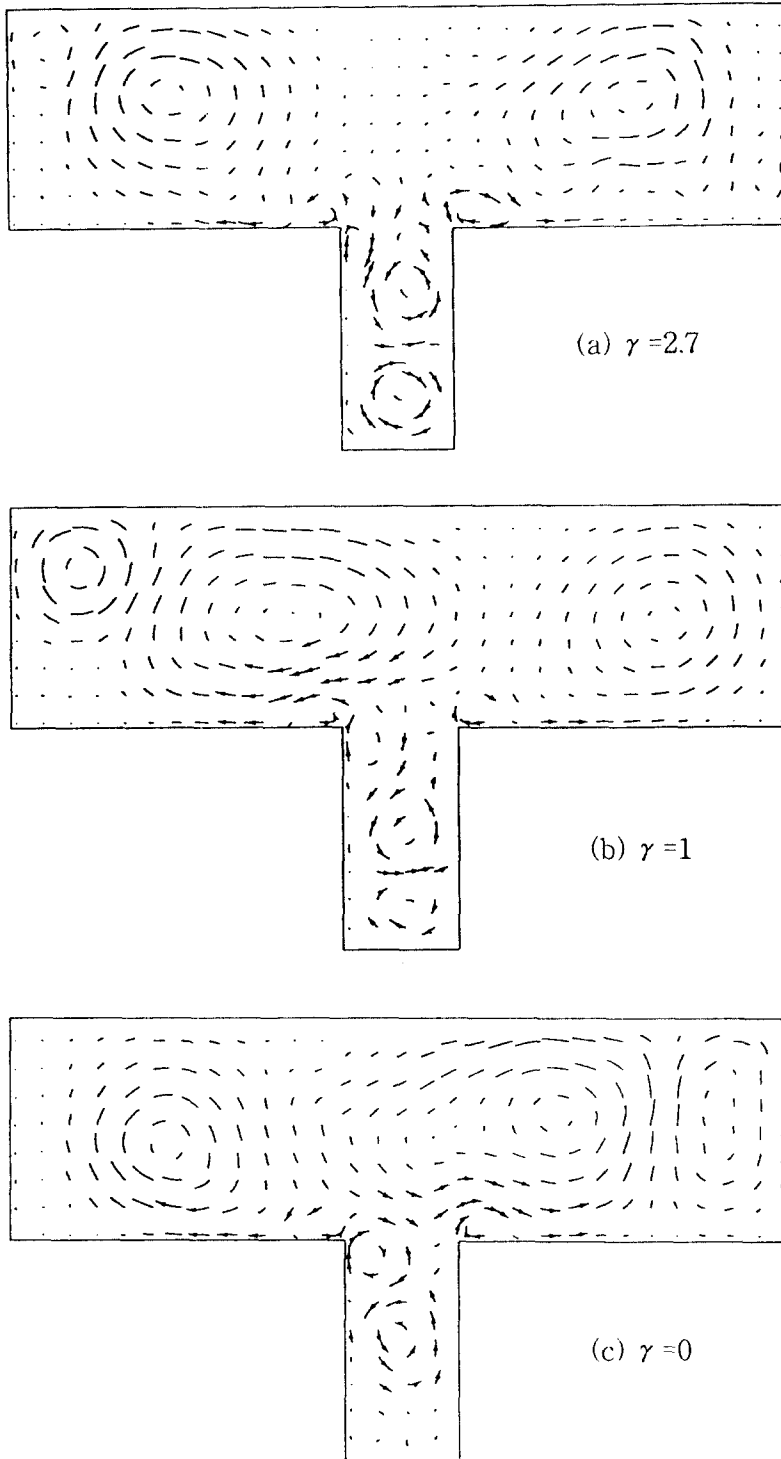


Fig. 6 Stream traces for the velocity field averaged for the 10 periods.

(a)가 가장 실험결과와 일치한다고 볼 수 있다. 이와 같이 실험과 수치해석에서 캐버티 외부에 대칭적인 느린 순환 유동이 존재하는 것을 알 수 있는데, 이러한 사실은 캐버티 외부에 설치되어 있는 3개의 벽면에 의하여 이러한 유동양상을 보인다고 할 수 있다. 그러나 실제 항만 같은 공간에서는 벽면이 존재하지 않으므로 캐버티 외부의 순환 유동은 존재하지 않을 것으로 추측된다. 그러므로 실제 유동모델과 유사한 결과를 얻기 위해서는 외부지역의 크기를 좀더 크게 할 필요성이 있으며, 이러한 모델에 대하여 지속적인 연구를 진행해야 한다고 생각된다.

4. 결 론

외부유동에 대한 얇은 직사각형 캐버티 내부의 유동에 대하여 수치해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 캐버티 외부의 주기적인 유동으로 인하여 캐버티 양쪽 모서리에서 와류들이 발생하며, 이 와류들은 캐버티 안쪽과 바깥쪽으로 이동하여 순환유동을 생성한다.
- (2) $\gamma=2.7$ 인 경우, 캐버티 바깥 지역에서 큰 한 쌍의 대칭적인 잔류유동이 생성되며, 이러한 물질전달 양상은 실험결과와 일치한다.
- (3) 동일한 유동모델에 대한 실험과 수치해석을 비교한 결과, 본 유동모델에 대한 예크만 분출 모델은 만족할 만하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지원('95 특정기초연구, 과제번호 95-0200-06)에 의해 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 서용권, 박준관, 문중춘, "외부유동에 의한 캐버티 내의 비정상 유동특성", 한국해양공학회지, 제10권 3호, pp 105-116, 1996
- 2) Soh, WH, and Goodrich, JW, "Unsteady Solution of Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comput. Phys.*, Vol 79, pp. 113-134, 1988
- 3) Iwatsu, R, Hyun, JM, and Kuwahara, K, "Numerical Simulation of Flows Driven by a Torsionally Oscillating Lid in a Square Cavity," *Trans. ASME. J. Fluids Engng.*, Vol 114, pp. 143-151, 1992
- 4) Iwatsu, R, Hyun, JM, and Kuwahara, K, "Numerical Simulation of Three-Dimensional Flows in a Cubic Cavity with an Oscillating Lid," *Trans. ASME. J. Fluids Engng.*, Vol 115, pp. 680-686, 1993
- 5) 서용권, "비정상 Navier-Stokes 방정식의 수치해석을 위한 다단계 외재법의 성능 비교", 대한기계학회논문집, 제21권 2호 pp. 105-116, 1996
- 6) 서용권, 문중춘, "직사각형 용기 내에서의 보텍스 웨딩에 의한 유동 및 교반특성", 대한기계학회논문집, 제17권 8호, pp. 2122-30, 1993