

입구 유동 가진에 의한 사각 발열체 주위의 유동제어 및 열전달촉진 (I) 유동장 수치해석

리 광 훈[†], 김 서 영^{*}, 성 형 진^{**}

서울시립대학교 기계정보공학과, ^{*}KIST 열유동제어연구센터, ^{**}한국과학기술원 기계공학과

Flow Control and Heat Transfer Enhancement from a Heated Block by an Inflow Pulsation (I) Flow Field Computation

Gwang Hoon Rhee[†], Seo Young Kim^{*}, Hyung Jin Sung^{**}

Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

^{}Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

*^{**}Department of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea*

(Received May 7, 2002; Revision received June 11, 2002)

ABSTRACT: The characteristics of a pulsating flow field from a heated block representing heat-dissipating electronic component in a channel have been numerically investigated. At the channel inlet a pulsating sinusoidal flow is imposed. The Reynolds number based on the channel height (H) is fixed at $Re=500$, and the forcing frequency is varied in the range of $0 \leq St \leq 2$. Numerical results on the time-dependent flow field are obtained and averaged over a cycle of pulsation. The effect of the important governing parameters such as the Strouhal number is investigated in detail. The results indicate that the recirculating flow behind the block is substantially affected by the pulsation frequency. To characterize the periodic vortex shedding due to the inflow pulsation, numerical flow visualizations are carried out.

Key words: Flow mixing(유동혼합), Forced convection(강제대류), Inflow pulsation(입구 유동가진)

기 호 설 명

h : 사각발열체 높이 [m]

H : 덕트 높이 [m]

Re : Reynolds 수, $U_{o_m} H / \nu$

St : Strouhal 수, $\omega H / U_{o_m}$

U : 주유동방향 무차원 속도

V : 벽면 수직방향 무차원 속도

X : 주유동방향 무차원 위치

Y : 벽면 수직방향 무차원 위치

그리스 문자

ν : 동점성계수

ω : 각주파수

τ : 무차원 시간

상첨자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2181; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: ghrhee@uos.ac.kr

' : 난류 요동

- : 시간 평균

하첨자

- c : 대류속도
- o : 시간 평균값

1. 서 론

정보화 기술력의 가속화로 CPU(중앙처리장치)와 메모리 장치 등이 고성능화, 고집적화되어 가고 있다. 반도체 소자의 고집적화는 동일한 조건에서 많은 용량을 고속으로 처리하고자 하는 고성능화를 위해서 필수적이라 할 수 있지만, 그에 따른 과다한 발열은 새로운 문제점으로 부각되고 있다. 고속 CPU 개발은 CPU 자체의 과열과 주변기기 등에서의 발열에 의한 상호 간섭 등으로 심각한 문제를 초래하고 있으며, 충분히 공기조화가 이루어지지 않는 공간에 컴퓨터가 설치되었을 경우에는 비정상 작동을 보이거나 성능이 현격히 저하되는 등의 문제점이 발생하고 있다. 이러한 문제점 해결의 일환으로서 그동안 입구 유동 가진에 의한 열전달촉진을 다룬 몇몇 연구가 발표되고 있다. Ghaddar et al.⁽¹⁾은 수치해석을 통하여 유동 가진에 의한 유동 및 열전달 공진현상을 최초로 보고하였고, Kim et al.⁽²⁾은 채널 내에 설치된 발열체의 열전달성능을 향상시키기 위한 가진 주파수의 영향을 고찰하였다.

가진 주파수 변화에 따른 유동제어는 최근 여러 연구자들에 의하여 연구되어지고 있다.⁽³⁻⁵⁾ Rhee and Sung⁽³⁾과 Chun and Sung⁽⁴⁾은 난류영역에서 후향 계단유동의 박리점에서 주기적인 흡입과 분사를 가함으로써 재순환 영역 축소 현상, 유입증가, 그리고 와병합 등을 각각 수치해석과 실험을 통하여 연구하였다. Kiya et al.⁽⁵⁾은 둔각 물체의 난류 박리 및 재부착 유동에서 둔각의 박리점에서의 유동장 교란에 의한 박리유동 변화를 실험적으로 연구하였다.

CPU 후류의 재순환 영역에서 유동이 국부적으로 정체되어 Chip의 접점온도(Junction temperature)가 상승하면 시스템의 성능은 현격히 저하되게 된다. 본 연구에서는 이러한 재순환 영역을 입구 유동 가진에 의해 제어하기 위한 기초 연구가 수행된다. 따라서 본 연구에서는 비정상, 2차원 타원형 운동량(Navier-Stokes) 방정식을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치결과들은 가진

주파수(f)의 변화에 따라 도시되었으며 물체 높이에 따른 가진 유동장의 특성에 대한 유동 가진 효과규명에 그 초점을 두고 있다.

2. 지배방정식과 수치기법

비압축성 비정상 유동에 대한 무차원화된 지배방정식은

연속방정식;

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식;

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

이다. 위 식에서 Re은 레이놀즈수($Re \equiv U_{o_m} H / \nu$)를 나타낸다. 여기에서 U_{o_m} , H , ν 은 각각 입구에서의 평균 속도, 입구에서의 높이, 점성계수를 나타낸다.

벽면에서의 속도에 대한 경계조건은 점착(no-slip) 조건으로써,

$$U(t) = V(t) = 0 \tag{3}$$

으로 주어졌다. 여기에서 U 는 주유동방향 속도 성분이며 V 는 주유동방향에 수직인 속도성분이다. 유동가진이 가해지는 입구에서는

$$U(Y, t) = U_o(Y) \cdot (1 + A_o \sin(\omega t)) \tag{4}$$

와 같이 주어진다. 여기에서 ω 는 입구에서의 가진 주파수에 2π 를 곱한 각주파수이며, U_o 는 시간 평균 속도 분포인데 포물선 형태로 다음과 같이 주어진다.

$$U_o(Y) = 1.5 \cdot Y \cdot (1 - Y) / 0.5^2 \tag{5}$$

출구에서의 경계조건은 압력을 제외한 모든 변수에 대하여 대류경계조건(convective boundary

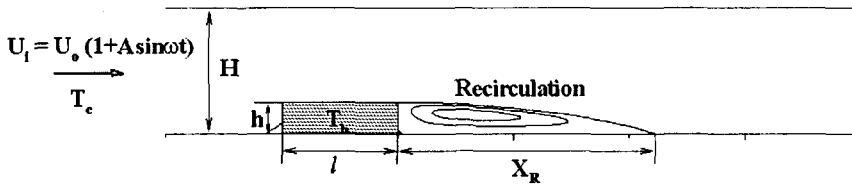


Fig. 1 Schematic diagram of computational domain and relevant coordinates.

condition)으로 주어졌다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + U_c \frac{\partial \phi}{\partial X} = 0 \quad (6)$$

여기에서 X , U_c 는 유동방향의 좌표와 대류속도를 의미한다.

본 연구에서 사용한 수치적 기법을 간단하게 정리하고자 한다. 지배방정식의 차분화는 유한체적법을 사용하였다. 후향계단유동과 같은 타원형 문제해석의 정확도에 가장 큰 영향을 미치는 대류항 처리는 2차 정확도를 가지는 HPLA(hybrid linear and parabolic approximation) 기법을 사용하였다. 격자계는 엇갈림 격자계에 비해서 복잡한 형상에 뛰어난 적용성을 지닌 비엇갈림 격자계를 도입하였고, 이 격자계에서 발생할 수 있는 압력진동 현상을 방지하기 위하여 모멘텀 보간법을 사용하였다. 압력보간은 SIMPLE 알고리즘⁽⁶⁾을 개선시킨 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 최종적으로 얻어진 이산화된 선형 대수연립방정식은 5대가 행렬해법인 SIP(strongly implicit procedure)을 사용하였다. 수렴판정은 모든 격자점에서의 잔류량을 합하여 입구에서의 유량으로 평균화하여 10^{-4} 미만이 될 경우로 선택하였다. 격자

의존도를 없애기 위하여 많은 격자계에 대하여 계산을 행하였고, 그 결과 101×61 의 격자계를 선택하였다.⁽²⁾

3. 결과 및 검토

수치해석의 정확도와 신뢰도를 확인하기 위해 우선 Fig. 1과 같은 기하학적 형상에서, 입구 가진이 없는 정상상태에서의 유동장과 등압력장을 수치계산하여 그 결과를 Fig. 2에서 도시하였다. Fig. 2(a)에서의 유동함수를 보면 물체의 하류면에서 형성되는 재순환 영역이 뚜렷이 나타나고 있는데, 재부착 길이를 측정한 Tropea and Gackstatter⁽⁷⁾의 결과와 잘 일치하고 있으며, Kim et al.⁽²⁾의 결과와도 잘 일치하고 있다. Fig. 2(b)의 등압력선에서는 물체의 앞쪽 모서리에서 전형적인 압력장 형태를 보여주고 있으며, 또한 물체의 후류에서는 후향 계단유동과 유사한 형태의 압력장을 보여주고 있다.

3.1 재부착 길이의 변화

Fig. 3에서는 무차원 주파수의 변화에 따른 물

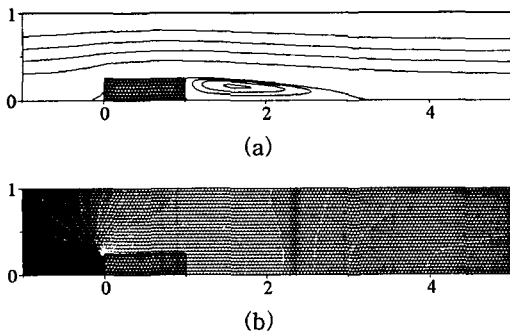


Fig. 2 (a) Streamlines, (b) isobaric lines for steady nonpulsating flow ($A_0=0$).

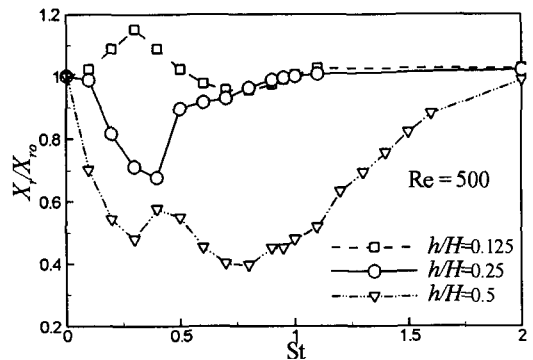


Fig. 3 Normalized reattachment length X_r/X_{r0} against St at $Re=500$.

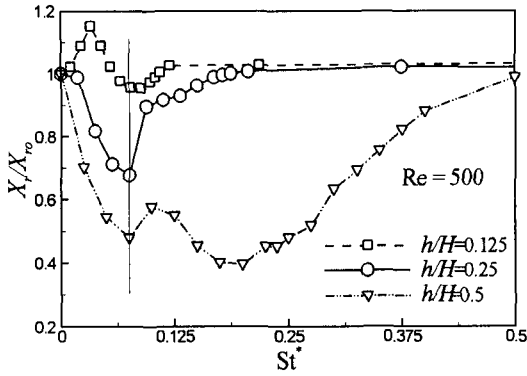


Fig. 4 Normalized reattachment length X_r/X_{r0} against St^* at $Re=500$.

체 하류에서 발생하는 시간 평균 재순환 영역의 길이를 무차원화하여 도시하고 있다. $h/H=0.25$ 의 경우에는 $St=0.4$ 에서 재순환 영역은 최소가 됨을 알 수 있다. 전체적인 경향이 후향 계단유동에서 극소교란을 가했을 때 발생하는 재부착 길이의 무차원 주파수에 따른 변화를 제시한 Chun and Sung⁽⁵⁾의 실험결과, 그리고 Rhee and Sung⁽³⁾의 수치해석결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. $St=0.4$ 에서 재부착 길이는 최소값을 가진 후 주파수가 점점 증가함에 따라 재순환 영역의 크기는 다시 증가하여 가짐을 가하지 않았을 때의 수준으로 회복하고 있다. $h/H=0.125$ 의 경우에는 재순환 영역이 증가하다가 $St=0.3$ 에서 최대값을 보인 후 점점 감소하다가 $St=0.8$ 에서 최소값을 가지고 다시 주파수가 증가함에 따라서 가짐을 가하지 않았을 경우로 회복되고 있다. 또한 $h/H=0.5$ 인 경우에는 재순환 영역이 감소하는 주파수의 폭이 넓고, 두 개의 극소값을 보이고 있다. 최소값을 나타내는 두번째 극소값은 후류에서의 와병합으로 인한 유동현상이라고 사료된다. $h/H=0.125$ 인 경우 재부착 길이가 최소가 되는 점은 $St=0.8$ 이며, $h/H=0.25$ 인 경우는 0.4 이고 $h/H=0.5$ 에서의 첫 극소값은 $St=0.3$ 에서 나타나고 있다. h/H 의 크기에 따라 극소값을 나타내는 St 수는 각각 다른 값을 가지고 있다. 그러나, Fig. 4에서와 같이 윗 벽면의 평균 유속과 물체의 높이로 주파수를 다시 무차원화 ($St^* \equiv St \frac{h/H}{U_{tm}/U_{om}}$) 하면, 물체의 높이에 관계없이 $St^* \approx 0.075$ 의 값에서 극소값을 보이고 있다. 여기에서, U_{tm} 은 윗 표

면을 지나는 유동의 평균 속도이다. 즉, $h/H=0.125$ 의 저주파 영역에서 재부착 길이가 증가하는 영역과 $h/H=0.5$ 에서 와병합(Vortex merging) 현상으로 인하여 유동현상의 변화를 나타내는 영역을 제외하면 물체 높이에 관계없이 상사성을 가지고 재순환 영역의 축소현상을 일으킨다고 사료된다. 즉, 재부착 길이의 감소율은 물체의 높이에 따라 차이가 있지만 주파수 변화에 따라 재부착 길이가 감소 증가하는 유동 변화는 물체의 높이에 관계없다고 생각할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상사 영역에서의 재순환 영역 축소현상을 분석하기 위하여 $h/H=0.25$ 의 경우에 대한 유동해석을 다루고자 한다.

3.2 각 벽면에서의 벽면 마찰계수의 변화

본 절부터는 물체의 높이가 $h/H=0.25$ 에서 재순환 영역이 최소가 되는 $St=0.4$ 인 경우와 재순환 영역이 가짐이 없는 경우로 회복되는 $St=1.0$ 인 경우를 중점적으로 다루고자 한다. 유동 가짐에 의한 벽면 마찰계수의 변화를 Fig. 5에 나타내고 있다. 시간 평균을 취하였을 경우, (a)와 (b)에서와 같이 물체의 상류쪽 표면과 윗 표면에서는 거의 변화가 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 물체의 하류쪽 표면에서는 유동 가짐에 의한 주파수 효과가 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히 $St=1.0$ 의 경우에는 재순환 영

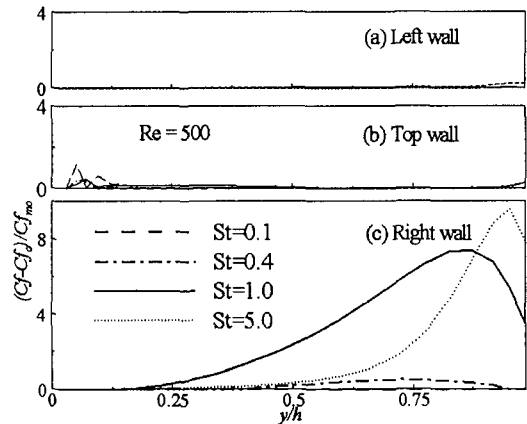


Fig. 5 (a) Left wall; (b) top wall; (c) right wall skin friction coefficient $(C_f - C_{f0})/C_{fmo}$ distributions at $Re=500$.

역에서 뚜렷이 나타나는 공진효과로 인하여 벽면 마찰계수가 입구 가진을 가지지 않았을 경우에 비하여 많은 차이를 보이고 있다. $St=0.1$ 에서는 거의 차이가 나타나지 않고 주파수가 증가함에 따라 벽면 마찰계수의 차이가 점차 증가하게 된다. $St=1.0$ 에서 최대값을 가지며 그 이상 주파수가 증가함에 따라 가진이 미치는 영향은 박리점 부근에 국한되게 된다.

3.3 입구 가진에 의한 유선함수 변화

이러한 벽면 마찰계수의 변화는 Fig. 6, 7에서의 유선함수 분포를 살펴보면 입구 가진에 의한 재순환 영역의 물리적 변화를 해석할 수 있다. Fig. 6에서는 $St=0.4$ 에서의 유선함수 분포를 나타내고 있는데, 재순환 영역에서 형성되는 와류가 강한 세력을 보이고 있다. 그러나, 가진에 의하여 형성되는 유체 와류는 물체의 하류 표면에서 어느 정도의 거리를 두고 형성되어서 발달해가는 과정을 알 수 있다. 재순환 영역의 혼합(mixing)을 다른 주파수에 비하여 많이 증가시키고 재순환 영역의 크기도 가장 많이 감소시킴을

알 수 있다. 그러나 물체의 하류 표면 근방의 유체들은 이러한 조직화된 구조에서 다소 거리를 두고 있기 때문에 Fig. 4의 벽면 마찰계수 변화에서는 많은 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 이와 대비하여 $St=1.0$ 에서의 유선함수 분포를 도시하고 있는 Fig. 7을 살펴보면 입구 가진에 의하여 조직화된 유체 덩어리가 물체의 하류 표면에 Fig. 6와 비교하여 상당히 가까운 거리에서 그 중심을 두고 있다. 즉, 재순환 영역 전체가 아닌 물체의 하류 표면에는 더욱 직접적인 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 따라서 물체의 하류 표면에서의 벽면 마찰계수도 Fig. 5에서와 같이 가진이 없는 경우와 비교하여 많은 변화를 보이고 있다.

3.4 입구 가진에 의한 유맥선 변화

Fig. 8는 $h/H=0.25$ 에서 재순환 영역이 최소화되는 $St=0.4$ 에서의 유맥선(Streaklines)을 보여주고 있다. 활발한 유동장의 변화와 재순환 영역과 윗벽과의 상호작용을 알 수 있다. 재순환 영역의 축소현상은 Fig. 8에서의 섞임 현상에서 그 원인

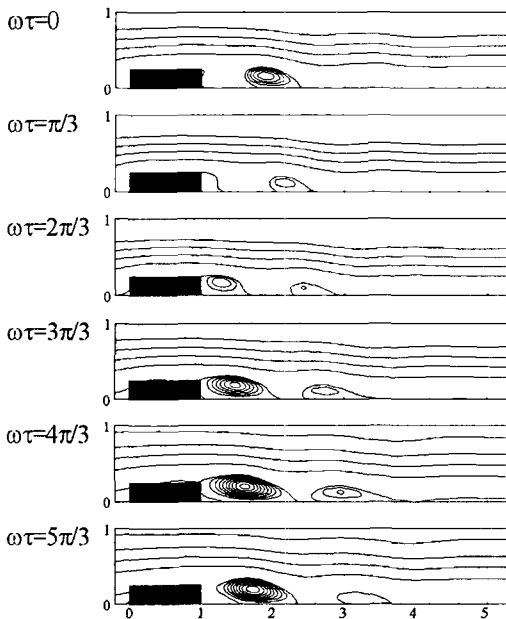


Fig. 6 Time-dependent distributions of streamlines at $Re=500$, $h/H=0.25$ and $St=0.4$.

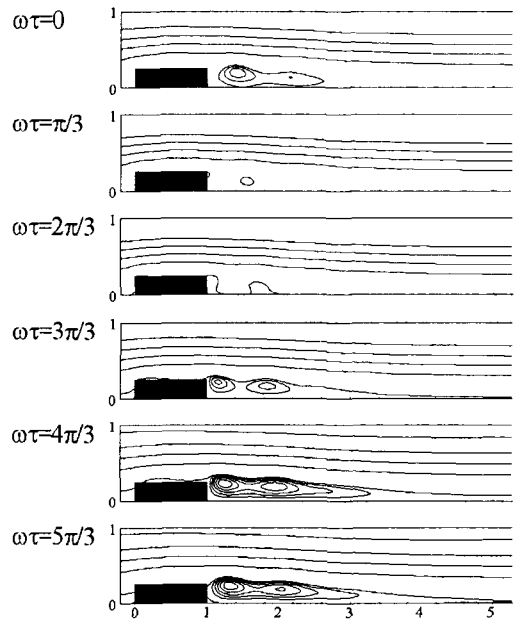


Fig. 7 Time-dependent distributions of streamlines at $Re=500$, $h/H=0.25$ and $St=1.0$.

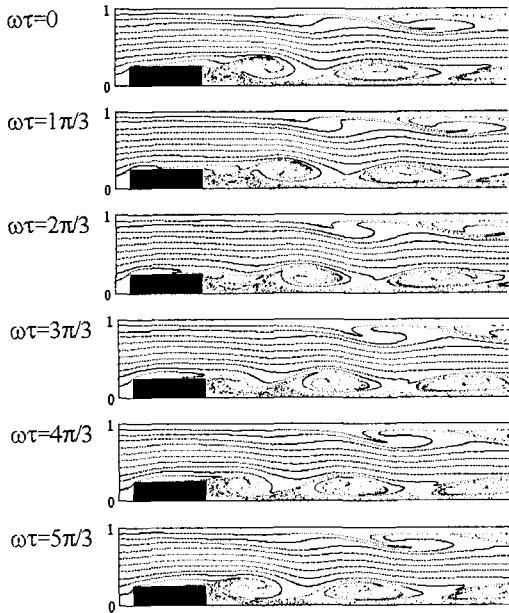


Fig. 8 Streaklines at $Re=500$, $h/H=0.25$ and $St=0.4$.

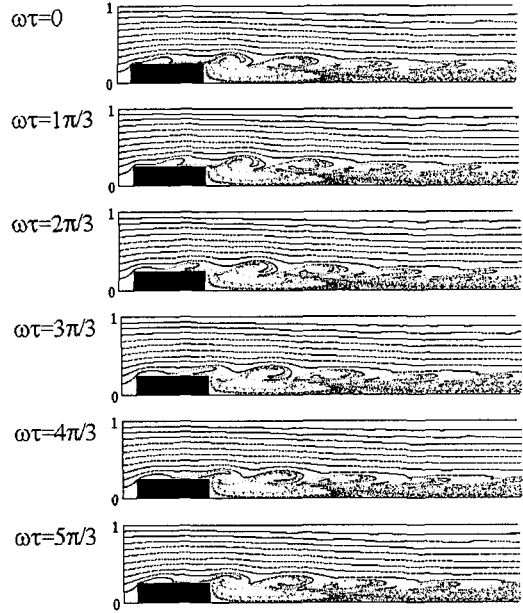


Fig. 9 Streaklines at $Re=500$, $h/H=0.25$ and $St=1.0$.

을 찾을 수 있다. 박리점에서의 유동은 전단 영역에서 매우 불안정(unstable)한 특성을 보인다. 이 불안정한 영역에 고유한 주파수로 가진을 가하면 그림에서와 같이 유동장은 가진 주파수에 동조되게 된다. 그래서 유동장은 매우 조직화된 구조를 가지면서 재순환 영역의 급격한 축소를 유도하게 된다.

Fig. 9에서는 $St=1.0$ 에서의 유맥선을 보여주고 있다. 재순환 영역이 최소가 되는 $St=0.4$ 에 비하여 재순환 영역과 뒷벽과의 상호작용이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서 재순환 영역의 축소는 뒷벽과 재순환 영역의 상호작용에 따라 발생된다고 사료된다.

3.5 입구 가진에 의한 $-\overline{U'V'}$ 변화

속도성분을 시간 평균값과 위상에 따른 변화량으로 분리하면,

$$U_i(t) = \overline{U_i} + U_i'(t)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이때, $-\overline{U'V'}$ 은 난류에서의 레이놀즈 응력과 같이 시간 평균 방정식

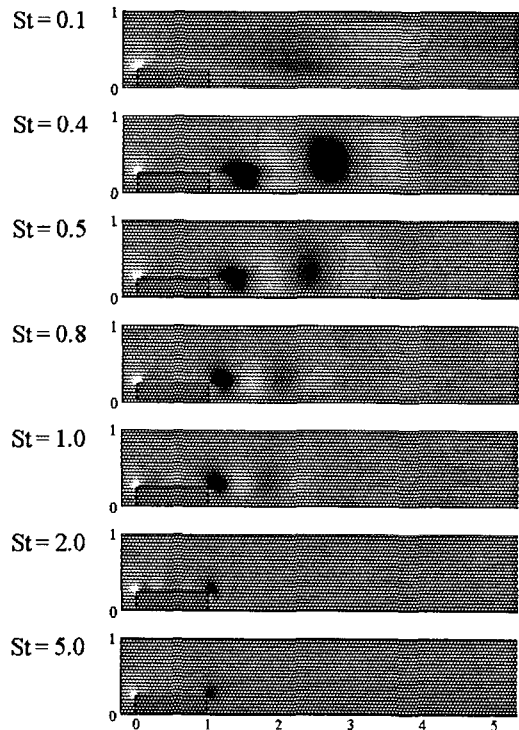


Fig. 10 Distributions of $-\overline{U'V'}$ at $Re=500$ and $h/H=0.25$.

에서 운동량의 추가적인 확산항으로 작용하게 된다. 그 값은 유동혼합(Flow mixing)의 크기를 대변할 수 있다.

Fig. 10에서는 $-\overline{U'V'}$ 의 한 주기 동안의 평균값을 보여주고 있다. $-\overline{U'V'}$ 의 절대적인 값과 그 영역의 크기는 $St=0.4$ 에서 보다 크게 나타난다. 이러한 사실은 입구 가진에 의한 유동장의 변화가 $St=0.4$ 인 경우에 크게 나타난다고 설명할 수 있다. 유백선의 변화에서와 같이 윗벽과의 강한 상호작용 현상도 나타나고 있다. 저주파 영역인 $St=0.1$ 의 경우에는 넓은 영역에 걸쳐 값을 나타내고 있지만 $-\overline{U'V'}$ 의 절대값이 미약함을 알 수 있다. $St=2.0$ 이상의 고주파 영역에서는 급격히 그 영역이 축소되고 절대값 역시 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 재순환 영역의 축소 현상은 이와 같은 $-\overline{U'V'}$ 과 강한 상관관계가 있음을 알 수 있다.⁽²⁾

4. 결 론

본 연구에서는 입구에서의 유동 가진이 물체 주위의 유동에 미치는 영향을 가진 주파수에 따라 해석하였다. 벽면 마찰계수와 속도의 주기적 성분에 대한 위상 평균값의 수치적 유동 가시화를 통하여 각 조건에서의 최적 주파수로 가진하였을 경우에 유동이 가장 조직화됨을 발견하였다. 또한 풍부한 수치자료를 바탕으로 버블의 생성, 병합 및 소멸과정에 대한 수치 유동 가시화를 시도하였다. 주기적 성분의 평균 유동장을 시간의 경과에 따라 변화하는 동적 변화과정을 해석하였다. 이러한 해석을 통하여 물체 주위의 유동의 재순환영역이 최소가 되는 최적 주파수를 발견하였다. 동일한 에너지로 가진을 가함에도 불구하고, 최적의 조건이 존재하여 유동장을 제어할 수 있다는 결과와 유동장 제어의 물리적 과정을 밝혀내었다.

후 기

이 연구는 과학기술부 국가지정연구소 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ghaddar, N. K., Magen, M., Mikic, B. B. and Patera, A. T., 1986, Numerical Investigation of Incompressible Flow in Grooved Channels, Part 1. Stability and Self-sustained Oscillations, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 163, pp. 99-127.
2. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Jaluria, Y., 1998, Thermal Interaction between Isolated Heated Electronic Components in Pulsating Channel Flow, *Numerical Heat Transfer Part A-Applications*, Vol. 34, Iss. 1, pp. 1-21.
3. Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, Numerical Prediction of Locally-forced Turbulent Separated and Reattaching Flow, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 26, Issue 6, pp. 421-436.
4. Chun, K. B. and Sung, H. J., 1996, Control of Turbulent Separated Flow over a Backward-facing Step by Local Forcing, *Exp. Fluids*, Vol. 21, pp. 417-426.
5. Kiya, M., Shimizu, M., Mochizuki, O., Ido, Y. and Tezuka, H., 1993, Active Forcing of an Axisymmetric Leading-edge Turbulent Separation Bubble, *AIAA paper* 93-3245.
6. Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York.
7. Tropea, C. D. and Gackstatter, R., 1985, The Flow over two-dimensional surface-mounted obstacles at low Reynolds numbers, *Transactions of ASME Journal of Engineering*, Vol. 107, pp. 489-494.