

# CFD에 의한 2차원 채널캐비티의 발달유동특성에 관한 연구

김 만 응<sup>1)</sup>, 李 英 浩<sup>2)</sup>

## A Study on Developing Flow Characteristics of Two-Dimensional Square Channel Cavity by CFD

Mann-eung Kim, Young-Ho Lee

### Abstract

The time dependent Navier-Stokes equations are numerically solved for two dimensional incompressible viscous flow in a square channel cavity driven by plane Poiseuille flow. The momentum equations are solved by using the Marker and Cell method by interpolating the coordinates of conservative centered difference formulae on irregular staggered meshes.

Computation is carried out for five kinds of Reynolds number,  $10^4$ ,  $3 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $7 \times 10^4$  and  $10^5$ .

Initial flow characteristics show movement of main vortex into the geometric cavity center and growth process of higher order vortices at the corners. Especially, high Reynolds number flow shows sheared mixing layer between two colliding flow regions and spatial pressure distribution at the region is periodic due to the developed mixing layer vortices.

The results imply that the square channel cavity driven by plane Poiseuille

1) 한국해양대학교 기계공학과 석사과정 열·유체전공

2) 한국해양대학교 이공대학 기계공학과 교수

flow exhibits simple flow characteristics compared with the lid-driven cavity flow.

## 제 1 장 서 론

산업사회의 발달과 더불어 인간은 더욱 넓고 쾌적한 환경을 필요로 하고 있으나 인구의 급격한 팽창과 도시집중화로 인하여 생활 공간은 고층화, 밀집화되고 있다. 이러한 측면에서 보면 도시형 공간, 즉 캐비티와 같은 사각공간내에 신선한 공기를 공급하고 실내에서 발생된 오염물질을 밖으로 배출하는 것은 보다 건강하고 쾌적한 실내환경조성을 가능하게 할 것이다. 공학적인 측면에서 보면 터빈 축의 밀봉 등에 사용되는 래버린스 시일장치의 내부구조 또는 피스톤의 홈 등의 내부구조, 기어펌프의 케이싱과 회전기어의 틈새 사이의 유동, 선박의 파이프라인에 접합된 스플피스 근처의 형상 또는 해수흡입상(sea chest) 등이 이와 같은 캐비티의 형태를 가진다. 이러한 공조시스템의 환기구조나 기계류의 캐비티의 구조는 대부분 상부의 일부분에 입출구가 있으며 이 부분의 유동으로 인해 내부에 전단응력이 공급되고 있다. 이 경우 캐비티 내부의 유동 특성에 따라 공조시스템의 경우에는 특정 영역에서 환기가 불충분해 질 수가 있으며 파이프 중간에 스플피스를 삽입한 경우에는 와류에 의한 부식진행 등의 문제점이 유발된다. 이러한 내부의 유동 형태는 입구부분의 높이 또는 형상에 의하여 영향을 받을 수 있고 이러한 문제점을 해결하기 위하여 입출구가 있는 캐비티 내부의 유동특성을 연구할 필요가 있다.

캐비티는 앞에서 언급한 것과 같이 공학적인 유용성 때문에 실험적으로 혹은 수치해석적으로 많은 연구가 진행되었으며 벨트 등에 의하여 전단응력을 공급받는 밀폐캐비티의 유동장과 상부의 채널흐름에 의하여 전단응력을 공급받는 구조의 채널캐비티가 있다.

2차원 정방형 채널캐비티는 캐비티의 한쪽 면이 개방되어 있는 채널흐름과 이 채널흐름에 의해서 전단응력을 공급받는 정방형 캐비티와의 복합유동장으로 정의할 수 있다. 일반적으로 복합 유동장의 수치계산은 경계조건이나 격자생성이 비교적 까다로운 것으로 알려져 있다. 이러한 채널캐비티에 대해서는 실용적인 유동

장을 대상으로 연구가 진행되어 왔다.

Aidun<sup>1)</sup>은 얇은 박막 코팅공정을 대상으로 실험적 고찰을 행하였다. 이때의 대상유동장은 스펀방향으로 종횡비가 1:3이고 변장비는 1:1의 채널 캐비티이며 내부에 롤러와 함께 작은 량의 흐름이 유동장을 관통하는 경우에 모서리부의 와류 특성을 고찰한 결과를 제시하고 있다.

Kimura<sup>2)</sup>등은 해안의 사수역(dead zone area)을 채널캐비티로 가정하고 이를 단순화한 실험 및 수치해석을 행하여 경계영역에서 비정상적인 전단혼합층이 존재함을 보고하였으며 이 부분에서 와류의 발생 및 유속변동이 매우 큼을 나타내고 있다. 그러나 실험과 수치해석의 결과가 다소 상이한 점이 지적될 수 있다.

Husher 와 Biringen<sup>3)</sup>는 덮개구동이 아닌 자유표면을 갖는 전단 구동에 의한 정방향 캐비티흐름을 엇갈림 격자 상에서 차분법 및 시분할법(time-splitting method)을 채택하여 시공간에 대하여 2차정도를 갖는 스킴을 택하고 80×80의 부동간격격자에서  $Re=3 \times 10^4$ 까지의 계산을 수행하였다. 이 때의 상부의 경계는 공기 흐름으로 인한 전단속도구배를 갖는 자유표면이다. 계산결과 모서리 영역에서 비정상적으로 발생하는 다수의 와류를 제시하고 있으나 적용된 계산기법의 해상도와 관련하여 보다 체계적인 검토가 필요하다.

조<sup>4)</sup>는 레버린스 패키징을 단순화하여 입방형 채널캐비티에 대하여 PIV기법을 사용하여 실험을 행하였다. 그 결과 상부의 평면 Poiseuille흐름에 의해 구동되는 캐비티유동은 내부에 강제와류 형태의 주와류가 존재하며 모서리부분에서 2차와류와 고차의 작은 에디가 발생하고 있음을 채널캐비티에서의 독특한 유동현상으로 설명하고 있다. 그리고 구동류와 내부의 주와류가 충돌하는 영역에서 전단혼합작용이 발생하여 압력 및 속도분포의 변동이 심한 결과를 보여주고 있다. 그러나 실험기법상 스펀방향의 종횡비가 1:1로서 3차원 유동이 심하여 본 연구와의 직접적인 비교가 곤란한 점이 지적될 수 있다.

본 연구에서는 채널캐비티에 있어서 유입흐름을 2차원의 평면 Poiseuille 흐름으로 가정하고 평균속도를 대표속도로 하여 유동장에 전단응력이 공급되도록 하였다. 그리고 캐비티 내부유동 특성을 수치해석에 의해 고찰하고자 하였다.

초기발달 유동특성은 수치해석에서 매우 중요한 위치를 점하고 있으며 안정된 계산수행 및 유동예측을 위하여 반드시 검토되어야 한다. 따라서 대상유동장에 대하여 내부 유동이 완전히 발달하기 까지의 과정에 대하여 수치적으로 연구하였다. 채택한 레이놀즈수는  $10^4$ ,  $3 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $7 \times 10^4$  및  $10^5$ 의 다섯 경우이다. 상부 캐

널의 높이는 캐비티의 대표길이(H)에 대하여  $1/20H$ 이다. 계산방식으로는 SOLA알고리즘을 이용하여 NS방정식을 직접 차분화하였으며 모서리부분의 고차와류의 유동특성을 확인하기 위하여 모서리에서의 해상도를  $1/400H$ 로 한 엇물림 격자(staggered grid)상에서 MAC의 보존형 중심차분의 변수를 내분의 원리에 의해 보간하는 방법<sup>5,6)</sup>을 이용하였다. 즉, 부등간격을 고려한 1차선형 내삽방법으로 검사면적의 운동량 플럭스를 계산하였으며, 압력항 및 점성항에 관해서도 부등간격 배치를 고려하여 보정을 행하였다.

계산결과 2차원 평면 Poiseuille 구동류에 의한 캐비티의 초기유동은 밀폐캐비티에 비하여 비교적 빠르게 안정 될 뿐만 아니라 유동장의 형태도 비교적 단순화된 형태가 관찰되었다.

초기에 발생한 전단혼합층도 레이놀즈수의 증가에 따라 다르나 그 크기가 빠르게 축소 변화하여 일정위치에 나타나는 결과를 보였다. 또한  $Re=3 \times 10^4$  부근에서 전단혼합층이 뚜렷하였으며 모서리 영역에서 비정상특성이 나타나기 시작하였다.

캐비티 유동은 강제와류 형태의 제1와류가 존재하였으며 덮개 구동의 경우에서와 같이 구동류에 의한 전단응력의 일부분이 제1와류를 가속시키기 위한 회전 에너지로 전환되는 경향을 나타내었으며 제1와류의 형상은 밀폐캐비티보다 변동 특성이 훨씬 완화된 경향을 나타냈다. 그리고 캐비티 구동류와 제1와류가 충돌하는 캐비티 상부에서 전단혼합작용이 발생하는 영역이 발견되었으며 이 부분에서 압력 및 속도분포의 주기적인 변동을 관찰할 수 있었다. 또한 레이놀즈수  $10^5$ 에서 모서리 영역에서 특이한 박리유동특성 및 비정상특성이 뚜렷히 관찰되었다.

## 제 2 장 수치해석

Navier-Stokes방정식은 연속체 유동 중 어느 한 점을 중심으로 질량보존 및 운동량을 표현하는 편미분형태의 지배방정식이다. 압축성, 비정상, 점성흐름에 대하여 Euler의 직각좌표계상의 2차원 운동방정식과 연속방정식을 보존형으로 나타내면 식(2.1), 식(2.2) 과 식(2.3)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot v}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.3)$$

차원이 있는 물리량 ( $x, y, t, u, v, p$ )을 대표길이  $L$ , 대표속도  $U$  및 유체의 밀도  $\rho$ 를 이용하여 무차원화하면 식(2.4), 식(2.5) 과 (2.6)이 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot u}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial u \cdot v}{\partial x} + \frac{\partial v \cdot v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.6)$$

Navier-Stokes 방정식과 연속방정식을 이산화하는 방법으로서 차분법이 주로 사용되고 있으나, 특히, 이 방정식의 비선형성에 따른 반복과정에서의 안정성과 수렴성이 문제가 되어 이를 해결 하기 위한 많은 알고리즘이 제안되고 있다. 유동상에 따라 최적의 방법이 다르나, 보통, 유한차분의 형이 보존형(conservation form)을 갖추며, 반복과정에서 적당한 보정량이 쉽게 얻어지고 있어 바람직하다.

본 연구에서는 속도 및 압력을 이용한 ( $u, v, w, p$ ) 계의 정식화 방법으로서 연속의 식을 항등적으로 만족시키는 Marker and Cell (MAC)<sup>(56)</sup>법을 기초로한 기법을 적용하였다. 계산은 초기값을 부여한후 미리 준비된 격자의 데이터를 입력받아 계산 격자를 생성한다. 그리고 경계조건을 만족할수 있도록 하여 속도와 압력을 동시완화 하여 지배방정식을 만족하면 순시 데이터로 저장되고 이후 시간진행에 따라 계속 계산을 수행한다.

그림 1은 부등간격 격자에서의 변수분포이다. 본 연구에서는 등간격격자상에서 MAC법의 중심차분을 부등간격격자에 적용하기 위하여 내분법에 의해 변수들을 보간하여 차분근사를 행하였다. 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분에 대해 식(2.2) 및 (2.3)를 부등간격 격자상에서 차분화하면 대류항에 대한 차분식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} \cong \frac{2(u_R^2 - u_L^2)}{(A+B)} \tag{2.7}$$

$$\frac{\partial uv}{\partial y} \cong \frac{(v_U u_U - v_D u_D)}{D} \tag{2.8}$$

$$\frac{\partial uv}{\partial y} \cong \frac{(v_U u_U - v_P u_P)}{A} \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial v^2}{\partial y} \cong \frac{2(v_Q^2 - v_L^2)}{(C+D)} \tag{2.10}$$

또한 확산항은 중심차분법으로 부등간격격자 보정을 행하여 다음과 같이 나타내고 압력항의 x방향 식은 다음과 같다.

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} \cong \frac{2}{s(s+1)} \cdot \frac{u_{i+1,j} - (1+s)u_{i,j} + su_{i-1,j}}{A^2} \tag{2.11}$$

단,  $s = B/A$

$$\left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i,j} \cong \frac{2}{A+B} (p_{i+1,j} - p_{i,j}) \tag{2.12}$$

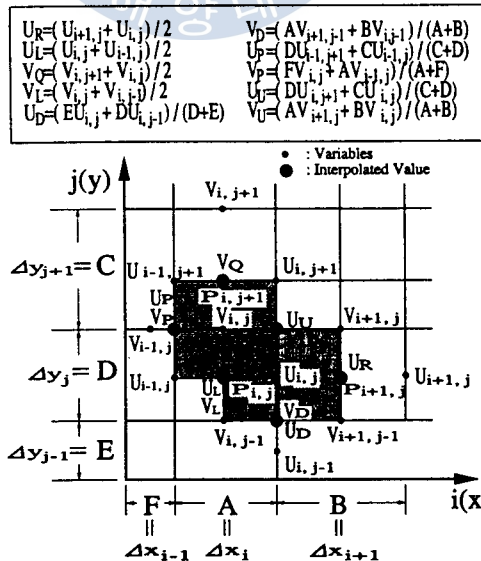


Fig.1 Distribution of Variables on Irregular Grid

입구 Poiseuille 유동은 무한평판의 흐름으로 계산상 충분히 발달된 비압축성 점성유체의 흐름으로 평균유속이 1이 되도록 Poiseuille 유동을 가정하였으며 온도의 변화에 대한 조건은 무시하였다.

Poiseuille 유동에 대한 속도구배에 대한 식<sup>7)</sup>은 다음의 식으로 표현된다.

$$U(y) = -\frac{V_p}{2} \left(1 + \frac{y}{a}\right) + \frac{Ba^2}{2\mu} \left[1 - \left(\frac{y}{a}\right)^2\right], \quad V(y) = 0 \quad (2.13)$$

단,  $2a$ 는 무한평판간의 간격이다.

상부평판이 고정되었으므로  $V_p=0$ 이고 속도분포는 식(2.15)와 같다.

$$U(x) = \frac{Ba^2}{2\mu} \left[1 - \left(\frac{y}{a}\right)^2\right] \quad (2.14)$$

$$\text{즉, } U(x) = -\frac{a^2}{2\mu} \frac{dp}{dx} \left[1 - \left(\frac{y}{a}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

여기서 평균속도를 구하기 위하여  $z$ 방향으로 폭  $\ell$ 에 대한 유량 $Q$ 는 속도  $u$ 를 단면에 적분하면 얻어진다.

$$Q = \int_A v \cdot dA = \int_{-a}^a ul \, dy = \left(-\frac{V_p}{2} + \frac{Ba^2}{3\mu}\right) 2a\ell \quad (2.16)$$

따라서, 단면 평균속도를 구하는 식은 식(2.17)으로 표현되며  $B$ 의 값은 식(2.18)와 같다.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{2a\ell} = \frac{V_p}{2} + \frac{Ba^2}{3\mu} \quad (2.17)$$

$$B = \frac{3\mu V}{a^2} \quad (2.18)$$

식(2.18)를 식(2.14)에 대입하면 2차원 평면 Poiseuille 유동의 속도방정식을 다음과 같이 얻게 된다.

$$U(x) = \frac{3}{2} V \left[ 1 - \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right], \quad V(y) = 0 \quad (2.19)$$

이와같은 조건에 의하여 계산된 입구유동의 형태를 그림 2에서 나타내고 있다. 채널출구의 경계조건으로는 유동변화가 작으므로 다음과 같이 Neumann조건을 부여하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2.20)$$

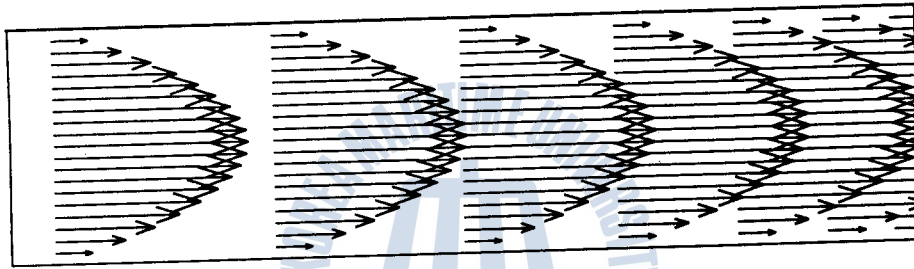


Fig.2 Inlet Flow Profile

본 연구에서의 계산조건은 표 1과 같다. 격자배치는 부등간격으로서 속도구배가 큰 벽면부분과 구동류가 흐르는 캐비티상부를 조밀하게 하였다. 유동장의 격자수는 상부의 구동류의 영역과 캐비티의 영역에서 경계면의 가상셀을 포함하여  $122 \times 102$ 의 격자로 나누었으며 상부 Poiseuille류의 유입부 높이는  $1/20H$  ( $H$ 는 대표길이)이다. 캐비티의 계산격자수는  $80 \times 80$ 이고 최소격자는 대표길이의 약  $1/400$ 이며 최대크기는 약  $1/40$ 이다. 안정계수는 레이놀즈수에 따라  $10^4$ 의 경우 0.6를 부여하였고,  $3 \times 10^4$ 과  $5 \times 10^4$ 에서는 0.3, 그리고  $7 \times 10^4$ 과  $10^5$ 에서는 0.1를 적용하였다.

속도 및 압력의 반복수렴 판정조건으로서는 각 셀에서의 발산(divergence)의 최대값 0.002를 기준으로 하였다. 한번의 전진시간간격에 대하여 평균 20회 정도의 반복수를 나타내었다. 계산시간은 레이놀즈수에 따라 다르다. 팬티엄(166MHz)기종에서 무차원시간  $T=100$ 당 대체로 약 70시간이 소요되었다.

계산은 먼저 초기치를 부여하여 SOLA 알고리즘에 의하여  $u, v, p$ 를 계산한 다음 연속의 식과 경계조건을 만족하도록 압력과 속도를 반복계산을 통하여 동시 완화를 행하면서 계산을 수행한다. 계산초기에는 시간진행의 간격을 결정하는 가속계



수의 값을 0.1로 하여 계산초기의 불안정을 억제시켰다. 데이터 저장간격은 무차원 시간 0.25로 하였고 무차원시간으로 1000에서 종료하였다.

그림 3은 유동장의 유동특성을 개략적으로 보여주고 있다. 전단혼합층이 캐비티 구동류 제1와류가 충돌하는 캐비티 상부에서 나타나며 모서리 부분에서 작은 규모의 다수의 고차와류가 존재함을 보여주고 있다. 상부의 구동류에 대하여는 입구평균 단면유속을 대표속도로 하여 겉보기 레이놀즈수를 산정하였다.

**Table 1 Computation Conditions**

Item	Computation Conditions	
Cavity Height, Channel Height	H, h	1, 1/20 H
Reynolds Number	Re	$10^4$ , $3 \times 10^4$ , $5 \times 10^4$ , $7 \times 10^4$ , $10^5$
Inlet Reynolds Number	$Re(in)$	$5 \times 10^2$ , $1.5 \times 10^3$ , $2.5 \times 10^3$ , $3.5 \times 10^3$ , $5 \times 10^3$
Grid Number	MX x NY	122 x 102
Maximum Grid Size, Minimum Grid Size	1/40H, 1/400H	0.025H, 0.0025H

가상격자를 사용하는 계산은 벽의 바깥쪽에 있는 격자에서의  $v$  및  $u$  값이 필요하게 된다. 유동장의 경계조건으로서 구동부를 제외한 좌우 및 하부의 정지벽면의 가상격자에서는 부착조건(no-slip condition)을 부여하였고 상부의 채널에는 입구평균유속을 대표속도가 1이 되도록 충분히 발달된 Poiseuille 유동을 가정하였다. 부착조건은 경계위치에서 속도를 0으로 하는 것이 요구된다. 유동장내부격자와 가상격자의 크기가 다를 경우에는 가상격자에서의  $v$ 속도는 인접한 유동장내부격자에서의  $v$ 속도의 곱과 같게 해야 하며 부호가 반대가 되어야 하나 격자의 생성시 유동장내부격자와 가상격자이 동일하도록 배치하였으므로 부호만 반대가 되도록 하였다<sup>8)</sup>. 고정벽에 있어서 가상격자에서의 법선속도는 벽안쪽의 발산  $D$ 가 소멸되도록 계산이 진행되어야 한다. 따라서, 고정벽에 대한 법선속도는 그대로 유지하는 반면 접선속도는 반대로 된다.

CFD의 불확실성 해석<sup>9)</sup>에 대하여는 아직 체계적으로 정리되거나 분류되어있지 않으나 알고리즘상의 오차와 Navier-Stokes 방정식에 대한 스킴 선택에 따른 절

단오차, 격자배치에 따른 격자크기 및 경계조건 선택 등에 대한 오차를 생각할 수 있다. 본 논문에 사용된 차분스킴은 SOLA스킴으로 보존형을 유지하고 있으며, 속도와 압력을 동시에 수정 완화하고 사이클오차 자기조정법<sup>10)</sup>을 채택함으로써 오차발생을 최대한 억제할 수 있는 장점을 가지고 있다. 입구 Poiseuille 유동의 한 격자점 이동시의 최고속도의 경우를 측정된 결과 이론적인 계산과 비교하여 약  $1.0 \times 10^{-4}$ 의 오차를 나타내었다. 또한 격자에 대한 오차를 줄이기 위하여는 가능한 한 격자를 0에 가깝도록 접근되어야 하나 컴퓨터 계산능력을 고려하여 가능한 한 조밀한 격자를 배치하였다. 불확실성 해석을 엄밀하게 하기 위하여는 동일유동조건에서 실험결과와의 비교분석이 필요하나 실험방법에 따른 불확실성의 해석문제 또는 실험기법상 모서리부분에서 해상도의 문제와 같이 측정상의 문제점등으로 인하여 두 방법에 의한 상대적 비교에 의한 동일성의 해석에는 여전히 문제는 남아있으나 신뢰성에 대한 확보를 위하여는 경험적인 접근방법과 계속 비교, 분석되어야 할 것이다.

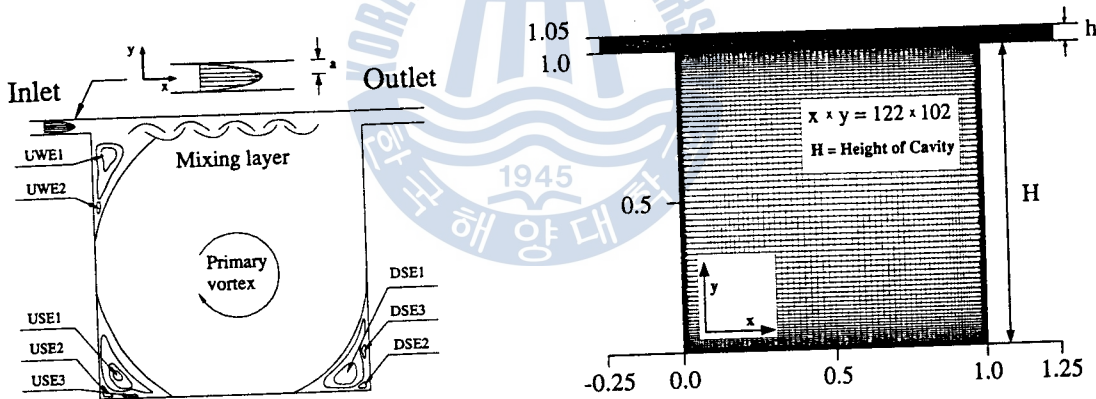


Fig.3 Schematic Definition of Channel Cavity

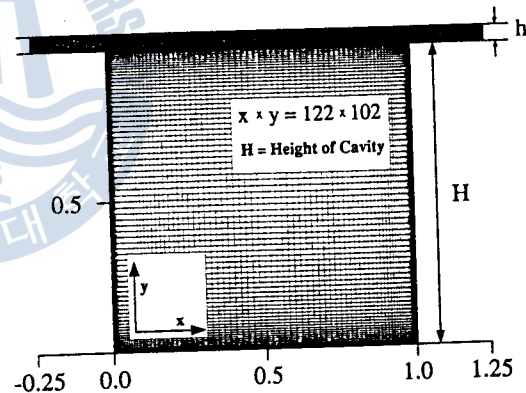


Fig.4 Grid Formation

편미분 방정식을 수치계산을 행하는 경우 해석공간을 다수의 격자점으로 이산화하고 편미분 방정식을 대수방정식으로 변환을 행하며 격자는 수치해의 정도나 안전성, 계산효율에 밀접한 관계가 있어 주의를 기울여야 한다. 격자는 원활하게 변화하고 직교 또는 이에 가까워야 하며 함수가 급격하게 변화하는 경계의 근방에 조밀하게 배치하여야 한다. 사용된 격자배치는 부등간격으로 격자배치는 부등간격으로서 속도구배가 큰 벽면부분과 구동류가 흐르는 캐비티상부를 조밀하게

하였다. 유동장의 격자수는 상부의 구동류의 영역과 캐비티의 영역에서 경계면의 가상격자를 포함하여  $122 \times 102$ 이며 상부 Poiseuille류의 유입부 높이는  $1/20H$ 이다. 정방형 캐비티의 계산격자수는  $80 \times 80$ 이고 최소격자는 대표길이의 약  $1/400 H$ 이며 최대크기는 약  $1/40H$ 이다. 부등간격 격자생성의 일반적인 방법은 여러 가지가 있으며 캐비티 등과 같이 단순한 유동장의 경우 삼각함수의 식이 사용되나 본 연구에서는 다음과 같은 격자생성법을 채택하였다.

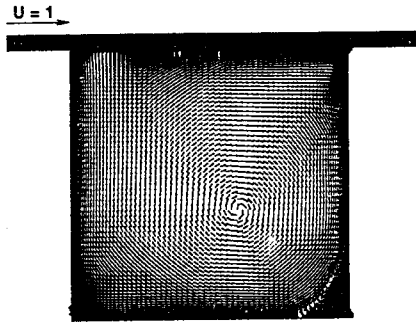
부등간격격자는 식(2.21)으로 계산되며 격자배치는 그림 4와 같다.

$$s = P\eta + (1-P) \left( 1 - \frac{\tanh[Q(1-\eta)]}{\tanh Q} \right) \quad (2.21)$$

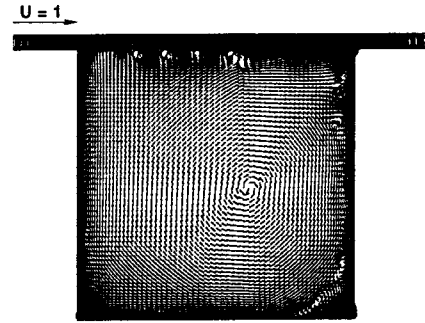
여기에서 P와 Q는 각각 격자배치의 방향과 밀집도를 변화시키는 파라메타<sup>1)</sup>로서 벽면에서의 최소격자를 보다 조밀하게 하고 최대격자가 시간간격에 따른 운동량 이송에 따른 안정성을 확보해야 하며 또한 격자의 연속성을 유지할 수 있도록 선정되어야 한다. 따라서 이 값은 경험적으로 적절히 보정하였다.

### 제 3 장 계산결과 및 고찰

그림 5와 그림6은 무차원시간 30의 경우 레이놀즈수  $3 \times 10^4$ 과  $5 \times 10^4$ 의 순시 속도분포를 보여주고 있다. 각 레이놀즈수에서 전체적으로 유동이 발달하는 과정을 알 수 있으며 레이놀즈수가 증가할수록 주와류의 중심이 우측 벽면에 가깝게 집결하여 하강하는 현상을 볼 수 있으며 또한 레이놀즈수가 증가할수록 캐비티가 안정되기까지의 시간도 증가하였다. 특이한 것은 레이놀즈수  $3 \times 10^4$ 이상에서부터 전단혼합층의 뚜렷한 현상이 나타났으며 이러한 전단 혼합층이 점차 완화되어 주와류에 흡수되고 있는 과정이 잘 나타나고 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 이러한 초기의 전단혼합층의 발달 및 소멸과정이 불안정함을 관찰할 수 있었다. 또한, 레이놀즈수  $5 \times 10^4$ 이상에서부터는 이러한 전단혼합층의 영향으로 발생한 와류가 소멸되지 않고 우측벽면을 따라 우측하부의 모서리 영역까지 그 영향을 미치고 이동함을 볼 수 있다.



**Fig.5 Velocity Vectors**  
( $T=30$  ,  $Re=3 \times 10^4$ )



**Fig.6 Velocity Vectors**  
( $T=30$ ,  $Re=5 \times 10^4$ )

그림 7 및 그림 8은 각 레이놀즈수에서 무차원시간 1000에서의 순시속도분포와 압력분포를 나타내고 있다. 그림 7에서 보이고 있는 속도분포는 전체적으로 강제 와류의 경향을 보이고 있으며 레이놀즈수  $3 \times 10^4$ 이하에서는 무차원시간 100의 경우와 그리 상이하지 않음을 알 수 있으며 레이놀즈수가 증가하여도 전체적인 유동장의 형태는 일정한 형상을 보이고 있으며 단지, 각 모서리부의 3차 이상의 고차와류의 형성이 다르게 나타나고 있다. 우측하부, 좌측상부 및 좌측하부의 내부류의 유동특성 및 속도분포의 크기등을 보다 면밀히 검토하기 위하여 해당부분을 확대하였으며 나타나는 바와 같이 고차와류의 속도크기는 아주 미약함을 보이고 있다. 그림 8에서 보는 압력분포는 레이놀즈수가 증가할수록 캐비티 내부의 압력은 전체적으로 하강함을 보이고 있으며 전단혼합영역의 영향으로 Poiseuille 구동 부분의 주기적인 압력변동특성과 레이놀즈수가 증가할 수록 압력변동의 주기 및 압력차가 증가하고 있으며 전단혼합영역이 입구쪽으로 점차 접근함을 알 수 있다.

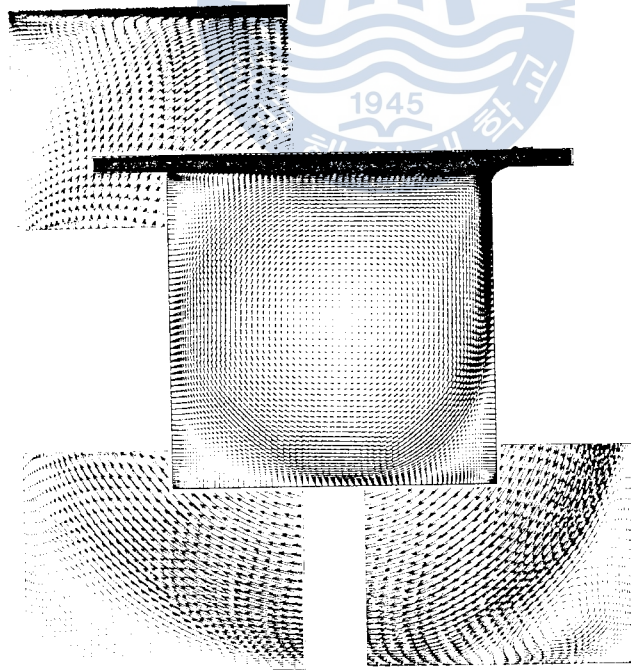
그림 9는 레이놀즈수  $10^4$ ,  $5 \times 10^4$  및  $10^5$ 에 대하여 무차원시간  $T=800 - 1000$ 사이의 데이터 중 2.0간격으로 100개의 데이터를 시간 평균한 것으로서 캐비티 중앙 단면에서의 속도분포이다. 우측벽면의 v속도분포에서 캐비티유동의 전형적인 kink 현상이 재현되고 있음을 볼 수 있고 레이놀즈에 따른 구분이 크게 나타나지 않으며 벽면근처에서 부드러운 속도분포를 보이고 있다.

그림 10은 Poiseuille 구동류 부위와 캐비티의 모서리 부분의 속도분포, 운동에너지 및 전운동에너지를 관찰하기 위하여 설정된 각 위치를 보이고 있다.

Poiseuille구동부는 캐비티 입출구부분과 그 가운데를 설정하였으며 캐비티 내부는 각 모서리부의 2차와류의 중심점에 가장 가깝도록 위치를 설정하였다.

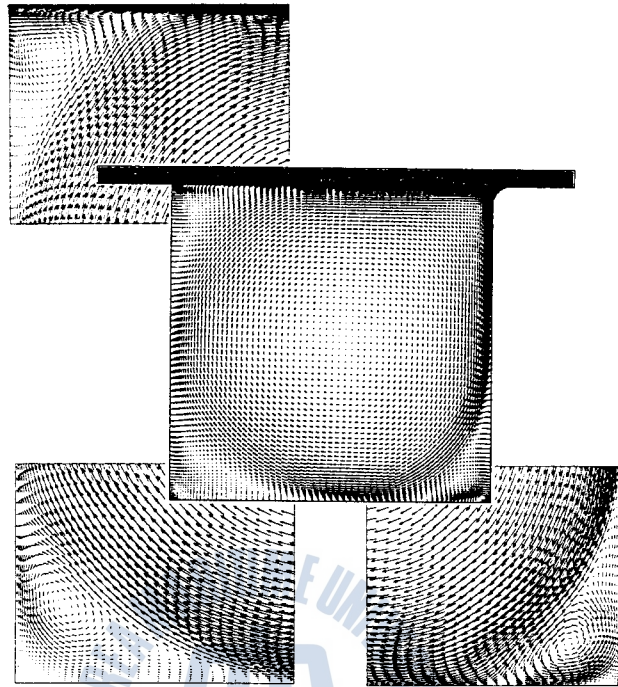
그림 11 및 12는 무차원시간 0-1000 까지 레이놀즈수  $10^4$ ,  $5 \times 10^4$  및  $10^5$ 에서 상부의 구동류 부분과 캐비티 내부의 속도 및 운동에너지의 변동특성을 보여주고 있다. 전체적으로 레이놀즈수가 증가할수록 구동류부분이나 캐비티 내부에서 안정되기까지의 소요시간은 증가하는 편이나 무차원시간 200전후로 안정됨을 보이고 있다. 여기에서 "D"점의 불안정성은 캐비티 출구의 불안정에 기인한 것이며 특이한 것은 레이놀즈수  $10^5$ 에서 "E"점의 불안정성은 레이놀즈수가 증가함에 따라 전단혼합층에서 강한 와류가 우측하부의 모서리부분까지 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다.

그림13은 각 격자점에서의 운동에너지  $(u^2+v^2)/2$ 를 합한 값을 시간 진행에 따라 나타낸 것이다. 레이놀즈수  $10^4$  과 레이놀즈수  $5 \times 10^4$  사이에서 운동에너지의 불규칙한 분포를 나타내기 시작하는 임계 레이놀즈수가 존재함을 알수 있다.

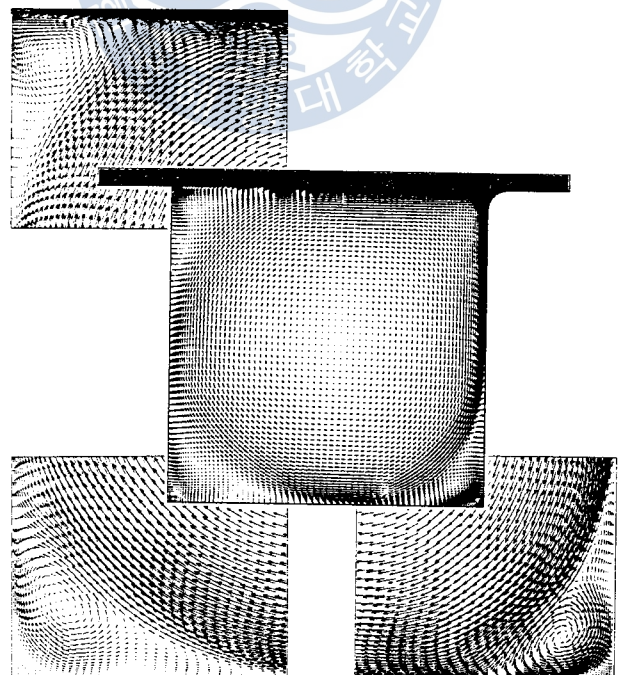


(A)  $Re = 10^4$

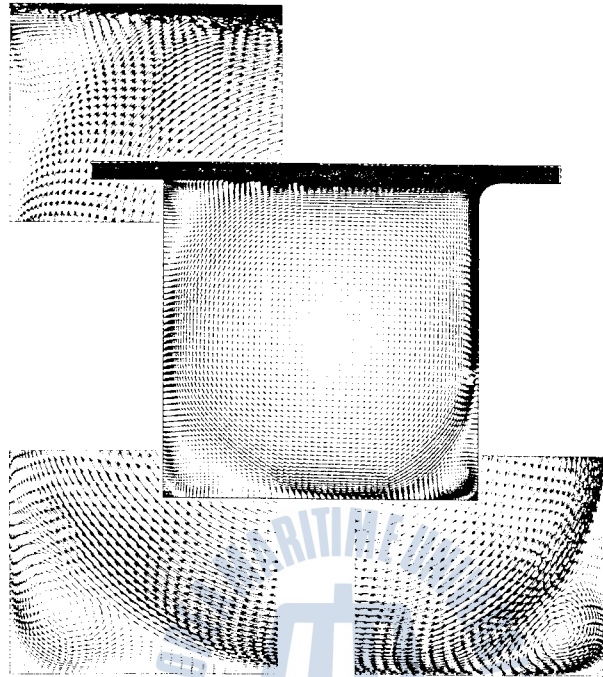
Fig.7 Instantaneous Velocity Vectors(T=1000)



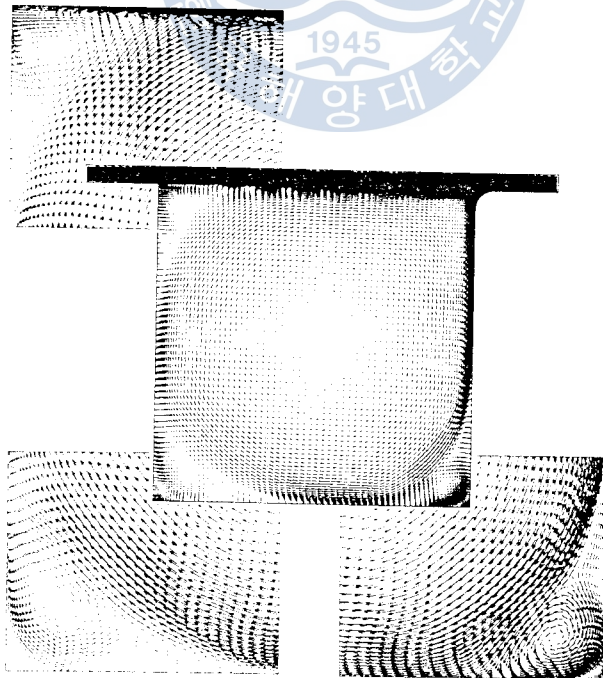
(B)  $Re = 3 \times 10^4$



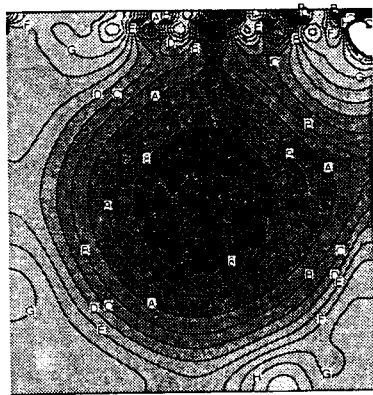
(C)  $Re = 5 \times 10^4$



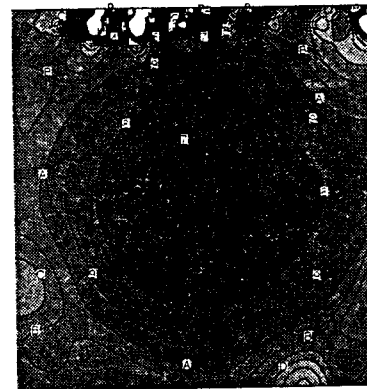
(D)  $Re = 7 \times 10^4$



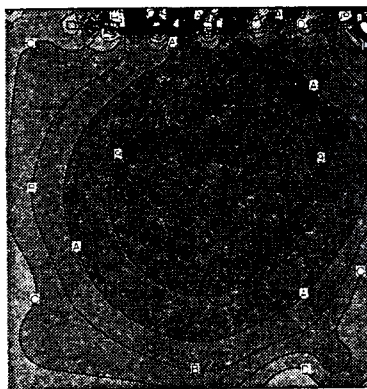
(E)  $Re = 10^5$



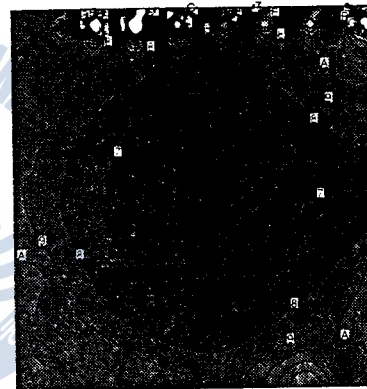
(A)  $Re = 10^4$



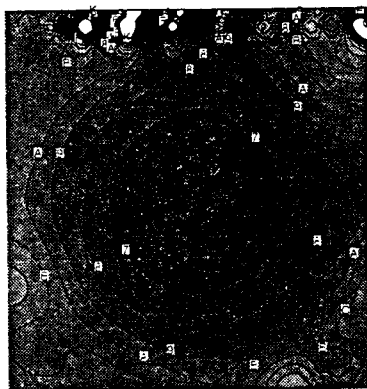
(D)  $Re = 7 \times 10^4$



(B)  $Re = 3 \times 10^4$



(E)  $Re = 10^5$



(C)  $Re = 5 \times 10^4$

Fig.8 Instantaneous Equi-Pressure Contours( $T=1000$ )

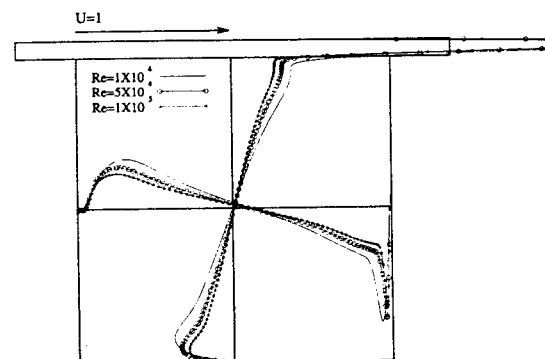


Fig.9 Time-Mean Velocity Profile



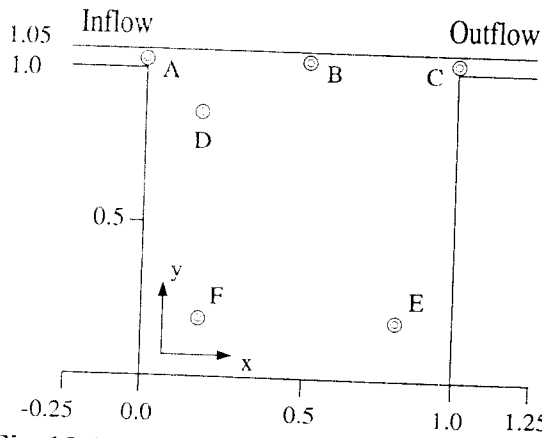
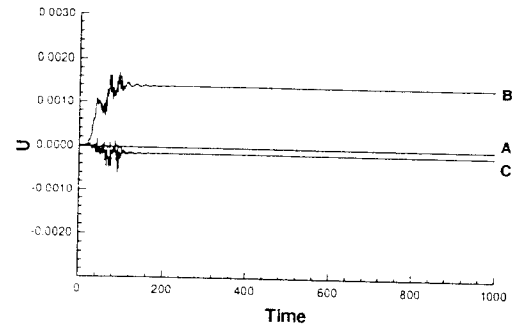
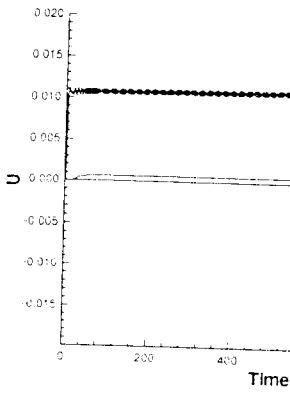


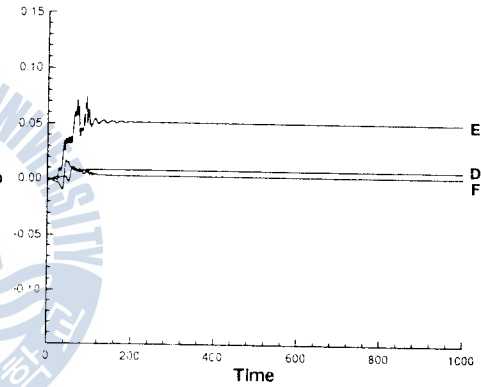
Fig.10 Definition of Pick-up Positions



(a) ABC

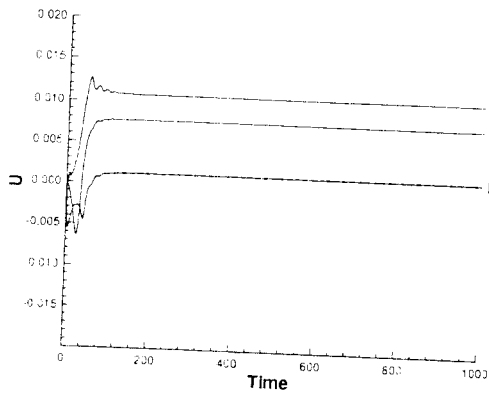


(a) ABC



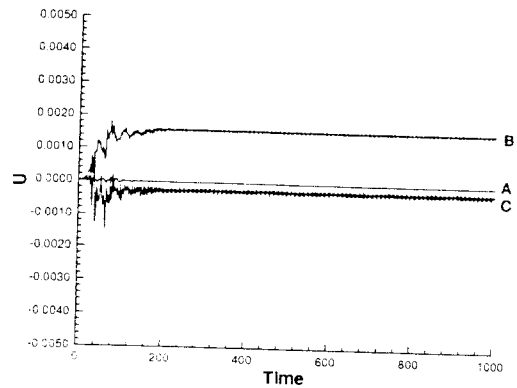
(b) DEF

(B)  $Re = 5 \times 10^4 (T=0 \sim 1000)$



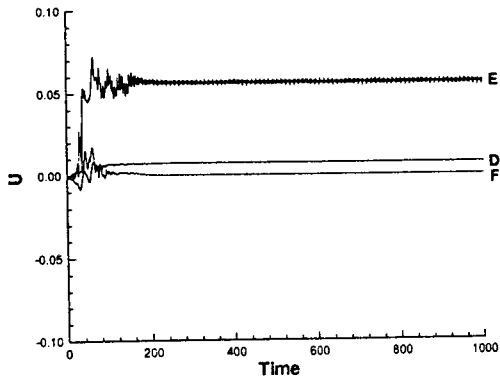
(b) DEF

(A)  $Re = 104 (T=0 \sim 1000)$

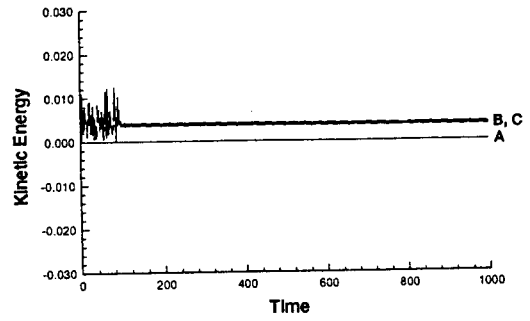


(a) ABC

Fig.11 U Velocity Fluctuation

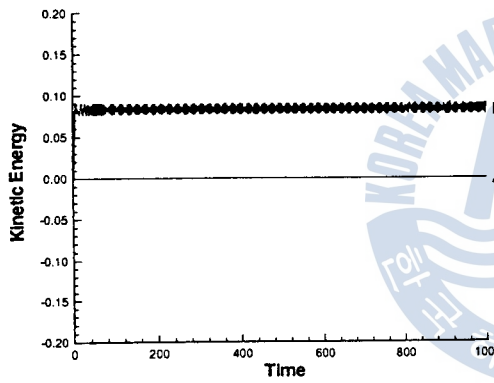


(b) DEF

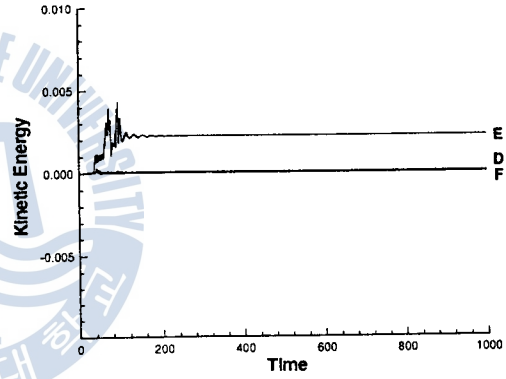


(a) ABC

(C)  $Re = 10^5 (T=0 \sim 1000)$

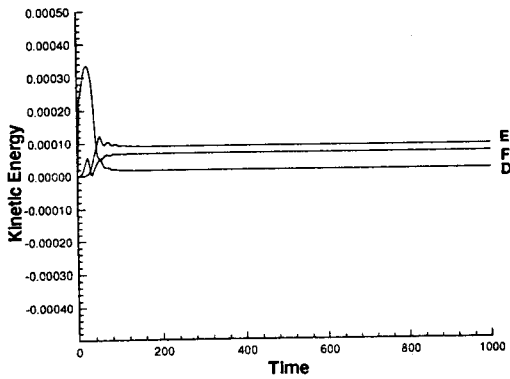


(a) ABC



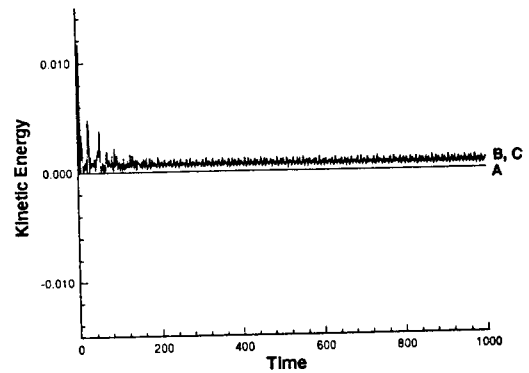
(b) DEF

(B)  $Re = 3 \times 10^4 (T=0 \sim 1000)$



(b) DEF

(A)  $Re = 10^4 (T=0 \sim 1000)$



(a) ABC

(C)  $Re = 10^5 (T=0 \sim 1000)$

Fig.12 Kinetic Energy Fluctuation

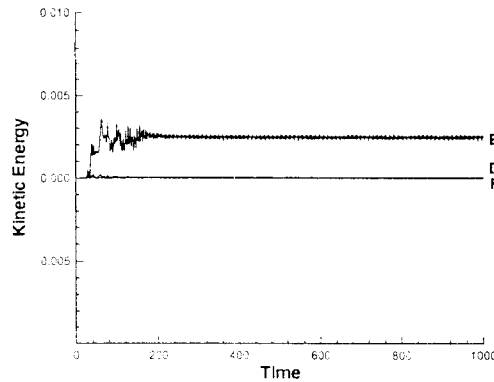


Fig.13 Time Variation of Total Kinetic Energy(T=900~1000)

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 정방형 캐비티의 상부에 작은 간격을 두고 여기에 2차원의 평면 Poiseuille 구동류가 흐르게 하여 고레이놀즈수의 캐비티 내부유동 특성을 고찰하였다. 계산은 SOLA 알고리즘을 이용하였으며 계산결과 캐비티 내부에 구동류의 주류방향으로 회전하는 제 1의 강제와류가 존재하며 전단응력의 전달이 뒷개구동에 비하여 상대적으로 적음을 알 수 있었다. 입출구 형태를 갖는 캐비티에 있어서는 그 유동패턴이 주 와류의 성분이 밀폐캐비티에 비하여 약하고 모서리부와 그 에 인접한 벽면에서의 고차와류도 그 거동이 비교적 활발하지 못함을 나타내었다.

그리고 캐비티 상부구동류와 주와류가 혼합되는 영역에서는 전형적인 전단혼합층의 현상이 레이놀즈수  $10^4$ 과  $3 \times 10^4$ 의 사이에 존재하며 하부의 모서리 끝단과 벽면의 경계면에서 발생하는 특이한 고차와류 유동이 있음을 보였고 순시의 압력분포에서는 전단혼합층의 방출와류에 가인하는 규칙적인 공간변동특성을 나타내었다. 또한 불규칙한 유동특성이 나타나기 시작하는 임계 레이놀즈수는 전 운동에너지의 합이 시계열특성으로부터  $Re=10^4$ 과  $Re=5 \times 10^4$ 의 사이에 존재함을 알 수 있었다. 이와 같은 특성은 구동류에 의해 전단응력을 공급받는 채널캐비티의 독특한 유동특성으로 추정된다.

## 참 고 문 헌

1. C. K. Aidun, N. G. Triantafillopoulos, and J. D. Benson, "Global Stability of a Lid-driven Cavity with Throughflow : Flow Visualization Studies", *Phys Fluids* A3(9), Sep. 1991, pp. 2081-2091.
2. I. Kimura & T. Hosoda, "Unsteady Behaviours of Open Channel Flows with Rectangular Dead Zone Area", *Nagare (Japan)* 12,1993, pp.399-408
3. A. Huser & S. Biringen, "Calculation of Two-Dimensional Shear-Driven Cavity Flow at High Reynolds Numbers", *Int. J. of Numerical Method in Fluids*, Vol. 14, 1992, pp. 1087-1109.
4. 조대환, "2차원 평면 Poiseuille 흐름 구동 입방형 캐비티의 PIV 측정", 공학석사 학위논문, 1995.
5. Young-Ho Lee, Chun-Sik Kim, Jang-Woon Choi, "A Revised Convective Scheme for High Reynolds Number and its Application", *JSME/KSME of Fluid Eng. Conf.*, 1994, pp.312-316.
6. 이영호, "2차원 정방형 캐비티의 비정상 유동특성", 대한기계학회 전산 유체역학 분과회 학술대회 논문집, 1994, pp 149-167
7. 송병진, 맹주성, 이상환, "상세 유체역학(상)", 회중당, 1996, pp.608-620.
8. Philip M. Gerhart, "Fundamentals of Fluid Mechanics, Second Edition", Addison Wesley, pp.375
9. U. B. Mehta, "Some Aspects of Uncertainty in Computational Fluid Dynamics Results", *Journal of Fluids Engineering*, 1991, pp 538-543
10. C.W. Hirt & Francis H. Harlow, "A General Corrective Procedure for the Numerical Solution of Initial Value Problems", *Journal of Computational Physics* 2, 1967, 114-119
11. 保原 充 大宮司久明, "數值流體力學 基礎と 應用", 東京大學出版 會, 1992, pp. 171-177.