

외부유동에 의한 캐버티 내의 비정상 유동특성⁺

서 용 권* · 박 준 관** · 문 종 춘***

(96년 5월 7일 접수)

Unsteady Flow in a Cavity Induced by an Oscillatory External Flow

Yong-Kweon Suh* · Joon-Kwan Park** · Jong-Choon Moon***

Key Words : cavity(캐버티), unsteady flow(비정상 유동), mass transport(물질 전달), residual flow(잔류유동), asymmetric flow pattern(비대칭 유동 양상)

Abstract

In this paper, we report the experimental results for the flow pattern and the material transport around a cavity subject to a sinusoidal external flow at the far region toward the open side of the cavity. A tilting mechanism is used to generate a oscillatory flow inside a shallow rectangular container having a cavity at one side. The surface flow visualization is performed to obtain the unsteady behavior of vortices generated at two edges situated at the entrance of the cavity. It was found that at the period 4.5 sec., the behavior of the vortices is asymmetric, and there exists a steady residual flow in the cavity. The bottom flow patterns are also visualized. There are two regions outside of the cavity where the bottom fluid particles concentrate. The material transport in this flow model is very peculiar; fluid particles in the cavity flows outward through the passage along the walls starting from the edges, and particles in the outer region approach the cavity from the central region.

1. 서 론

본 연구는 직사각형 캐버티 내의 주기적 유동에 관한 실험적 연구이다. Fig. 1은 본 연구의 대상이 되는 유동 모형을 스케치한 것이다. x -방향으로

무한히 긴 수직 벽면(그림에서 "A")의 한 지역에 함유부(여기서는 캐버티(cavity)라 칭함; 그림에서 "B")가 있고, 벽면에 의해 한 쪽으로 갇혀 있는 유체가 x -방향으로 요동운동하고 있다. 이 때, 캐버티 내에는 주기적인 외부 유동의 교란에 의해 어퍼

+ 본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME95-B-03)에 의하여 연구되었음.

* 동아대학교 기계공학과

** 동아대학교 대학원

*** 동아대학교 생산기술연구소

한 유동이 형성된다. 본 연구는 이 유동을 가시화 실험의 방법으로 분석하고자 하는 것이다. 본 모형은 실제 연안에서 나타나는 유동현상을 단순화한 것이라 생각할 수 있다. 즉, 벽면 A는 해안선, 캐버티 B는 灣(bay)이나 항구에 해당하며, 외부의 요동운동 U_∞ 은 조류(tidal flow)에 해당한다.

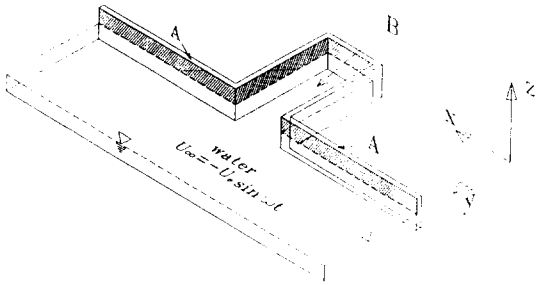


Fig. 1 Sketch of the present flow model.

본 연구의 목적은 크게 두가지이다. 첫째는, 본 연구를 통하여, 비정상 외력에 의해 유동이 어떻게 형성되며, 외력의 주 파라미터(여기서는 ω)의 변화에 따라 유동의 형태가 어떻게 달라지는지 이해하기 위함이며, 둘째, 본 연구 결과를 바탕으로, 실제 연안에서의 조류에 의한 물질 전달(mass transport) 특성을 이해하는 데 도움을 주기 위함이다.

위의 첫째 목적을 위해 지금까지 연구되어 온, 본 연구 모형보다 더욱 간단한 모형이 있다면, 그것은 Soh & Goodrich¹⁾ 그리고 Iwatsu 그룹^{2,3)}이 연구한 oscillatory-lid-driven-cavity 모형일 것이다. 이것은 위의 Fig. 1의 외부 유체 대신에 수직 평판을 캐버티에 부착시켜 그것을 x -방향으로 요동운동 시키는 형태이다. 그들의 연구는 2차원적 문제에서부터 출발하였다²⁾. 즉, 수직 방향의 유동 변화는 없는 것으로 가정한 것이다. 따라서, 그 유동 모형은 매우 단순하며, 또한 2차원 정상 유동의 표준모형이라 말할 수 있는 고전적 lid-driven-cavity 유동의 연장이라는 점에서 비정상 유동의 표준모형으로 생각할 수 있다¹⁾. Iwatsu 그룹은 최근 이 문제를 3차원적으로 확장하여 연구한 바 있다³⁾. 한편, 서⁵⁾는 Iwatsu 그룹의 2차원 유동모형을 더욱 높은 레이놀즈 수의 범위에서 수치해석한 결과, 비대칭 유동장이 형성되는 것을 발견하였다.

결과적으로, 유동장을 한 주기동안 평균화하면 시계방향 또는 반시계방향으로 회전하는 순환유동이 형성되는 것이다. 이것은 잔류유동에 해당하며, 서와 문⁶⁾ 및 문과 서⁷⁾가 실험 및 수치해석으로 제시한 잔류유동 그리고 서 등⁸⁾이 실험적으로 제시한 잔류유동과는 그 의미가 다르다. 왜냐하면, Iwatsu 그룹^{2,3)} 및 서⁵⁾의 유동모형에서 경계조건은 시공간적으로 대칭적이기 때문이다.

본 연구의 유동모형은 이와는 달리 완전히 닫힌 것이 아니라 한 쪽 면이 개방된 것이다. 본 연구에서는, 특별히, 개방된 쪽의 두 돌출부에서 와(vortex)들이 어떻게 형성, 성장, 유출(shedding) 및 이동하는지에 관심을 둘 것이다. 또한, 이에 따라 캐버티 내에는 어떠한 형태로 유동장이 형성되는지 조사할 것이다. 나아가, 캐버티 주위에 형성될 물질전달 특성을 파악하는 것을 목표로 하고 있다.

본 유동모형에 대한 연구결과는, 연안에 위치한 灣이나 항구에서 조수효과에 의해 형성되는 유동을 이해하는 데 도움이 될 것으로 생각된다. 실제로는, 우선 연안의 모양이 수평면 상에서 기하학적으로 복잡한 모양을 보일 것이며, 수심도 지역에 따라 상당히 다를 것이다. 또한, 실제 연안에서는 조수의 효과로 수면의 높이가 주기적으로 변할 수도 있다. 그러나, 가장 간단한 형태인 직사각형 구조에 가장 단순한 일정 수심의 조건에 대한 유동의 이해는 실제 유동의 이해에 중요한 밑거름이 될 것임은 분명하다.

2. 실험방법

Fig. 2는 실험용 tilting 기구와 그 위에 설치된 용기를 보여주고 있다. 전기 모터에 의한 회전이 cam bearing을 통해 왕복운동으로 바뀌고, 다시 회전축을 통해 회전요동운동으로 전환된다. 실험대에 물이 부분적으로 채운 용기(plexiglass로 제작)를 놓으면, 실험대의 tilting 운동에 의해 수위가 상대적으로 변동한다. 이러한 수위의 변동은 좌우 방향(즉 x -방향)의 유동을 유발하고, 이것이 외부 요동운동 U_∞ 에 해당하는 것이다. 캐버티를 중앙에 위치시킴으로써 외부 유동의 수위 변화는 거의 없는 것으로 하였다. 여기서, 만약 캐버티의 크기

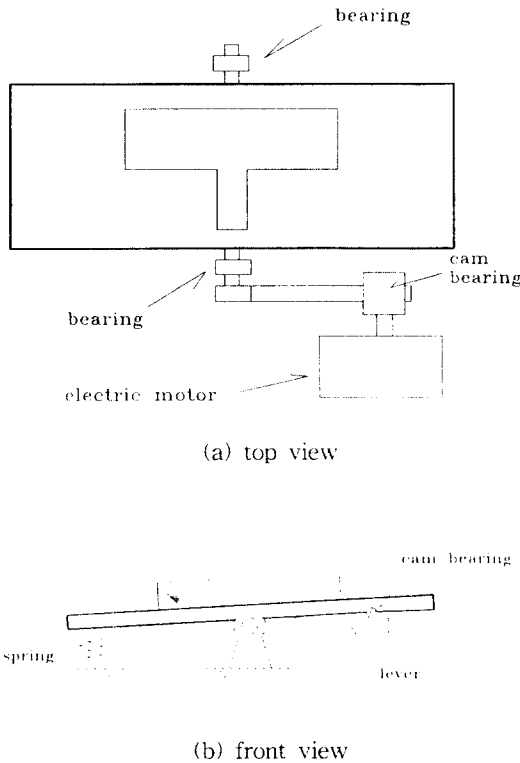


Fig. 2 Experimental apparatus.

가 탱크의 전체 크기에 비해 매우 작다면, 탱크 내의 유체의 운동은 x -방향으로 1차원적이며 그 속도분포는 탱크 끝 지점에서 0이고 중앙에서 최대가 되는 2차함수의 모양을 보인다. 그리고 수위의 변화는 두 끝 지점에서 최대가 되고, 중앙에서는 변화가 없다. 따라서, 캐버티에 비해 탱크를 크게 할 수록 앞에서 정의한 유동모형(Fig. 1)에 더 가까워진다.

Fig. 3은 실험용 용기를 스케치한 그림이다. 모든 실험은 $h=3\text{cm}$, $\Delta h=0.5\text{cm}$ 로 하였으며, 주기 T 를 4.5초, 6초, 그리고 9초로 변화시켰다. 또한 실험결과와 분석시에 구분을 위해 캐버티를 지역 ①과 ②로 나누었으며 ③지역은 캐버티의 “바깥지역”이라 칭한다. 물의 동점성 계수 $\nu=10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, 캐버티가 없다고 하였을 때 바깥지역 유동의 최대 속도 U_0 및 캐버티의 폭 w 를 기준으로 한 레이놀즈 수 $Re = U_0 w / \nu$ 는 $T = 4.5\text{초}$, 6.0초 및 9.0초

의 경우 각각 4000, 3000, 2000이다.

본 유동모형에서 중요한 무차원 파라미터는 앞에서 언급한 Re 외에, 외부유동의 무차원 진폭 δ (즉, 유체입자의 최대이동거리 l 을 w 로 나눈 것; $\delta = l/w$)과 스트로할 수 $S_r = w/(U_0 T)$ 이다. 본 실험에서는 $\delta = 0.583$, $S_r = 0.542$ 이다. 한편 예를들어 실제 항구가 $H=10[\text{m}]$, $U_0=0.1[\text{m/s}]$, $w=2000[\text{m}]$, $T=12[\text{hr}]$ 이면, $l = U_0 T / \pi = 1375[\text{m}]$ 이므로 $Re=2.0 \times 10^8$, $\delta=0.688$, $S_r=0.461$ 이다. 이 결과를 보면, Re 는 $O(10^3)$ 정도의 비만큼 다르나 δ 와 S_r 값은 같은 크기의 order를 가진다. 이로부터, 본 실험모형은 레이놀즈 수의 효과만 제외한다면 실제 유동과 상사척을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 본 실험연구의 Re 값이 실제 항구의 Re 값과 큰 차이가 있지만, 본 연구에서는 이 값의 차이에 따라 캐버티 내의 유동이 어떻게 달라지는지 우선 살펴보는데 첫째 목적을 두고 있다.

본 실험에서 진동수는 그렇게 넓은 범위로 취할 수 없다. 왜냐하면, 탱크의 수면 운동과 관계된 고유진동수를 피해야 하기 때문이다(공진이 발생하면 수위와 유체의 속도는 제어할 수 없을 정도로 증폭한다).

가시화실험은 그 목적상 크게 네가지로 나누어 수행하였다. 첫째는, 수면에 입자(polyethylene powder)를 많이 띄워 짧은 시간동안에 이들 입자가 지나간 자취를 사진촬영함으로써 유선을 구하였으며, 이로부터 보텍스의 형성, 유출 등에 대해 조사하였다. 둘째는 바닥에 염료를 일정한 간격으로 도포한 뒤, 장시간에 걸쳐 염료가 분산된 결과를 촬영함으로써 바닥에서의 평균 속도장을 가시화하였다. 셋째는 한 입자가 지나간 경로를 비디오로 촬영한 뒤, 영상처리용 상용 소프트웨어를 사용하여 한 주기마다의 입자의 위치를 100 주기 정도에 걸쳐 구하였다. 이 결과는 물질전달 특성을 파악하는 데 사용하였다. 마지막으로, 캐버티 입구지역에 입자를 집중적으로 띄운 뒤 시간의 경과에 따라 입자가 분산된 모양을 촬영하여, 역시 물질전달 특성을 파악하는 데 사용하였다.

3. 실험결과

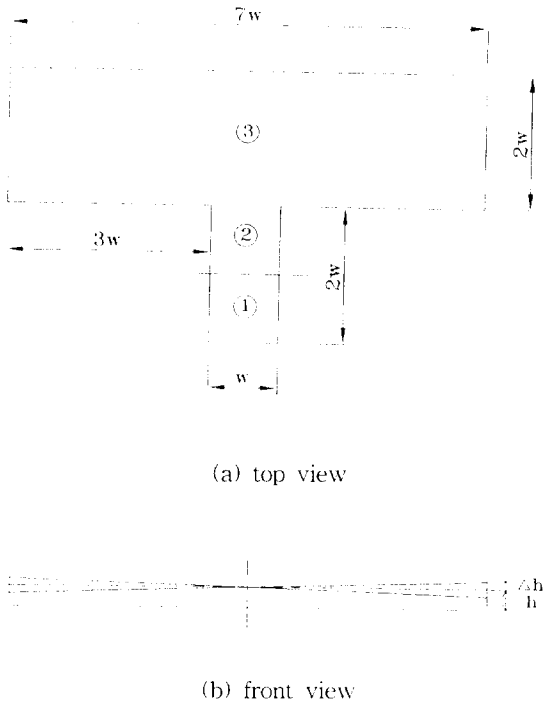
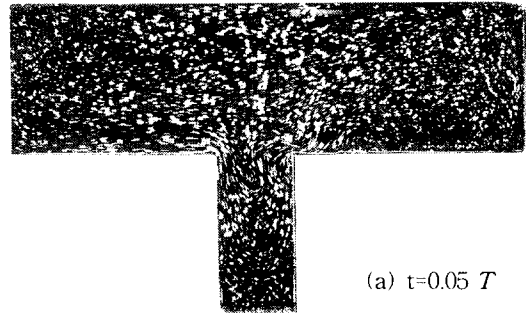


Fig. 3 Geometry of the experimental basin and the variation of the water level.

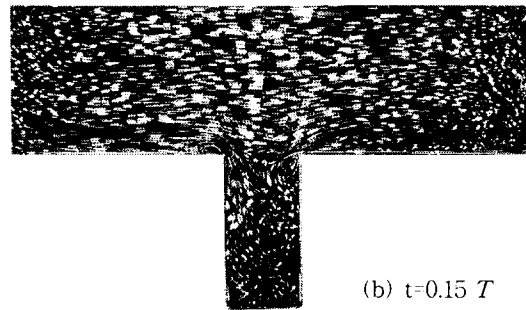
Fig. 4는 주기 T 가 4.5초일 때 시간 변화에 따른 자유표면 유동의 가시화 실험결과이다. 그림에서 t 의 값은 오른쪽의 수위가 가장 높을 때를 기준(즉 $t=0$)으로 한 것이다.

먼저, 바깥지역의 유동(앞으로는 “주류”라 칭함)의 방향이 왼쪽일 때(즉 오른쪽의 수위가 내려가고 있을 때 ; $0 \leq t \leq 0.5 T$), 두 개의 보텍스가 성장함을 알 수 있다. 하나는 캐버티 우측 모서리 끝에서 캐버티 안 쪽으로 성장하는 것이고, 다른 하나는 좌측 모서리 끝에서 캐버티 바깥쪽으로 성장하는 것이다. 전자는 $t=0.4 T$ 까지 벽면에 부착된 상태로 성장하다가 이후 유출한다. 이것은 캐버티 내로 침투하지 못하고 나머지 반주기 동안 바깥쪽으로 이동하여 소멸한다. 한편 후자의 보텍스는 $t=0$ 부터 좌측 모서리 끝에서 바깥쪽 방향으로 형성되어 성장하다가 주류의 방향이 바뀌기 시작하는 $t=0.5$

T 부터 유출한 뒤 외부유동에 휩쓸려 사라진다. 이 두 개의 보텍스는 벽면에 부착된 상태로 성장하다가 주류의 방향이 바뀌는 시점에서 유출하며, 이후 주류와 결합하여 소멸하는 공동된 특징을 보인다. 한편, 주류의 방향이 우측일 때 $t=0.5 T$ 때부터 캐버티 우측 모서리 끝에서 바깥쪽으로 형성되는 보텍스는 위에서 살펴본 두 보텍스의 거동과 별 차이가 없다. 그러나, 주류의 방향이 우측일 때 캐버티 좌측 모서리에서 캐버티 안 쪽으로 형성되는 보텍스는 이들과 다른 특징을 보인다. 이것은 주류의 방향이 우측인 대부분의 기간동안(즉 $0.5 T \leq t \leq 0.9 T$), 와류의 모양을 갖추지 않고 $t=0.9 T$ 때 캐버티 입구의 중심부에서 갑자기 형성된다. 이것은 그동안 좌측 모서리 표면에서의 시계방향의 와도(vorticity)가 전단층 유동을 따라서 흘러와서는 입구의 중심부에서 모였다가 어느 일순간에 와류(vortex flow)의 형태로 나타난 것으로 생각된다. 이 와류의 일부는 캐버티 내로 진입하여 내부의 시계방향의 순환유동을 유지시킨다.



(a) $t=0.05 T$



(b) $t=0.15 T$

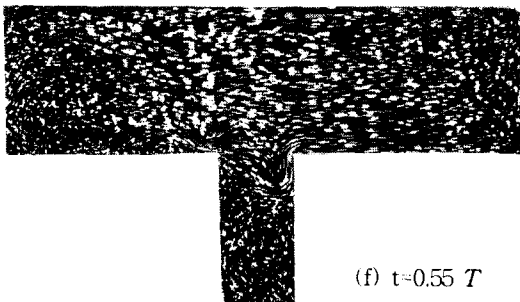
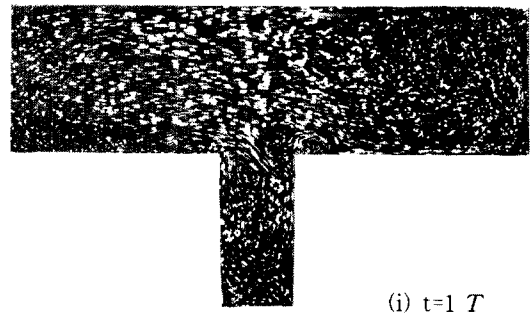
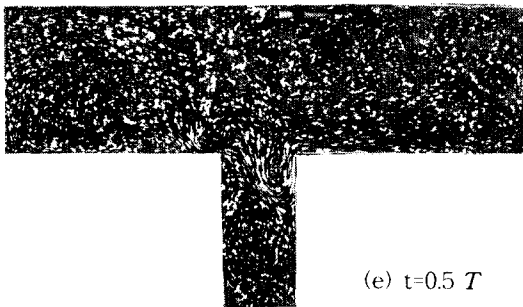
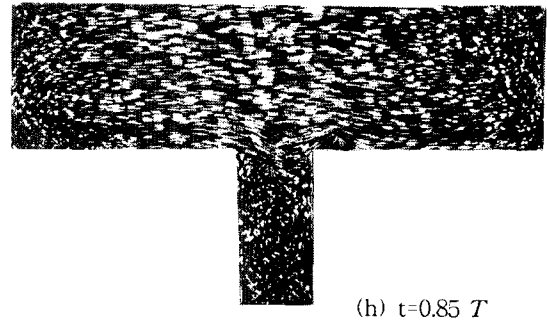
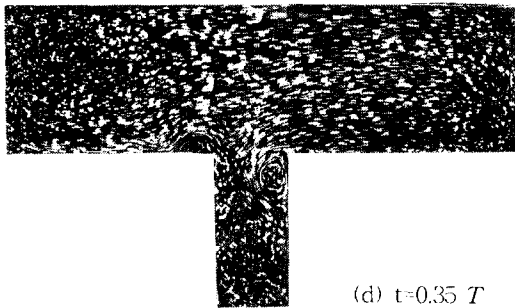
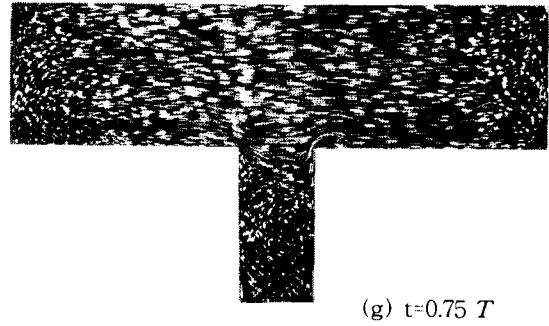
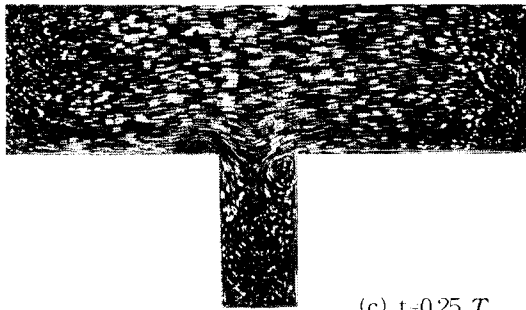


Fig. 4 Surface flow visualization at $T=4.5\text{sec}$.

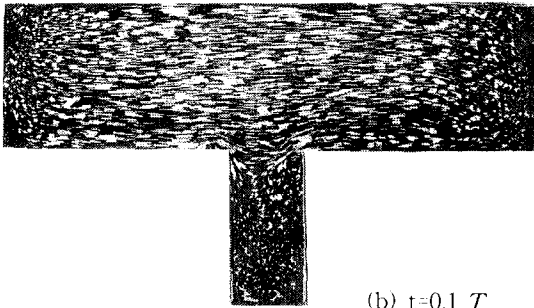
여기서, 좌측 모서리에서 캐버티 안쪽으로 보텍스가 측면벽에 부착되지 못한 것은 결국 캐버티 내부의 잔류 순환유동의 영향 때문이며, 그 결과로 형성된 보텍스의 일부가 캐버티 내로 침투하였기 때문에 내부의 잔류 순환유동이 형성된 것으로 파악된다. 이렇게 본다면, 내부의 잔류유동 형성과 좌측 모서리에서 캐버티 안쪽에서의 와도의 움직임

임 및 형성은 상호 보완의 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다.

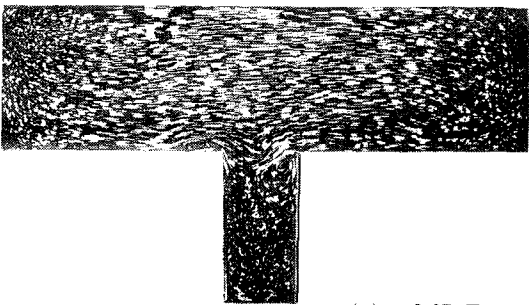
한편, 이 실험에서 실험도중 내부의 유동방향을 반시계방향으로 강제로 바꾸어 주었을 때, 잔류유동은 이 후 반시계 방향을 유지한다.



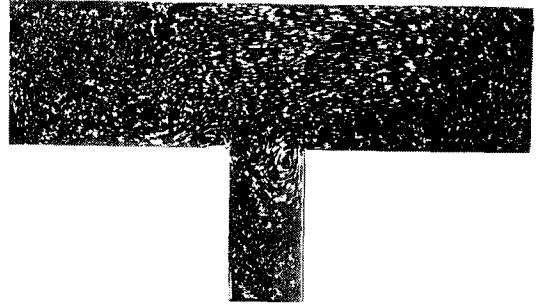
(a) $t=0$



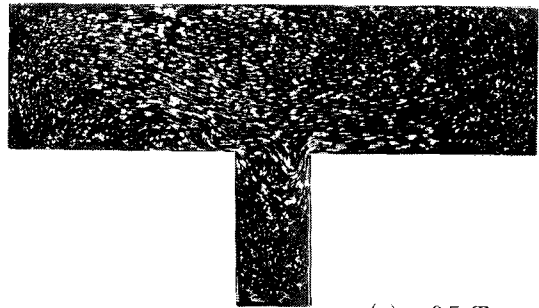
(b) $t=0.1 T$



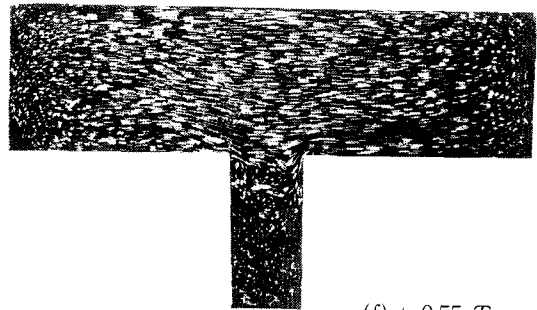
(c) $t=0.25 T$



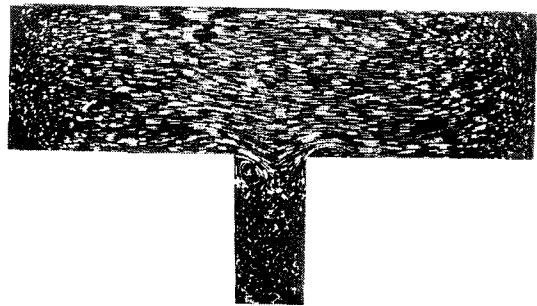
(d) $t=0.35 T$



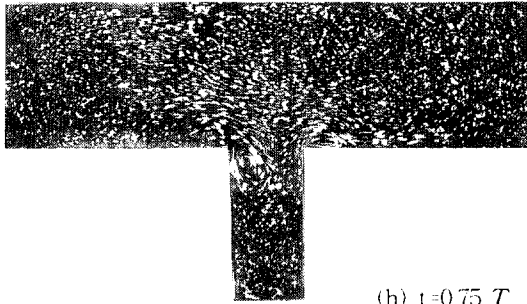
(e) $t=0.5 T$



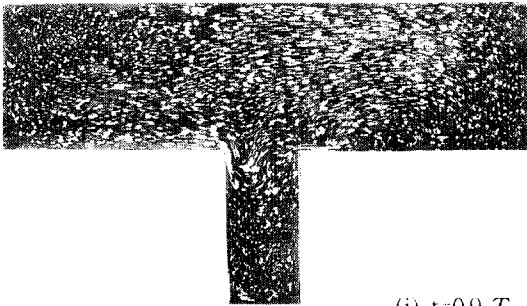
(f) $t=0.55 T$



(g) $t=0.65 T$



(h) $t=0.75 T$



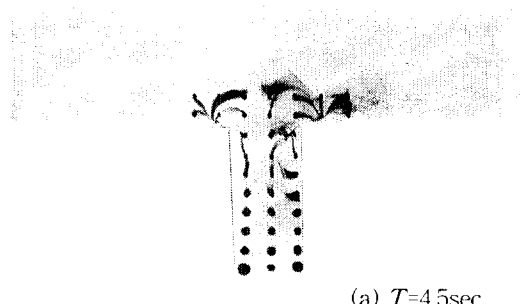
(i) $t=0.9 T$

Fig. 5 Surface flow visualization at $T=9\text{sec}$.

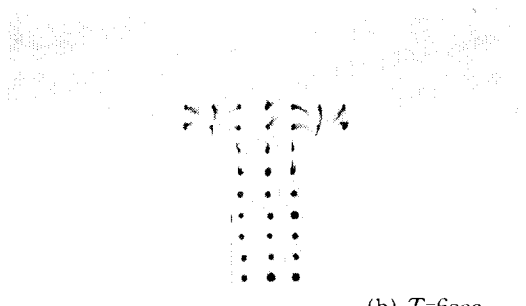
Fig. 5는 $T=9$ 초일 때의 경우이다. Fig. 4와 비교하면 우선 캐버티 내부의 잔류유동에 의한 순환 유동은 거의 관찰되지 않고 있음을 알 수 있다. 또한, $T=4.5$ 초의 경우와 달리, 주류의 방향이 좌측일 때의 유동양상과 우측일 때의 유동양상은 대칭 구조를 이루는 것을 알 수 있다. 즉 모서리의 좌우측에서 캐버티 안쪽으로 형성되는 보텍스는 모두 벽면에 부착된 뒤 유출하는 양상을 보인다.

한편 $T=6$ 초의 경우는 $T=9$ 초의 경우와 유사하였다.

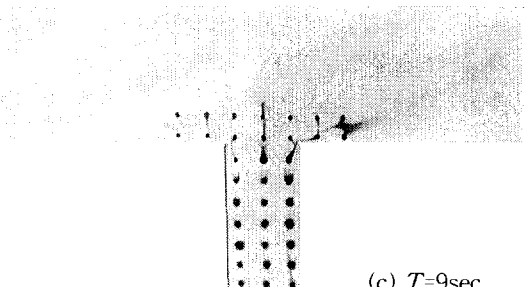
Fig. 6은 바닥에 물감을 일정한 간격으로 도포한 뒤 바닥의 평균 속도장을 가시화 한 것이다. 이를 스케치한 것이 Fig. 7이다. 이것은 바닥에서의 정상유동에 해당하며, 바닥 가까이의 얇은 경계층 효과로 인해 나타난 것으로 볼 수 있다. 여기에서 보는 바와 같이 바닥에서의 유동은 캐버티 바깥쪽 모서리 부근으로 집중되고 있다. 우측 모서리에서는 우측으로 좌측 모서리에서는 좌측으로 각각 약간



(a) $T=4.5\text{sec}$



(b) $T=6\text{sec}$



(c) $T=9\text{sec}$

Fig. 6 Flow visualization on the bottom surface.

씩 이동한 지점에서 유동이 집중되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 시간 평균적으로 보면 이 지점이 보텍스의 중심이 되기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 좌우측 모서리의 안쪽으로도 보텍스가 형성되었지만 이 지역은 캐버티 내의 지역으로서 유동의 방향도 바깥쪽보다 훨씬 자주 바뀌기 때문에 (Fig. 4 및 Fig. 5 참조) 바닥에서 유동이 집중되는 효과가 더 미약하지 않나 생각된다. 한편, 캐버티 내의

바닥 유동은 ① 지역(①지역은 Fig. 3에서 표시)으로 갈수록 미약하다.

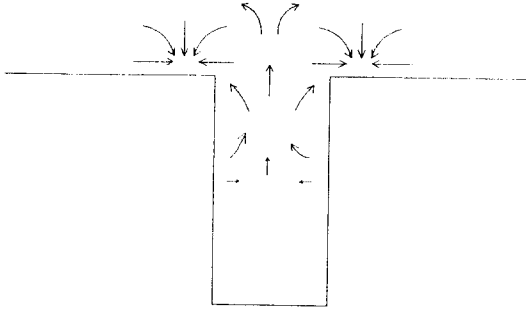


Fig. 7 Sketch of the mean velocity field around the cavity at the bottom.

바닥에서의 유동이 집중되는 지점은 침전물이 집중되는 지점으로 생각할 수 있다. 이 결과는 조류효과가 지배적인 사각형 모양의 만이나 항구에도 적용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 이 지점에서는 상승하는 미약한 유동이 존재하며 이로 인해 주위 유동장을 3차원적으로 만들 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 각각 $T=4.5$ 초, 6초, 그리고 9초일 때, 표면에 하나의 입자만을 띄워 $t=0, T, 2T, \dots, 100T$ 에서의 이 입자의 위치를 나타낸 그림이다.

$T=4.5$ 초의 경우인 Fig. 8(a)에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 캐버티에서 잔류 순환유동이 존재하기 때문에 초기에 캐버티 내에 있던 입자는 순환 유동을 따라 시계방향으로 회전한 후 캐버티를 빠져나간다. 이후 입자는 좌측 지역에서 시계방향의 순환운동을 한다. Fig. 8(b)에서는 초기에 캐버티 바깥쪽 중앙에 있던 입자가 캐버티 쪽으로 와서는 바깥 좌측 지역으로 나아가서 시계방향의 순환운동을 한다. Fig. 8(c)에서는 초기에 바깥 좌측 지역에 있던 입자의 운동인데 결과는 Fig. 8(b)와 유사하다. Fig. 9는 $T=6$ 초의 경우이다. Fig. 9(a)에서

는, 초기에 캐버티 내에 위치한 입자가 캐버티 입구 지역에서 혼돈적 거동을 보이다가 바깥 좌측 지역으로 가서 시계방향으로 한 바퀴 회전한 뒤 우측 지역으로 나아간다. Fig. 9(b)는 Fig. 8(c)와 비슷한 위치인 바깥 좌측 중앙부분에서 출발하여 시계방

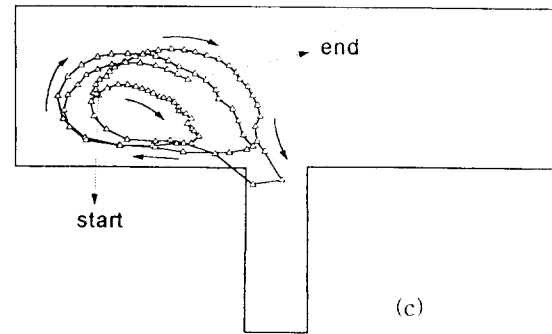
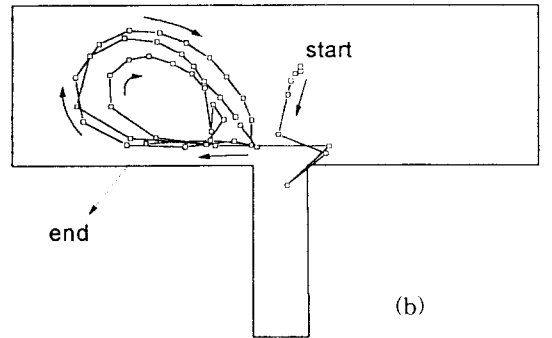
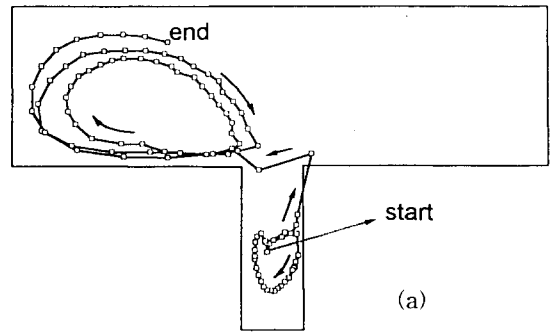


Fig. 8 Trajectory of a particle marked at $t=0, T, 2T, \dots, 100T$ for $T=4.5$ sec.

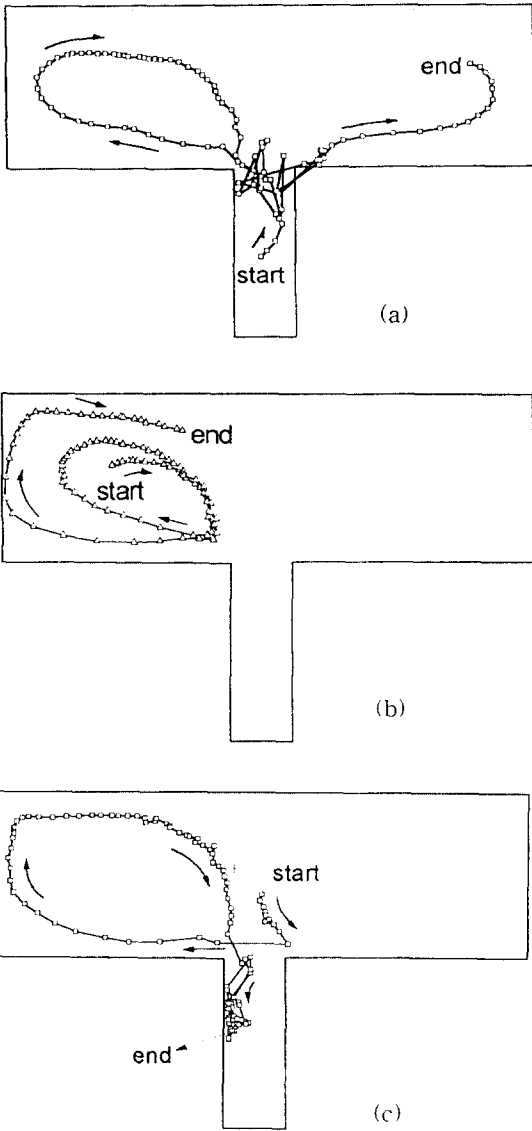


Fig. 9 Trajectory of a particle marked at $t=0, T, 2T, \dots, 100T$ for $T=6\text{sec}$.

향으로 순환한다. Fig. 8(c)와 비교해보면 좀 더 느리게 순환하는 것을 알 수 있는데 이는 $T=6$ 초의 경우가 $T=1.5$ 초에 비하여 전체적으로 유동이 느리기 때문이다. Fig. 9(c)에서는 바깥 중앙부위에서 출발한다. 이 입자는 우측으로 쏠리다가 다시 좌측

으로 빠르게 이동한 후 시계방향으로 한바퀴 순환해서 캐버티로 들어간다. 캐버티로 유입된 입자는 좌측 벽면 근처에서 구속되어 있다.

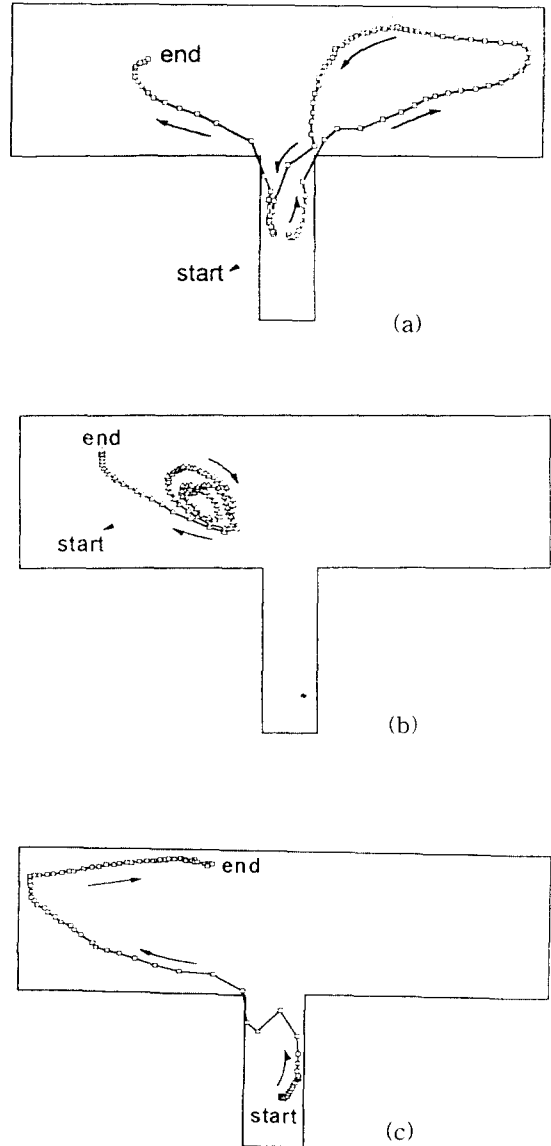


Fig. 10 Trajectory of a particle marked at $t=0, T, 2T, \dots, 100T$ for $T=9\text{sec}$.

Fig. 10(a)에서, 입자의 초기 위치와 초기유동의

방향은 Fig. 9(a)와 유사하지만, 혼돈영역에서 바깥 우측 지역으로 나가서 반시계방향으로 순환한 후 다시 캐버티로 유입되고 혼돈영역을 지나 바깥 좌측으로 나아간다. Fig. 10(b)는 바깥의 좌측 중앙부분에서 시작되는데 비슷한 지점에서 출발하는 Fig. 8(c)나 Fig. 9(b)와 다른 점은 초기 출발점을 중심으로 어느 정도의 구속된 상태로 순환하다가 어느 순간 구속된 상태를 벗어나 좌측 지역에서 큰 순환운동을 한다. Fig. 10(c)는 캐버티 내에서 출발하는데 캐버티 내의 우측 벽면 근처를 따라 유동하면서 우측의 바깥쪽으로 나아가지 않고 좌측으로 꺾여 바깥으로 나가서 바깥 부분에서 느리게 순환하고 있다.

어느 지역으로 갈 지 예측할 수 없다. ㉔ 지역에서 느린 순환운동($T=4.5$ 초의 경우)을 하다가 ㉓ 지역에 들어가면 ㉑ 또는 ㉒ 지역으로 나아간다. 따라서, 캐버티 내에 오염물질이 있다면, 이는 ㉑ 또는 ㉒ 지역으로 빠져나가고 ㉓ 지역으로부터 새로운 물이 들어온다고 볼 수있다. 이와같은 물질전달은 ㉔ 지역에서의 순환 유동이 클수록 활발할 것으로 예상된다.

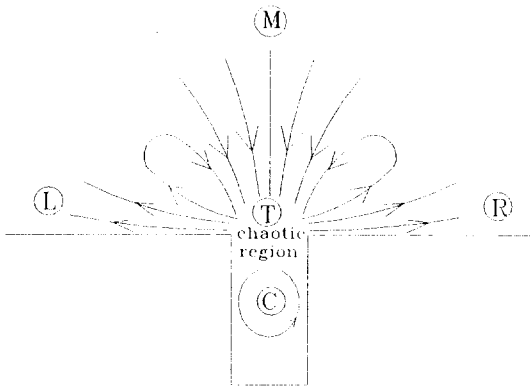
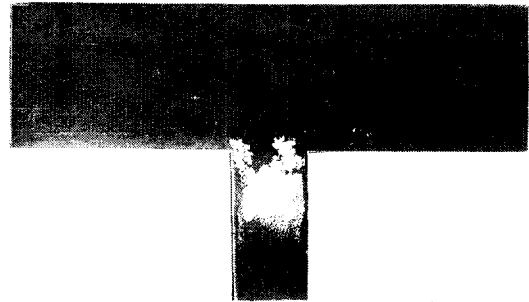
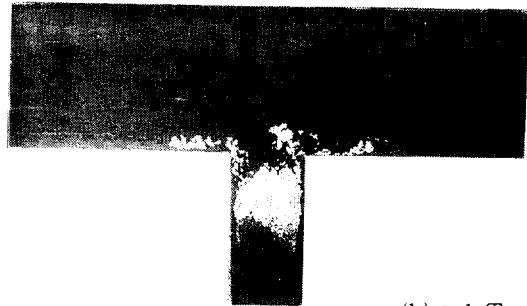


Fig. 11 Sketch of the steady residual flow around the cavity.

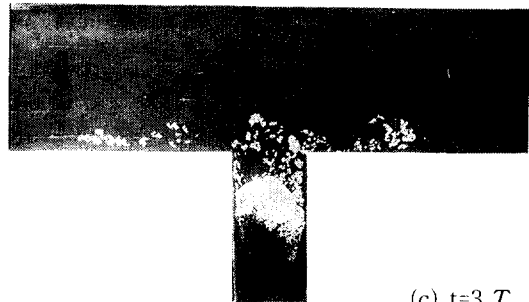
Fig. 11은 Fig. 8~10의 결과를 종합하여, 캐버티 주위의 정상유동을 스케치한 것이다. 실험결과인 Fig. 8~10은 바깥지역을 봉쇄하는 3개의 벽면이 존재하기 때문에 바깥지역에서 입자는 순환운동을 하는 것으로 나타났으나, 실제의 경우로서 이 3개의 벽면이 존재하지 않는 경우에는 Fig. 11과 같이 될 것으로 예측된다. 여기서, "chaotic region" ㉓는 입자의 경로를 예측할 수 없는 혼돈지역을 말한다. 유체입자는 ㉓ 지역에서 캐버티쪽으로 접근한다. 만약 ㉓ 지역을 거친다면 ㉑, ㉒, ㉓의 세 지역 중



(a) $t=0$



(b) $t=1 T$



(c) $t=3 T$

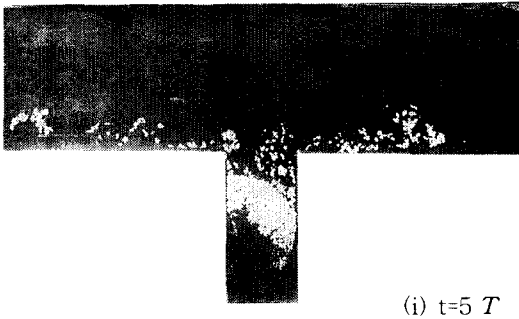


Fig. 12 Dispersion of particles around the cavity for $T = 4.5$ sec.

Fig. 12는 초기에 캐버티 입구 지역에 많은 입자를 띄운 뒤 주기마다 그 입자들이 분산된 모양을 촬영한 결과이다. 그림을 보면, 앞에서 예측한 대로 캐버티 내의 입자들은 입구 쪽에 있는 두 모서리를 출발하여 벽면을 따라서 바깥 지역으로 분산됨을 알 수 있다. 그림에서는 나타나지 않지만, 캐버티 내의 물질이 이렇게 바깥으로 빠져나가는 동안 입구의 중심부를 통해서 바깥의 유체가 공급됨을 짐작할 수 있다.

본 연구는 δ 와 S_1 가 고정되고 Re 가 변할 때의 실험적인 결과이며 차후에는 δ 와 S_1 가 변할 때의 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 한 쪽이 개방된 캐버티에서, 개방된 쪽의 외부 유체가 왕복요동운동하는 경우에 캐버티 및 그 주위에 형성되는 유동의 특징과 이에 따른 물질전달 특성을 실험적으로 파악하였다. 캐버티 내외의 평균 수심을 일정하게 하고 요동운동의 주기를 달리 하면서 실험한 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 외부유동 즉 주류의 요동운동 주기가 4.5초 ($Re=4000$)일 때, 캐버티의 모서리 부근에서 생성된 보텍스는 캐버티 내부에 시계방향 또는 반시계방향의 순환유동을 발생시키고, 이로 인해 모서리에서 생성, 성장 및 유출하는 보텍스의 거동도 좌

우 측에서 서로 다른 비대칭의 양상을 보인다.

(2) 주류의 요동운동 주기가 6초 ($Re=3000$) 및 9초 ($Re=2000$)인 경우에는 캐버티 내부의 순환 유동은 거의 나타나지 않고, 모서리에서의 보텍스 거동도 좌우가 대칭인 양상을 보인다.

(3) 캐버티 주위의 바닥에서의 정상유동은 우측 모서리에서는 우측으로 좌측 모서리에서는 좌측으로 각각 약간씩 이동한 지점에서 유동이 집중되는 양상을 보인다. 바닥의 유동이 집중되는 지점은 침전물이 집중되는 지점과 동일하다고 볼 수 있으며, 이 결과는 조류의 효과가 지배적인 사각형 모양의 만이나 항구에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

(4) 표면에 하나의 입자만을 띄워서 그 궤적을 추적한 결과 그리고 캐버티의 입구지역에 많은 입자를 띄워 그 분산을 가시화한 결과, 입자는 캐버티 바깥의 중앙부에서 캐버티 쪽으로 접근하며 좌우측 모서리에 연한 벽면을 따라서 바깥으로 나아간다. 캐버티의 입구 지역에서는 그 궤적을 예측할 수 없는 혼돈적 거동을 보인다.

(5) 캐버티 내부와 외부와의 물질전달은 레이놀즈 수의 증가에 따른 캐버티 내부의 순환유동의 정도에 비례하여 활발하다.

참 고 문 헌

- 1) Soh, W.H. and Goodrich, J.W., "Unsteady Solution of Incompressible Navier-Stokes Equations", *J. Comput. Phys.*, Vol. 79, pp. 113-134, 1988
- 2) Iwatsu, R., Hyun, J.M. and Kuwahara, K., "Numerical Simulation of Flows Driven by a Torsionally Oscillating Lid in a Square Cavity", *Trans. ASME J. Fluids engnrg.*, Vol. 114, pp. 143-151, 1992
- 3) Iwatsu, R., Hyun, J.M. and Kuwahara, K., "Numerical Simulations of Three-Dimensional Flows in a Cubic Cavity with an Oscillating Lid", *Trans. ASME J. Fluids*

- Engnrg.*, Vol. 115, pp. 680-686, 1993
- 4) Hyun, J.M., "Unsteady Buoyant Convection in an Enclosure", *Advances in Heat Transfer.*, Vol. 24, pp. 277-320, 1994
 - 5) 서용권, "비정상 Navier-Stokes 방정식의 수치 해석을 위한 다단계 외재법의 성능비교", 대한기계학회 제출, 1996
 - 6) 서용권, 문중춘, "보텍스 웨딩에 의한 얇은 직사각형 통내에서의 유동특성", 대한기계학회 논문집, 제17권 제8호, pp. 2122-2130, 1993
 - 7) 문중춘, 서용권, "직사각형 용기 내에서의 유동 및 교반 특성 - 중앙평판 길이의 영향", 대한기계학회 논문집, 제18권 제10호, pp. 2698-2705, 1994
 - 8) 서용권, 문중춘, 강종대, "조석효과에 의한 항구모델 주위의 유동 및 물질전달에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회지, 제10권 제1호, pp. 100-107, 1996