

장애물을 갖는 밀폐공간의 비정상 유동특성에 관한 연구

박 찬 수 · 조 대 환

A Study on Unsteady Flow Characteristics of Closed Cavity with Obstacle

C. S. Park* · D. H. Cho*

Key words : Unsteady Flow(비정상유동), High Reynolds Number(고레이놀즈수), Conservation Form(보존형), TLV(Typhoon-Like Vortex), Lid-driven(덮개구동), L-shaped driven Cavity(전단구동 L형 캐비티)

Abstract

This paper is aimed to investigate behaviour of vortex in 2-D step cavity with high Reynolds numbers(3.2×10^3 , 10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 and 7×10^4). The SOLA algorithm which is MAC type, was adopted to solution method computing the flow field on irregular grid. In case of $Re=7 \times 10^4$, flow behavior is steady, but periodic unsteady sinusoidal fluctuation of local velocity and kinetic energy is found for $Re=10^4$. Continuous movements of small eddies in the secondary flow regions are discovered for 3×10^4 . Generation of eddies and their active migrating behavior are detected over $Re=5 \times 10^4$, resulting in complete unsteady and non-linear flow characteristics. Furthermore, a typhoon-like vortex(TLV) appears intermittently and rotates along the separation regions and boundary layers.

1. 서 론

와류의 형성과 발달은 다양한 유동장에서 관찰되며 이것은 축 밀봉의 래비린스팩킹과 같은 특수한 목적을 위한 유동장을 제외하고 기계효율의 저하를 초래하는 등, 바람직하지 못한 결과를 초래하는 경우가 많다. 특히 고레이놀즈수의 흐름에서는

내부에 존재하는 와류의 거동에 따라 유동특성이 크게 달라지게 되므로 관련된 유동장에서 와류의 거동을 파악하는 것은 공학적인 측면에서 매우 중요하다. 사각공간의 경우 유동장 내부로 전단응력이 전달되는 구조와 유동장의 형태에 따라 와류의 거동이 크게 달라지게 된다.

Verstappen 등¹⁾은 2차원 사각공간의 상부에 설

* 목포해양대학교 기관공학부(원고접수일 : 98년 11월)

치된 벨트에 의해 전단력이 공급되는 유동장을 대상으로 333×333의 등간격 격자상에서 DNS기법을 이용한 수치계산을 행하였다. 그 결과 $Re=1.1 \times 10^4$ 에서 캐비티의 세모서리에서 주기적인 비정상특성에 대한 결과를 제시하였다.

Ghia 등²⁾은 같은 유동장을 대상으로 다중격자(Multigrid)를 이용한 수치계산을 수행하고, 하부의 모서리영역에서 비정상적으로 발생하여 이동하는 다수의 와류에 대한 수치계산결과를 보고하고 있다. 이와 비슷한 결과는 Huser 등³⁾이 행한 자유표면의 전단구동(sheared-driven)에 의한 사각공간의 계산에서도 나타나고 있으나 대상 레이놀즈수는 $Re=3 \times 10^4$ 까지로 국한되어 있다. 단, 자유표면 경계면에서의 마찰속도를 대표속도로 이용하고 있다.

Lee⁴⁾는 $Re=3 \times 10^4$ 에서 정방형 밀폐공간의 전 영역에 나타나는 비정상적인 특성을 보고하고 있다. 특히 모서리에서 발생하는 와류는 대단히 큰 세력으로 존재함과 동시에 주와류의 회전방향으로 방출된 와류들이 성장, 결합 및 소멸과정을 불규칙하게 반복하고 있음을 제시하였으며, 시간평균의 결과에서 태풍의 발생 및 성장 그리고 소멸과정과 유사한 TLV(typhoon-like vortex)가 나타남을 발표하였다.

L형 캐비티(L-Shape Cavity)는 상부에는 덮개 구동캐비티, 그리고 우측하부에는 전단구동캐비티가 복합된 캐비티이다. Oosterlee⁵⁾는 전단구동 L형 캐비티(L-shaped driven Cavity)를 비압축성 흐름에 대한 NS방정식의 이산화기법과 격자에 따른 의존성을 고찰하는 벤치마크 유동장으로 제시하였다. Kang⁶⁾은 비구조격자계에서 계산된 결과의 신뢰성을 검증하기 위한 벤치마크유동장으로 전단구동 L형 캐비티를 이용하고 있다.

이와 같은 배경으로 이 연구에서는 전단구동 L형 캐비티를 대상유동장으로 설정하고, 비압축성 유동의 고레이놀즈수에 있어서 와류의 거동을 파악하고자 하였다. 시간 의존적인 비정상유동특성을 검토하기 위하여 다섯 종류의 레이놀즈수(3.2×10^3 , 10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 and 7×10^4)에 대한 차분계산을 행하였다. 그 결과 비정상성이 $Re=10^4$ 이상에서 나타났으며, $Re=5 \times 10^4$ 와 $Re=7 \times 10^4$

에서 Lee 등⁴⁾이 발표하였던 TLV(Typhoon-Like Vortex)와 유사한 와류가 존재함을 알수 있었다.

2. 계산방법

직교좌표계에서 비압축성 점성유동의 보존형 운동방정식과 연속방정식은 무차원식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \\ &= \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} \\ &= \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \tag{2.2}$$

속도 및 압력에 관한 완화기법으로서는 SOLA의 방법을 택하였다. 이 연구에서는 보존형의 스킴 중에서 MAC법의 중심차분을 이용하였다. 확산항의 차분식에는 2차정도의 중심차분을 이용하며, 다음과 같이 압력항과 함께 부등간격 격자의 보정을 행한다. A는 Δx_i 를, B는 Δx_{i+1} 를 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{ij} &\doteq \frac{2}{s(s+1)} \\ & \frac{u_{i+1,j} - (1+s)u_{i,j} + su_{i-1,j}}{A^2}, \quad s=B/A \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{ij} \doteq \frac{2}{(A+B)} (p_{i+1,j} - p_{i,j}) \tag{2.4}$$

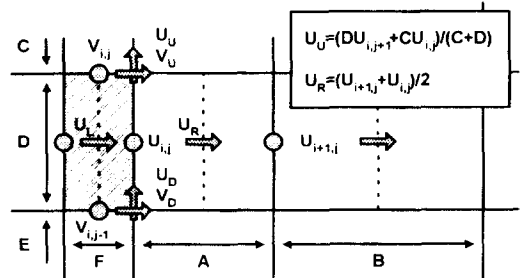


Fig. 1 Variables Allocation on Irregular Grid

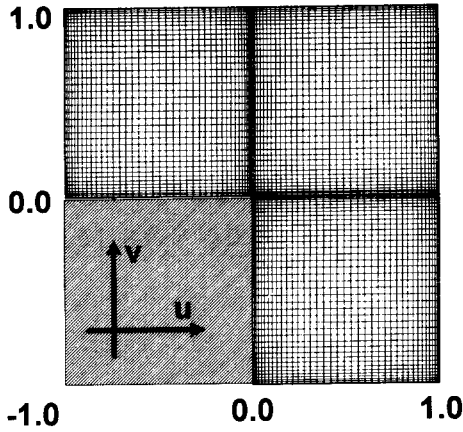
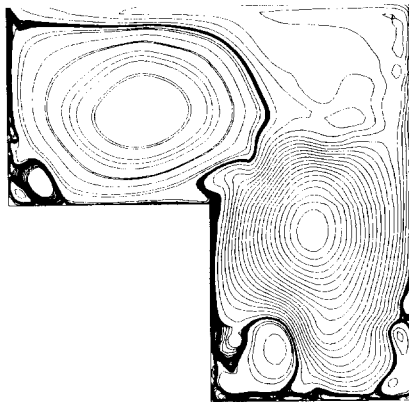


Fig. 2 Grid Formation

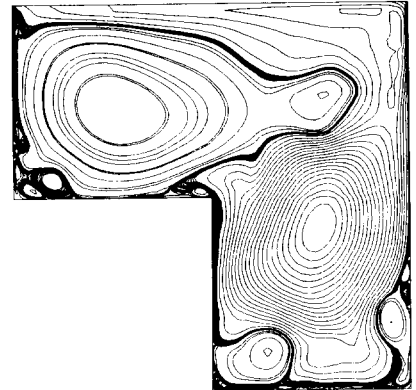
그림1과 그림2는 계산에 사용된 변수의 정의와 대상유동장의 형상이다. 격자형성기법으로서는 인접격자간의 크기가 급격하게 변화하지 않도록 하기 위하여 $\sin(x)$ 함수를 이용하였으며, 최소격자와 최대격자가 $1/336H$ 와 $1/54H$ 가 되도록 하였다. 그림1에서 대류항의 이산화 방법으로서 기존의 등간격자상의 보존형 기법을 부등간격 격자상에서 적용하기 위해 내분의 원리로서 보존형을 유지할 수 있도록 하였다.

3. 계산결과 및 고찰

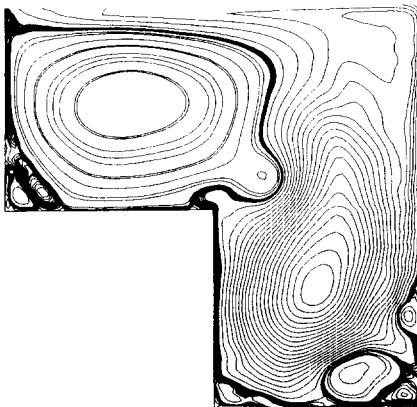
그림3은 $Re=7 \times 10^4$ 의 경우에 있어서 모서리 영역에서 발생하는 소규모의 와류들의 시간적인



(a) t=403



(c) t=411



(b) t=407



(d) t=415

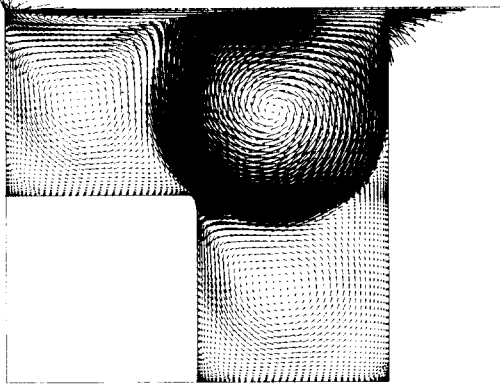
Fig.3 Instantaneous Streamlines at $Re = 7 \times 10^4$

변동특성을 알아보기 위하여 무차원 시간으로 $T=4$ 마다 도시한 순간의 유선도이다.

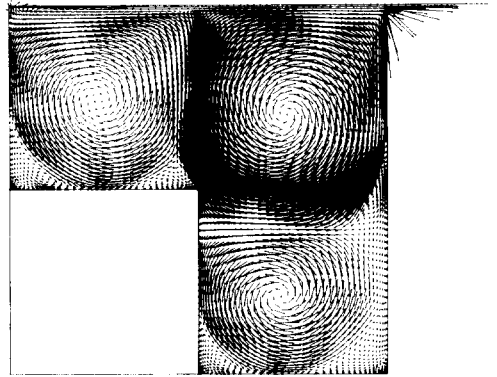
- (a) $t=403$
- (b) $t=407$

- (c) $t=411$
- (d) $t=415$

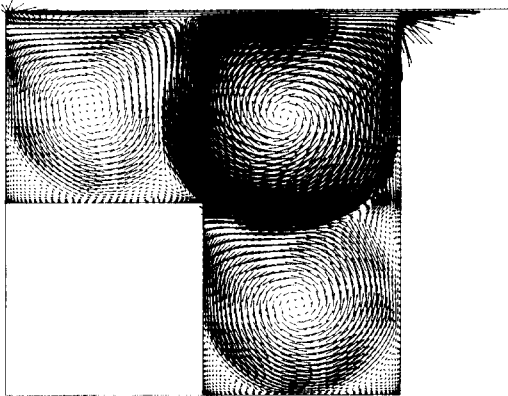
그림에서 보면 우측하부모서리에서는 하부벽면에서 일부의 흐름이 분리가 되어 반시계 방향으로



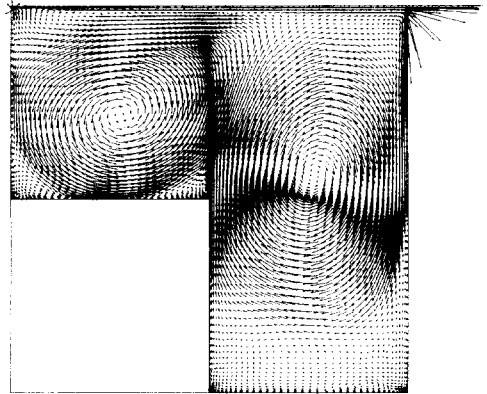
(a) $Re = 3.2 \times 10^3$



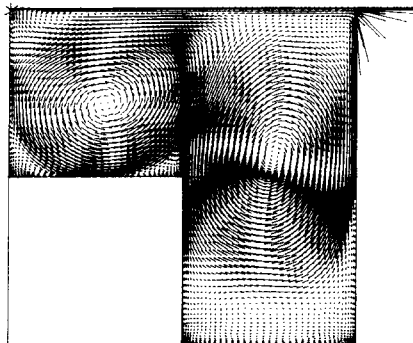
(c) $Re = 3 \times 10^4$



(b) $Re = 10^4$



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



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

Fig. 4 Time-Mean Velocity Distribution

회전하는 소규모의 와류들이 발생하고 이동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 와류의 일부흐름이 다시 분리가 되어 2차와류와 벽면의 경계면 사이에서 조그만 규모의 제3와류를 발생시키고 있다. 이러한 와류들은 시간진행에 따라 주와류의 회전방향으로 이동하면서 모서리영역을 지날 때는 크게 세력이 확장되고 벽면을 따라 이동해 갈 때에는 그 규모가 작게 나타나고 있다. 특이한 것은 우측 하부 모서리에서 발생한 와류가 주와류의 회전방향으로 방출되면서 와류들이 성장, 결합 및 소멸과정을 불규칙하게 반복하고 있음을 알 수 있다.

그림4는 무차원시간 $T=250 - 450$ 사이에서 $T=1$ 간격으로 계산데이터를 저장한 뒤에 이를 시간평균한 속도벡터분포이다. 그림4(a)는 $Re=3.2 \times 10^3$ 의 결과이다. 일사분면의 주와류를 제외하고는 이사분면과 사사분면에 형성된 와류의 세력은 상대적으로 미약하다. 그림4(b)는 $Re=10^4$ 의 시간평균속도벡터로서 그림4(a)와 와류의 크기는 유사하다. 그러나 시간 평균적으로는 유사한 질서구조를 유지함을 알 수가 있고 이것은 2차원의 개방 유동장을 대표할 수 있는 중요한 특성중의 한가지로 보여진다. 그림4(e)는 $Re=7 \times 10^4$ 의 경우로서 그림3의 순간의 유선도에서의 유동패턴과 비교해 보면 우측하부모서리에서 시간평균의 속도벡터분포 사이에 차이점이 크게 나타난다. 이것은 일정한 규모의 와류가 형성되어 있지 않고 불규칙적으로 와류가 생성, 성장, 결합 및 소멸을 반복하기 때문에 시간평균의 분포는 평활화되어 나타나는 것으로 판단된다.

- (a) $Re=3.2 \times 10^3$
- (b) $Re=10^4$
- (c) $Re=3 \times 10^4$
- (d) $Re=5 \times 10^4$
- (e) $Re=7 \times 10^4$

그러나 이사분면의 좌측모서리에서는 커다란 단일 박리과류로 시간평균됨을 알 수가 있다. 공통적으로 레이놀즈수가 증가할수록 일사분면의 주와류의 규모가 커지고 있으며 좌측하부의 모서리 영역에서 제2와류를 관찰할 수 있다. 즉 $Re=5 \times 10^4$ 이상의 유동장에서 순시적으로는 매우 복잡한

비정상특성을 나타내고 있다. 이는 태풍이 발생하여 이동하면서 성장하여 소멸하는 과정과 유사성이 있어 Lee⁴가 명명한 TLV(typhoon-like vortex)와 유사한 형태이다. 4가지의 유선도에서 나타나 있듯이 1사분면과 사사분면에 걸친 주와류가 존재하고 2사분면에 또 하나의 큰 와류가 존재한다. TLV와 유사한 와류의 거동과 함께 2사분면의 와류도 사사분면에서 상승하는 와류와 결합되어 커진 박리과류를 일사분면의 상부로 방출하고 있다.

그림5는 시간평균($T=250 - 450$)의 데이터를 이용하여 수평 및 수직 속도성분을 이사분면을 기준하여 4등분한 선상($X=0.5$ 및 $Y=0.5$)에서 5종류의 레이놀즈수($Re=3.2 \times 10^3$, $Re=10^4$, $Re=3 \times 10^4$, $Re=5 \times 10^4$, $Re=7 \times 10^4$)를 표시한 결과이며 실선중 수평선은 u 속도분포를, 수직선은 v 속도분포의 기준선을 보이고 있다. $Re=3 \times 10^4$ 를 넘어선 레이놀즈수에서는 모두 강제와류의 속도분포 특성을 상실하고 있으며 이것은 앞에서 언급한 순시유동장에서의 방출와류의 영향 때문이며 이와 같은 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 더욱 커지고 있다. 사사분면의 하부에 $Re=5 \times 10^4$ 이상에서 나타나는 속도분포는 모서리에 국한된 와류의 거동이외에 여기에서 방출된 와류들의 이동과 다른 와류의 상호작용에 의한 소멸 및 성장에 의한 것으로서 이 레이놀즈수의 범위에서 발견되는 새로운

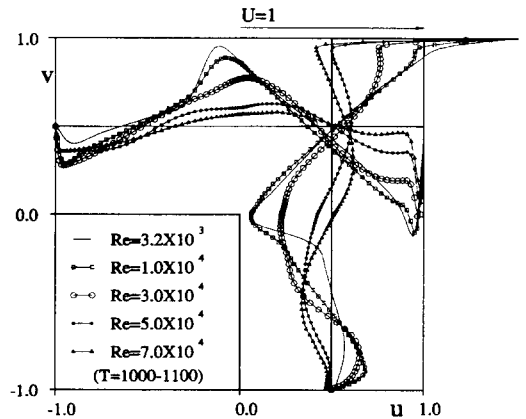


Fig. 5 Nondimensional u, v Velocity Profile at $X=0.5, Y=0.5$

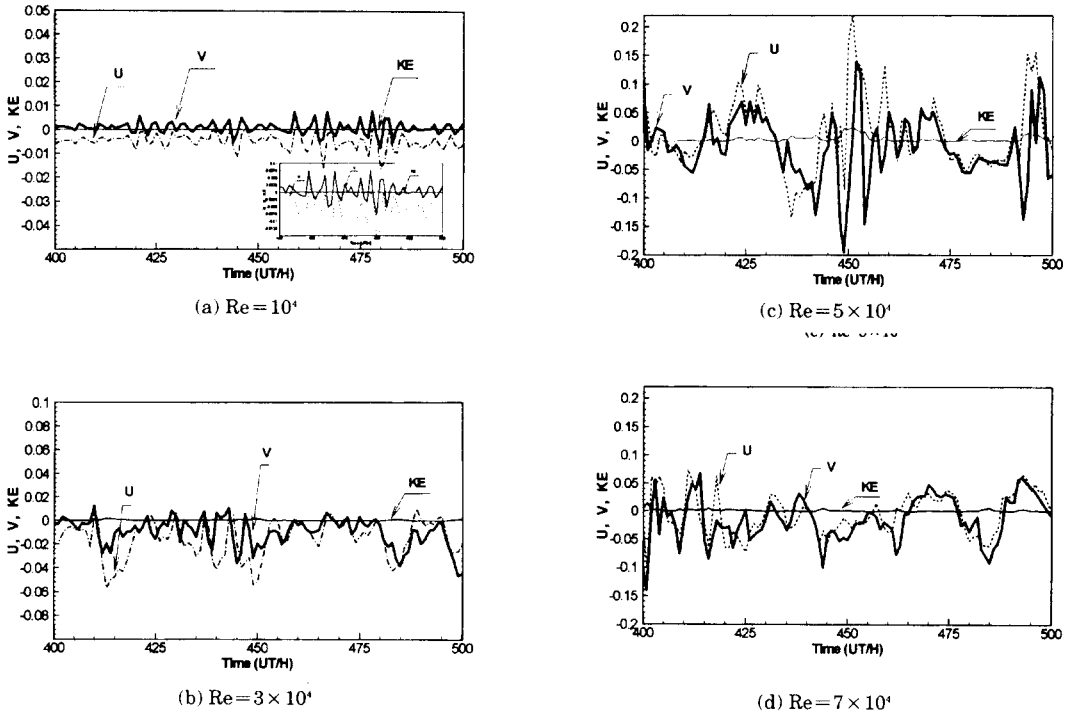


Fig. 6 Temporal Fluctuation of u, v Velocity and Kinetic Energy
(Pick-up Position : $x=0.85, y=0.15, T=400 - 500$)

유동특성으로 보고될 수 있다.

Fig.6은 $X=0.85$ 및 $Y=0.15$ 에서의 u, v 및 운동에너지의 시간변동과형을 나타낸다. 어느 경우에서나 불규칙한 변동을 보이며 특히 Fig.6(c)에서는 이와 같은 경향이 더욱 증가하고 있다. 스펙트럼분석에 의한 탁월주파수 성분 및 변동속도 성분을 이용한 난류통계량을 구해 보면 보다 유익한 유동특성을 제공할 것으로 예상된다. Huser³⁾는 본 연구에서의 $Re=10^4$ 전후의 계산과 유사한 결과를 이용하여 박리부에서의 변동성분을 난류의 관점에서 논하고 이를 천이영역에서의 불안정성까지로 해석하고 있다. Koseff 등이 주도한 일련의 실험결과(5) 및 Freitas 등의 수치해석(6)에서는 3차원 유동에서 난류특성이 레이놀즈수 3×10^3 전후부터 발생함을 보고하고 있다.

- (a) $Re=10^4$
- (b) $Re=3 \times 10^4$
- (c) $Re=5 \times 10^4$
- (d) $Re=7 \times 10^4$

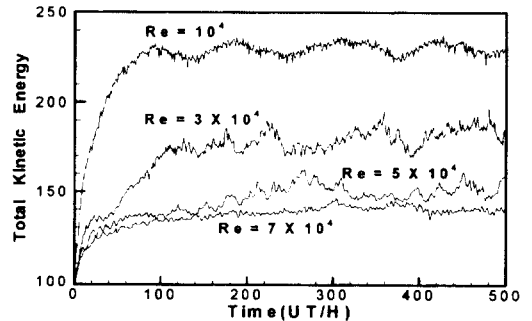


Fig.7 Temporal Fluctuation of Total Kinetic Energy($T=400 - 500$)

이와 같은 결과를 보면 계단에서도 레이놀즈수의 증가에 따른 경향은 밀폐캐비티와 유사함을 알 수가 있다.

그림 7은 무차원 시간 $T=0 - 500$ 까지의 4가지 레이놀즈수의 전운동에너지의 순시변화이다. 비정상흐름의 일시적인 발달은 약 $T=100$ 전후까지 나타내 보인다. 그리고 $Re=10^4$ 까지는 에너지곡선의 불규칙한 변동이 미약하며, 운동에너지의 sine

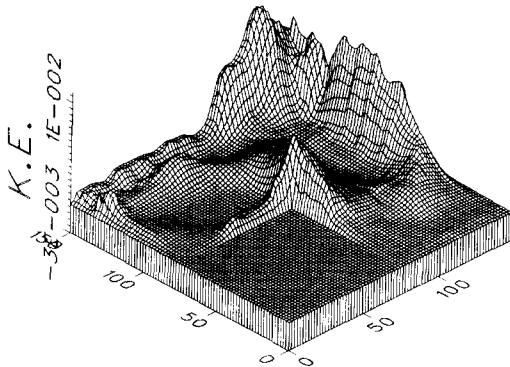


Fig.8 Time-mean Kinetic Energy Distribution (Re=5×10⁴)

곡선의 변동은 모서리부 박리영역에 존재하는 소규모 와류의 이동 때문에 유지된다.

그러나 이 이상의 레이놀즈수에서는 모든 유동 현상이 불규칙하고 고주파수의 변동은 레이놀즈수의 증가와 함께 발견된다. 여기서 레이놀즈수가 증가함에 따라 시간평균 전운동에너지의 값이 작아지는 것은 유동장의 운동에너지가 압력 및 점성력의 형태로 전환되어 있기 때문이다.

그림8은 Re=5×10⁴의 PIV실험 결과⁹⁾로서 유동장의 전체를 임의의 순간에 동시다점계측한 순시 속도벡터로부터 각 위치에서의 운동에너지를 구하여 3차원적으로 도시한 것이다. PIV실험에서는 유동장의 상부에 설치된 무한벨트에 의해 전단운력을 공급하는 대신에 유동장의 상부에 좁은 간격을 두고 여기에 흐르는 Poiseuille유동을 이용하고 있다. 따라서 이를 수치해석의 결과와 직접비교하기는 어렵다. PIV결과에서는 이사분면과 사사분면에 걸쳐 강제와류의 형태를 갖는 주와류가 존재하고 있고, 이사분면의 하측하부와 사사분면의 하부에서 주와류에 의한 2차 와류가 발생되어 있음을 알 수 있다. 와류의 크기와 전체적인 유동형태를 그림4(d)와 비교해보면 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

이 연구에서는 전단구동 L형 캐비티를 대상유동장으로 설정하고, 비압축성유동의 고레이놀즈수에 있어서 와류의 거동을 파악하고자 하였다. 시간

의존적인 비정상유동특성을 검토하기 위하여 다섯 종류의 레이놀즈수(3.2×10³, 10⁴, 3×10⁴, 5×10⁴ and 7×10⁴)에 대한 차분계산을 수행하였다. 그 결과 시간평균의 유동패턴에서는 레이놀즈수에 따른 차이가 크게 나타나지 않았으나 순간의 유동패턴은 Re=10⁴을 제외하고는 매우 불규칙한 비정상유동특성을 나타내었다. Re=3×10⁴를 넘어서는 레이놀즈수에서는 강제와류의 속도분포특성을 상실하고 있다. 이것은 모서리에서 방출되는 와류의 영향 때문으로 판단되며 이 경향은 레이놀즈수가 증가할수록 더욱 커짐을 알 수 있었다. Re=5×10⁴이상에서는 매우 활발한 박리형상 및 다수의 와류발생이 관찰되었다. 그리고 사사분면에서는 모서리에 국한된 와류의 거동이외에 여기에서 방출된 와류들의 이동과 다른 와류의 상호작용에 의한 소멸 및 성장에 의해 하부에 속도분포가 평탄하게 나타나고 있다. Re=7×10⁴에서는 TLV(typhoon-like vortex)와 유사한 와류가 존재하였으며 전운동에너지 및 임의점에서 검출된 속도파형에서 변동 진폭 및 주파수가 크게 나타났다.

참고문헌

1. R. Verstappen, J. G. Wissink, A. E. P. Veldman, "Direct Numerical Simulation of Driven Cavity Flows", Applied Scientific Research, Vol.51 1993, pp.377 - 381
2. U. Ghia, K.N.Ghia and C.T. Shin, "High - Resolution for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method", J. Comp. Phys. 48, 1982, pp.387 - 410.
3. A. Huser and S. Biringen, "Calculation of two-dimensional shear-driven cavity flows at high Reynolds numbers", Int. J. of Numerical Methods in Fluids, Vol.14, 1992, pp.1087 - 1109.
4. Y.H.Lee, J.W. Choi and D.H.Doh, Unsteady Characteristics of a Two-Dimensional Square Cavity Flow, Korean J. Air-conditioning and Refrigeration Eng. Vol. 7 No. 4, 1995, pp.622 - 632.(Korean)
5. C.W.Oosterlee, P.Wesseling, A.Segal and E.Brakkee, "Benchmark Solutions for Incompressible

Navier-Stokes Equayions in General Co-ordinates on Staggered Grid”, Int. J. of Numerical Methods in Fluids, Vol. 17, 1993, pp.301 - 321

6. D.J.Kang, S.S.Bae and D.K.Choi, “An Unstructured Finite Volume Method for the Numerical Calculation of Incompressible Flows”, JSME/KSME of Fluid Eng. Conf., 1998, pp.312 - 316.
7. J.R. Koseff and R.L. Street, “The lid-driven cavity flow:A synthesis of qualitative and quantitative observations”, Trans. ASME, J. Fluids Eng. Vol.106, 1984, pp.390 - 398.
8. C.J. Freitas and R.L. Street, “Non-linear transient phenomena in a complete re-circulating flow:A numerical investigation”, Int. J. for Numerical Methods, Vol.8, 1988, pp.769 - 802.
9. 조대환, 김진구 and 이영호, “구동류를 갖는 계단캐비티의 PIV계측”, 한국해양공학회지, 제12권, 제1호, 1998, pp.113 - 119.

저 자 소 개



박천수(朴燦洙)

1957년 3월10일생, 1978년 목포해양대학교 기관학과 졸업, 1998년 목포대학교 기계공학과 졸업(석사), 1999년~현재 동대학원 박사과정 재학중1급기관사, 1999년 - 현재 목포해양대학교, 기관 공학부 전임강사, 당학회 회원



조대환(趙大煥)

1964년 2월29일생, 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1995년 한국해양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 졸업(공학박사), 1급기관사, 현재 목포해양대학교 전임강사, 당학회 증신회원