

# 자유표면을 갖는 2차원 개방캐비티의 유동특성에 관한 연구

김성동\* · 이영호\*\*

## A Study on Flow Characteristics of Two-Dimensional Open Cavity with Free Surface

Seong-Dong Kim · Young-Ho Lee

### Abstract

A numerical simulation of the unsteady incompressible flow in open cavity is performed by using a SOLA convection scheme by interpolating the coordinates of conservative centered difference formulae on a staggered irregular meshes. Computation is carried out for three kinds of Reynolds number, 104,  $5 \times 10^4$  and  $10^5$ , based on the cavity inlet velocity and cavity height. Irregular grid number is  $122 \times 122$  and its minimum size is about  $1/400$  of the cavity height(H) and its maximum is about  $1/53$  H.

Flow patterns reveal periodic fluctuation during transient and fully developed stages. At  $Re=104$ , the flow is in a continuously developing unsteady regime. These numerical simulation enlighten the action of the main recirculating flow, in the unsteady case, increasing the mean velocity of the recirculating fluid. Power spectrum plots indicate that the unsteady flow oscillates with one fundamental frequency and exhibits some characteristics of transition between laminar and turbulent states.

### 1. 서론

자유표면을 갖는 개방캐비티는 항공기나 차의 표면에 있는 요철부분에 관한 공기역학적 문제나 음파의 발생, 그리고 선박의 환기구조나 개수로유동 등을 설명하는 이상

\* 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 열·유체전공

\*\* 한국해양대학교 기계공학과 교수

적인 모델로서 수치계산과 실험에 의해 빈번히 취급되어 왔으며, 공학적으로 실제 적용하기 위해서는 고레이놀즈수의 흐름에 대한 유동특성의 규명이 필요하다.

캐비티유동은 전형적인 재순환유동이 나타나는 유동장으로서 전단응력을 공급받는 형태에 따라서 다양한 유동현상을 포함하고 있다. 특히 개방캐비티는 전단혼합층의 유동특성, 모서리부분의 박리현상 등을 위시하여 유체공학적으로 매우 흥미로운 유동특성을 나타내고 있다. 캐비티와 같은 내부흐름에서 고레이놀즈수의 유동특성은 모서리부분의 박리, 전단혼합층의 압력 및 속도의 변동현상 등과 같이 대단히 복잡하며, 정상상태를 벗어난 비정상흐름에 대하여는 아직까지 물리적인 완벽한 이해가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 비정상 흐름특성을 규명하기 위해서는 속도 및 압력등의 시계열 분포를 검토하는 기법이 주로 채택되고 있다. 그리고 일정한 시간동안에 유동장의 일부 지점에서의 속도와 운동에너지의 분포 등을 시간진행에 따라 조사하여 주기성을 파악하는 유체역학적 기법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 기법을 이용하여 유동장의 전운동에너지를 유동발달과정에서부터 조사하여 내부유동특성을 규명하고자 하였다.

캐비티유동에 있어서 고레이놀즈수의 비정상유동에 대한 연구<sup>1)~3)</sup>는 주로 모서리부분의 박리와류의 거동과 내부 또는 전단흐름의 경계면등에 시계열적인 데이터를 분석하는 방법이 주류를 이루고 있다. 그러나 대부분 대상 레이놀즈수가  $3 \times 10^4$ 을 넘지 못하고 있고 임계레이놀즈수에 대한 결과<sup>4)</sup>도 정상상태에서 비정상성이 시작되는 임계치를 보고하고 있다.

Sousa 등<sup>5)</sup>은 종횡비가 2:1인 정방형 개방캐비티에서의 비정상유동 특성에 대하여 수치해석과 가시화실험을 행하고 그 결과가 일치함을 보고하고 있다. 실험에서의 계측은 LDA이며 계측된 임계 레이놀즈수는  $Re=3360$ 이다. 그러나 계측점이 캐비티의 상부이고 깊이가 얇아 캐비티 내부유동특성의 결과와 단순비교할 수 없는 점이 지적된다.

Huser 등<sup>6)</sup>은 고레이놀즈수에서의 전단구동(shear-driven)에 의한 정방형 캐비티흐름을 대상으로 하여 엇갈림 격자상에서의 차분법 및 시분활법(time-splitting method)을 채택하여 완전히 발달한 유동장에서 충분히 긴 시간까지의 계산을 행하였다. 그 결과  $Re=3 \times 10^4$ 의 계산에서 다수의 작은 와류(eddy)가 캐비티 모서리부의 박리영역에서 발생하였고 이들의 거동은 매우 불규칙한 비정상 난류의 유동특성을 나타내고 있음을 보고하고 있다. 또한  $x=0.2$ ,  $y=0.084$ 의 위치에서 시계열로 얻은 수평성분 및 수직성분의 상(phase)을 2차원적으로 도시하여 SLA(Spaghetti Like Appearance)라 칭하고 비정상성을 나타내었다.

Mansell 등<sup>7)</sup>은 캐비티 내부의 유체와 성질이 다른 유체에 의하여 전단력을 전달받는 경우에 대해 가시화실험 및 수치해석을 행하고 전단력의 영향에 대한 결과를 보고

하였다.

이와 같은 배경으로 이 연구에서는 자유표면을 갖는 2차원 개방캐비티 유동장을 대상으로 비압축성유체의 고레이놀즈수 흐름특성을 Navier-Stokes 방정식의 해석을 통한 수치해석의 기법으로 규명하고자 하였다. 비정상유동을 관찰하기위해 계산에 선정된 레이놀즈수는  $10^4$ ,  $5 \times 10^4$ ,  $10^5$ 의 3가지이다. 그 결과  $Re=10^4$ 에서 탁월주파수가 0.1922인 정현파의 주기적인 변동특성이 나타났으며 주기성이 상실되는 또다른 임계 레이놀즈수가  $5 \times 10^4$  이하에 존재함을 알 수 있었다.

## 2. 수치계산

본 연구에서는 자유표면을 갖는 2차원 개방캐비티의 내부 유동특성을 규명하고자 하였다. 비압축성, 비정상 및 점성 흐름에 대하여 2차원 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식을 직각좌표계상에서 무차원의 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

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

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

MAC계열의 차분기법은 등간격 격자상에서만 보존형의 대류항을 이용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 수치계산에 있어서 보존형의 기법은 비보존형에 비하여 정도면에서 운동량이 보존됨으로서 물리적인 근거를 유지하고 있는 점이 우수한 점으로 평가될 수 있다. 이 연구에서는 부등간격의 격자상에서 내분의 원리를 이용한 1차의 선형내삽 방법으로 검사면적의 운동량 플럭스를 계산하였으며, 압력항 및 점성항에 관해서도 부등간격격자를 고려한 보정을 행하였다. 속도 및 압력에 관한 완화기법으로서 SOLA의 방법을 택하였다. 이 연구에서는 보존형의 스킴중에서 MAC법의 중심차분을 이용하였다. 그리고 다음과 같이 부등간격 격자상에서 내분의 원리를 이용한 보간식을 적용하였다. 확산항의 차분식에는 2차정도의 중심차분을 이용하며, 다음과 같이 압력항과 함께 부등간격 격자의 보정을 행한다. A는  $\Delta x_i$ 를, B는  $\Delta x_{i+1}$ 를 나타내고 있다.

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)_{i,j} \cong \frac{2}{s(s+1)} \cdot \frac{u_{i+1,j} - (1+s)u_{i,j} + su_{i-1,j}}{A^2}, \quad s=B/A \tag{2.3}$$

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

평판상의 난류유동에 대한 일반속도분포를 수학적으로 기술하기가 매우 복잡하여 운동량적분방정식에 쉽게 적용시킬 수 있는 속도분포를 얻을 수가 없기 때문에, 운동량적분방정식을 사용하여 경계층을 해석할 때에는 실험값으로부터 근사적으로 계산한다.

경계층내의 속도를  $u$ , 주류의 속도를  $U$ , 경계층두께를  $\delta$ , 벽면으로 부터의 거리를  $y$ 라 하면 경계조건을 적용하여 얻은 속도분포는 (2.5)와 같다.

$$\frac{u}{U} = 2\left(\frac{y}{\delta}\right) - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2 \quad (2.5)$$

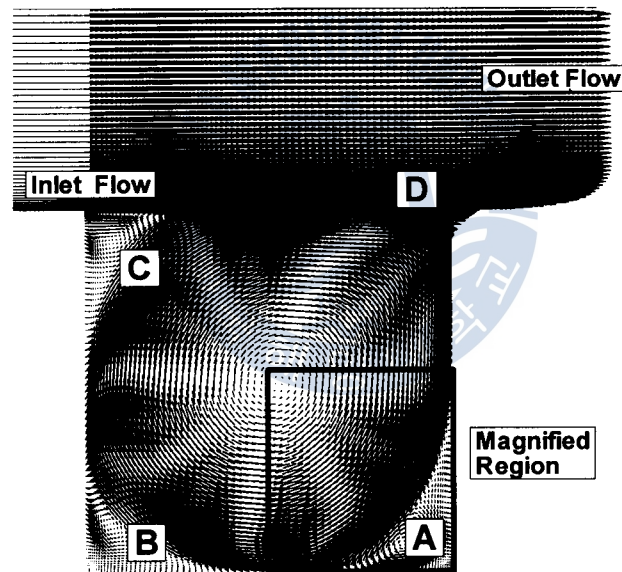


Fig.1 Definition of Pick-up Positions

그림1은 본 연구에서 채택한 2차원 정방형 개방캐비티의 속도성분을 관찰하기 위한 검출점의 위치와 우측하부모서리의 확대영역을  $Re=10^4$ 의 시간평균속도분포도 위에 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 부등간격 격자의 수는  $122 \times 122$ 이고 벽면에서의 최소격자의 크기는 대표길이를 기준으로  $1/400H$ ( $H$ 는 캐비티높이) 전후로 하였으며 캐비티의 중앙부분에서의 최대크기는  $1/53H$ 이며 부등간격격자를 계산하는 식은 Sin 함수를 이용하였다.

### 3. 계산결과 및 고찰

그림2는  $T=250\sim 450$ 사이의 속도를 무차원 시간 1.0의 간격으로 추출하여 시간평균한 뒤에 그림1에서 설정한 우측하부 단면을 각레이놀즈수에 따라 나타낸 것으로 오른쪽 하부 모서리에서 제3와류의 영역이 관찰되고 있다. 레이놀즈수의 증가에 따라 2차와류의 크기는 증가하였다가  $Re=10^5$ 에서는 오히려 주와류의 세력에 밀려 오히려  $Re=10^4$ 의 경우보다 감소하는 점이다. 이러한 점은 차후에 여러레이놀즈수의 계산을 통하여 검토가 필요하다.

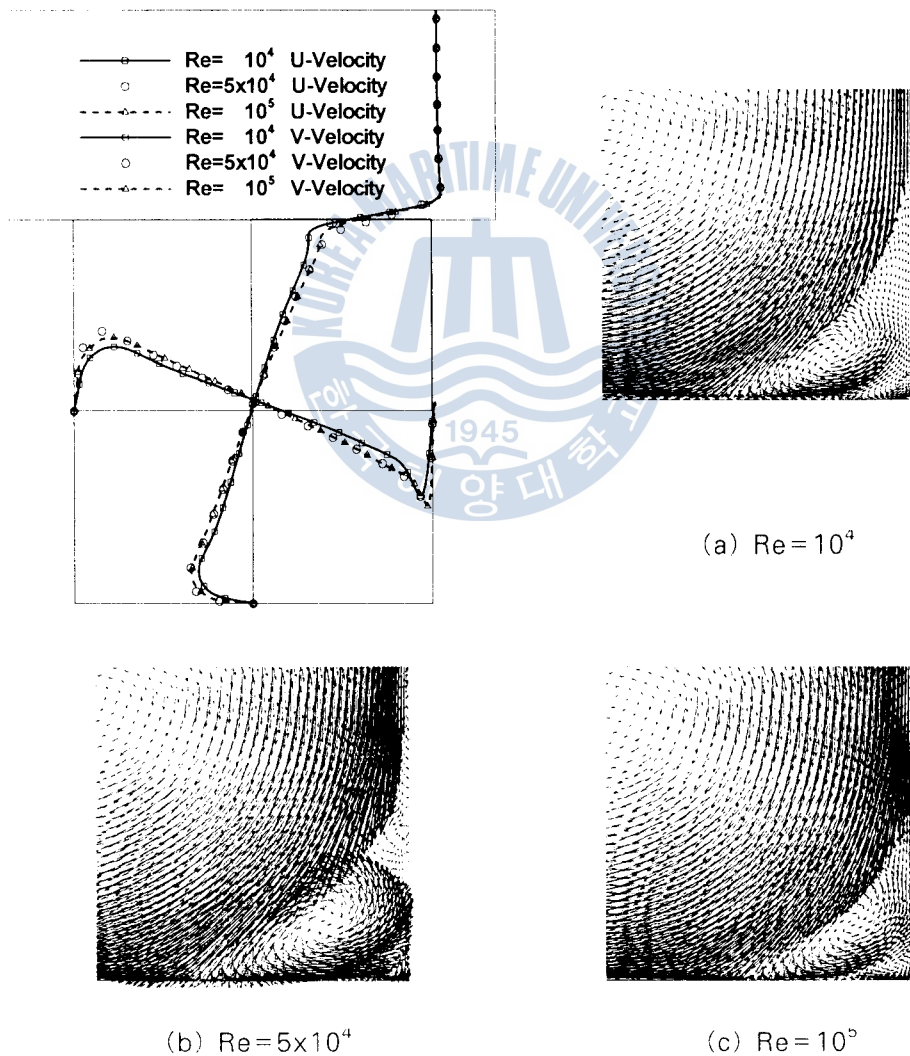


Fig.2 Time-Mean Velocity Profiles ( $T=250-450$ )

그림2의 중앙에는 캐비티를 기하학적 중심선상에 수평속도성분과 수직속도성분을 도시한 중앙속도분포를 보이고 있다.  $Re=10^4$ 에 비하여  $Re=5 \times 10^4$ 과  $Re=10^5$ 의 경우가 다소 크게 나타나고 있다. 이것은 상부의 흐름으로부터 전달 받은 전단응력의 대부분이 강제와류의 경향을 갖는 제1와류를 형성시키는데 이용되고 있음을 나타내고 있다.

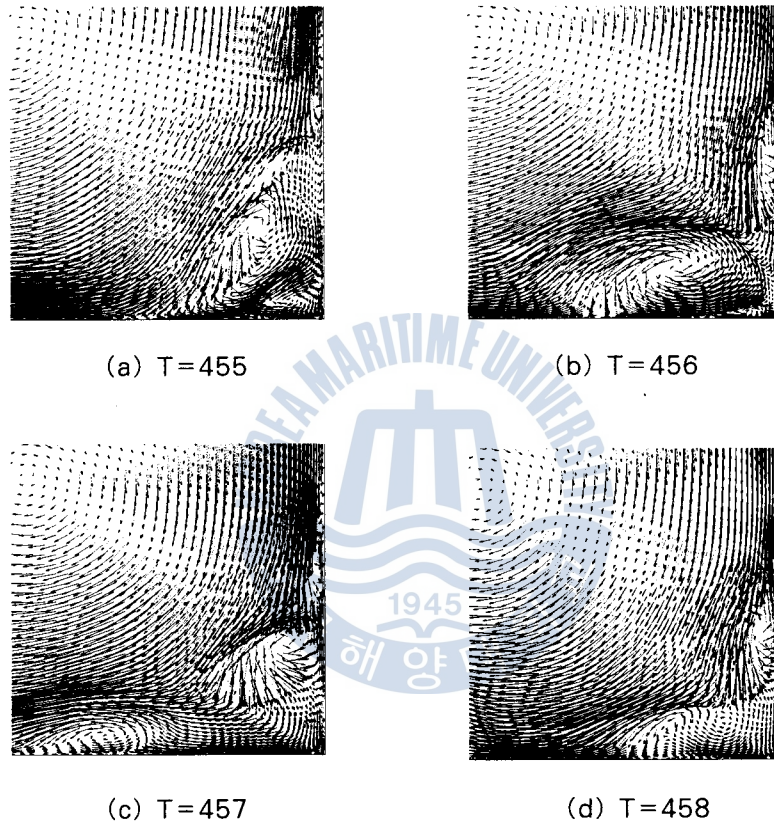


Fig.3 Time-Sequential Flow of Lower Right Corner( $Re=105$ )

그림3은 시계열적인 유동특성을 알아보기 위하여 일정시간간격을 갖는 순시의 속도 분포에서 우측하부모서리 만을 확대하여 보이고 있다. 여기에서는 레이놀즈수( $Re=10^5$ )를 대상으로 무차원시간  $T=455$ 부터 1.0 간격으로 도시한 결과로서 우측 하부 모서리의 주와류의 회전방향으로 박리되어 이동하는 와류의 거동특성을 관찰할 수 있다. 그림에서 보면 우측벽면을 따라 발생한 작은 와류가 모서리영역으로 진입하면서 크기가 증가하여 좌측벽면을 따라 이동하고 있음을 알 수 있다. 이때 반시계방향으로 회전하는 제2와류가 시계방향으로 회전하는 제3와류를 시간진행에 따라 통합과 분리를 반복하면서 주와류의 회전방향으로 진행하여 감을 알 수 있다.

그러나 개방캐비티내부를 전체적으로 순환하는 제1와류가 강제와류로 존재하므로 박리와류의 거동을 보이는 공간의 규모는 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 즉  $Re=10^5$ 의 개방캐비티의 내부유동은 순시적으로는 매우 복잡한 비정상특성을 나타내고 있으나 그림2에서와 같이 시간 평균적으로는 유사한 질서구조를 유지함을 알 수가 있고 이것은 2차원 캐비티 유동장을 대표할 수 있는 중요한 특성중의 한가지로 보여진다.

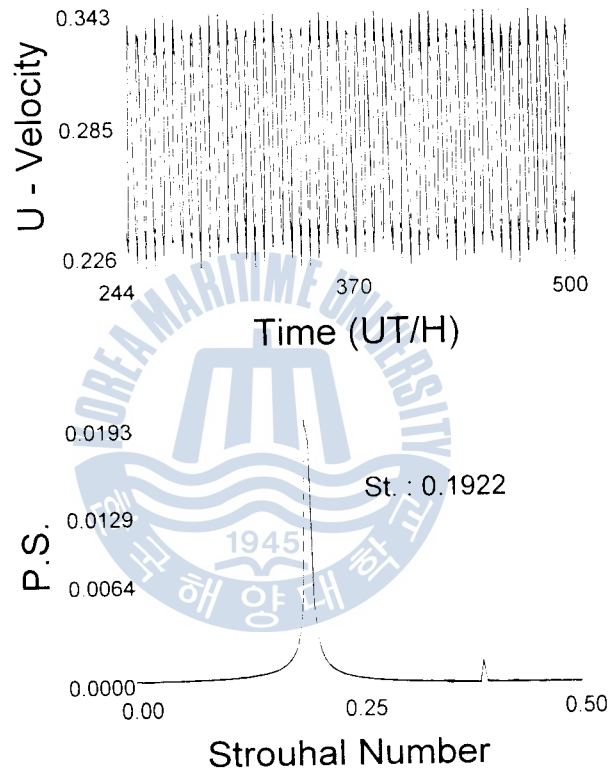


Fig.4 Vertical Velocity Component at  $x/h=0.83$ ,  $y/h=0.12$  ( $Re=104$ )

그림4는  $Re=10^4$ 에서 수평속도성분을 무차원시간  $T=244\sim 500$ 에 대하여 도시하고 분석한 결과 탁월주파수가 0.1922임을 나타내고 있다. 그림5는  $x/h=0.83$ ,  $y/h=0.12$ 에서 무차원시간  $T=400\sim 500$ 까지의 수평속도성분을 무차원시간 1.0의 간격을 두고 2차원으로 도시한 결과이다. 그림5(a)에서는 타원형의 형태를 보이고 있으며 이것은 그 폭만큼의 일정한 주기성을 갖는 비정상 유동특성을 보이고 있다. 그림5(b)는  $Re=5\times 10^4$ 의 경우로서 이러한 주기성이 일부 소멸되어 가고 있다. 그림5(c)의  $Re=10^5$ 에서는 SLA(Spaghetti Like Appearance)와 유사한 경향을 보이고 있다.

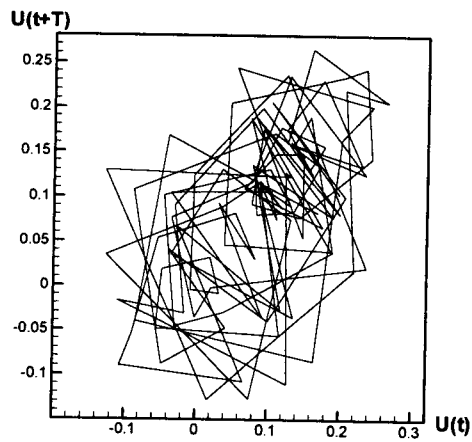
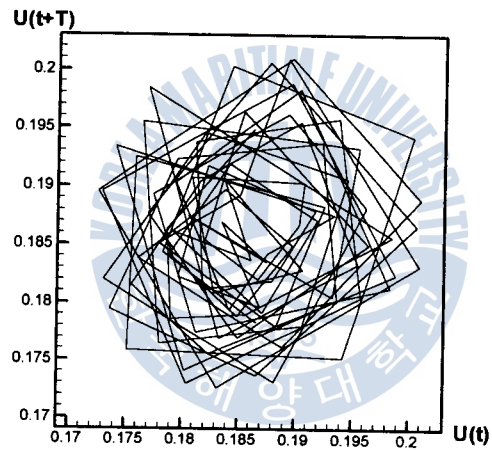
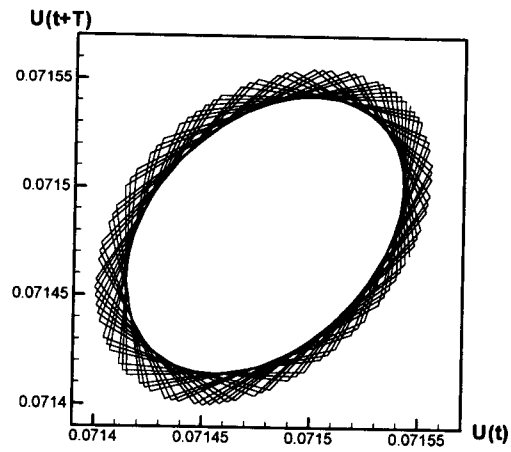


Fig.5 Phase Diagram of U Component



그림6은 전운동에너지를 각 레이놀즈수 별로 도시한 결과이다.  $Re=5 \times 10^4$ 의 경우 주기적인 비정상성이 다소 무질서해 가는 경향을 보이고 있다. 이것은 비정상성이 나타나는 임계 레이놀즈수 외에 주기성이 소멸되는 또 다른 임계 레이놀즈수가 있음을 나타내고 있다.

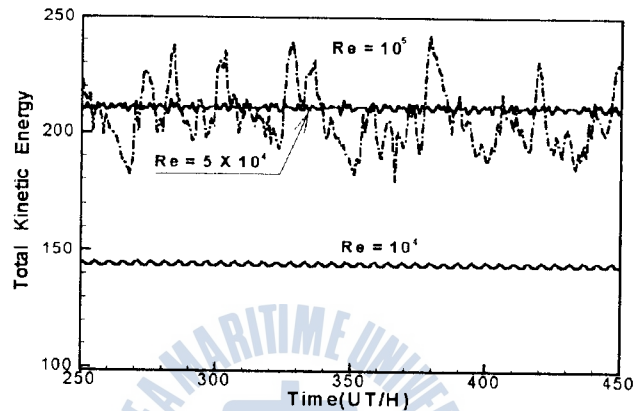


Fig.6 Temporal Fluctuation of Total Kinetic Energy(T=250-450)

#### 4. 결론

본 연구에서는 자유표면을 갖는 2차원의 개방캐비티 유동장에서 고레이놀즈수를 대상으로 유동특성을 전산유체역학의 기법을 동원하여 규명하고자 하였다. 수치해석의 계산방식으로는 실제유동의 정식화를 위해 유한차분법을 사용하였고 2차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식에 대하여 개선된 대류항 기법을 적용한 SOLA 알고리즘을 이용하였다.

계산결과 캐비티 내부에 구동류의 주류방향으로 회전하는 제1의 강제와류가 존재하며 캐비티 상부구동류와 주와류가 혼합되는 영역에서는 전형적인 전단혼합층의 현상이 나타났다.

주파수분석 결과  $Re=10^4$ 에서 탁월주파수가 0.1922인 정현파의 주기적인 변동특성이 나타났다. 그리고 이러한 유동장의 불안정성 특성이 가장 먼저 발생하고 동시에 이들 성분이 증폭되기 시작하는 부분은 캐비티의 우측하부의 박리영역이었다. 이와 같은 특성은 구동류에 의해 전단응력을 공급받는 개방캐비티의 독특한 유동특성으로 추정된다.

비정상성이 시작하는 임계 레이놀즈수는  $10^4$ 이하에 존재하며, 주기성이 상실되는 또 다른 임계 레이놀즈수는  $5 \times 10^4$ 이하에 존재함을 알 수 있었다.

차후의 연구과제로서는 여러가지 레이놀스수에 대한 계산을 통하여 임계 레이놀스수를 확인 하는 연구 및 실험결과와 비교분석이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. F. H. Harlow and J. E. Welch, "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface", Phys. Fluids Vol.8 No.12, 1965, pp.2182-2189.
2. 이영호, "2차원 정방형 캐비티의 비정상유동특성", 대한기계학회 전산유체역학 분과회 학술대회 논문집, 1994 pp.149-167.
3. 최민선, 송치성, 이영호, "2차원 밀폐캐비티의 고레이놀스수 흐름에 관한 연구", 한국박용기관학회지 제20권3호, 1996 pp.101-109.
4. J. Shen, "Hopf Bifurcation of the Unsteady Regularized Driven Cavity Flow", Journal of Computational Physics, Vol.95, 1995, pp.228-245.
5. J. M. M. Sousa and J. C. F. Pereira, "Experimental and Numerical Investigation of Flow Oscillations in a Rectangular Cavity", Transactions of the ASME, Vol.117, 1995, pp. 68-74.
6. A. Huser and S. Biringen, "Calculation of Two-Dimensional Shear-Driven Cavity Flows at High Reynolds Numbers", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.14, 1992, pp.1087-1109.
7. G. Mansell, J. Walter and E. Marschall, "Liquid-Liquid Driven Cavity Flow", Journal of Computational Physics, Vol.110, 1994, pp.274-284.