

장애물이 부착된 평판 사이 유동의 불안정성에 관한 파라미터적 연구

황인상[†] · 양경수^{*} · 김도형^{**}

(2000년 9월 20일 접수, 2001년 2월 19일 심사완료)

Parametric Study of Instability in Obstructed Channel Flow

In-Sang Hwang, Kyung-Soo Yang and Do-Hyeong Kim

Key Words: Instability(불안정성), Hopf Bifurcation(호프 분기), Reattachment(재부착), Baffle(장애물), Recirculation(재순환)

Abstract

A Parametric study is numerically carried out for flow fields in a two-dimensional plane channel with thin obstacles("baffles and blocks") mounted symmetrically in the vertical direction and periodically in the streamwise direction. The aim of this investigation is to understand how various geometric conditions influence the critical characteristics and pressure drop. A range of BR(the ratio of baffle interval to channel height) between 1 and 5 is considered. Especially when BR is equal to 3, for which the critical Reynolds number turned out to be minimal, we add blocks in the center region in order to study their destabilizing effects on the flows. It is revealed that the critical Reynolds number is further decreased by the presence of the block.

기호설명

- | | |
|---|---|
| BR : Baffle ratio ($\frac{L}{D_c}$) | (Critical Reynolds Number) |
| D_b : Block의 높이 | ΔP : baffle 사이의 평균압력차이 |
| D_{ba} : Baffle의 높이 | PG : 평균 압력구배 ($\frac{\Delta P}{L}$) |
| D_c : 채널간격 | t : 무차원화된 시간($t^* \frac{U_m}{D_c}$, t^* 는 시간) |
| L : Baffle 사이의 간격 | U_m : 채널내 유량 평균속도 |
| Gr : 성장률(Growth rate) | X_R : Baffle로부터 재부착점까지의 거리 |
| Re : 레이놀즈수($\frac{U_m D_c}{\nu}$) | ρ : 밀도(density) |
| Re_c : 임계레이놀즈수 | u_i : 2차원 속도성분 |
| [†] 책임저자, 인하대학교 대학원 | μ : 점성계수(coefficient of viscosity) |
| [*] 회원, 인하대학교 기계·항공·자동차공학부 | ν : 동점성계수(coefficient of kinematic |
| E-mail:ksyang@inha.ac.kr | viscosity $\frac{\mu}{\rho}$) |
| TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716 | |
| ^{**} 인하대학교 대학원 | |

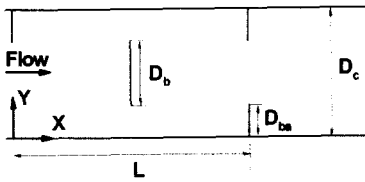


Fig. 1 Geometric configuration

1. 서론

평판에 장애물이 부착된 형상은 일반적인 열교환기 및 난류발생기에서 많이 볼 수 있는 형태로서 동일한 레이놀즈 수를 기준으로 했을 때 장애물을 부착하면 유동불안정성을 촉진하고 열교환기에 있어서는 전열면적의 확대와 유동의 혼합(mixing) 및 분산(dispersion)현상을 초래하여 열 전달효율을 높여 주는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁻³⁾

2차원 채널유동의 유동불안정성은 임계레이놀즈수 이상에서의 분기(bifurcation)현상에 의해 설명되어왔다.⁽⁴⁻⁶⁾ 분기현상에 있어 임계레이놀즈수는 이를 기준으로 유동불안정성이 나타나므로 중요한 수치라 할 수 있다. 또한 장애물의 길이나 간격이 다른 형상에 대하여 임계레이놀즈수와 형상간의 상관관계 및 압력강하와 형상간의 상관관계는 유동연구 및 열교환기 설계의 기초자료로서 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 Roberts⁽⁴⁾의 실험에서와 같이 평행한 두 평판에 주유동방향으로 얇은 판(baffle)을 주기적으로 부착하고 배플 사이의 간격과 평판사이의 거리의 비를 1부터 5까지 순차적으로 증가시키며 수치해석을 이용하여 Hopf 분기를 관찰하였고, 더 나아가 배플사이의 중앙에 같은 형태의 판(block)을 부착하여(Fig. 1) 이것이 유동장 및 유동불안정성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 배플만 부착된 경우에 있어 배플 사이의 간격과 임계레이놀즈수의 관계 및 평균압력강하와의 관계를 살펴보고 위의 계산결과 가장 유동상태가 불안정하게 나타난 BR이 3인 경우 유동장에 삽입된 블록의 크기(D_b)가 변할 때⁽⁷⁾의 유동상태 및 유동불안정성을 고찰하였다. 또한 이러한 유동장의 모드해석을 통해 가시화 결과와 비교해 보았다. 이와 같은 유동정보는 열교환기 및 난류발생기의 설계에 큰 도움이 될 것이다.

2. 수치해석기법

2.1 지배방정식 및 수치해석기법

본 연구에서 나오는 모든 변수는 U_m 과 D_c 로, 압력차이는 $\frac{1}{2} \rho U_m^2$ 로 무차원화 되었다. 본 연구에서는 비압축성 유체에 대하여 다음과 같은 연속방정식과 2차원 비정상 Navier-Stokes 방정식이 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (j=1,2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)시키기 위하여 Fractional Step Method⁽⁸⁾가 적용되었고, 부가적으로 얻어지는 Poisson 방정식은 다격자법(multigrid method)을 적용하여 해를 구하였다. 모멘텀방정식의 시간에 따른 적분은 복합적인 형태로서, 대류항(convective terms)은 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법으로 외재적으로 적분하였고, 점성항(viscous terms)들은 Crank-Nicolson 방법으로 내재적으로 적분이 수행되었다. 공간에서의 차분은 유한체적법을 적용한 중앙차분법(Central Differencing)을 이용하였고 격자계는 주어진 형상에 대하여 가장 적합한 비균일 엇갈림 직교격자계(Nonuniform Staggered Cartesian Grid)가 사용되었다.

2.2 경계조건 및 유동파라미터

모든 고체면에서는 no-slip 조건을 사용하였고 주유동방향으로는 주기조건을 사용하여 유동방향으로 날카로운 장애물이 주기적으로 아래 위 평판에 부착된 경우를 고려하였다. 또한 본 연구의 후반부에서는 배플과 배플의 사이에 또 하나의 장애물(block)을 대칭적으로 놓은 경우도 고려하였다(Fig. 1). 본 논문에서 유동의 불안정성은 중간선 ($y=0.5$)에서 속도의 y 방향성분의 절대값을 적분한 후 배플 사이의 간격(L)으로 나눈 V_{cr} 의 거동으로 판정하였다.^(4,5)

$$V_{cr} = \frac{1}{L} \int_0^L |v(x, 0.5)| dx \quad (3)$$

상하대칭의 형상이므로 정상상태의 유동은 상하대칭유동이어야 하고 V_{cr} 의 값은 0이 되어야 한다. 만일 유동이 불안정해지면 V_{cr} 의 값이 지수적으

로 증가하고 유동의 대칭성이 없어지게 된다. 본 유동에서 유동발생원인은 배플 사이의 일정한 압력차이(ΔP)이며 평균압력구배(PG)는 ΔP 를 L 로 나누어 구하였다. $\frac{D_{bc}}{D_c}$ 는 Roberts의 실험에서와 같은 0.25이다. 본 논문에서는 ΔP 를 일정하게 유지하고 유량이 시간에 따라 변동하는 조건을 사용하였다. 즉 정지된 유체에 일정한 ΔP 를 갑자기 적용시켜 유동을 유발한다.

3. 결과 및 논의

3.1 코드의 검증

본 연구에서 사용된 코드에 대한 검증으로는 배플만 부착되고 BR이 1.456인 경우에 대해 Roberts⁽⁴⁾의 유선함수를 사용한 2차원계산과 비교하였다(Fig. 2). 여기서 Gr은 V_{cl} 의 성장률로서 시간에 따른 증분을 의미한다. 임계레이놀즈수는 Gr이 0이 되는 지점에서의 레이놀즈수이다. 본 연구에서 사용된 코드를 이용한 수치계산치와 Roberts의 계산치가 잘 일치되었고, 검사체적(Control Volume)의 개수로는 64×64 , 96×96 , 192×96 의 경우로 계산한 결과 96×96 이상에서는 Gr값에서 0.2%이내의 오차만을 보여 본 연구에서는 이 해상도를 채택하였다.

3.2 Baffle만을 부착했을 때

Fig. 3은 임계레이놀즈수 이하에서 수렴된 정상상태의 유동장을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 유

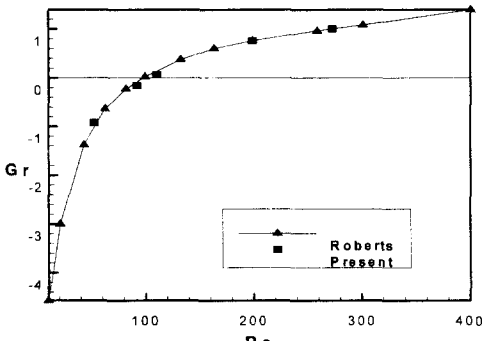


Fig. 2 Instability growth rate vs. Re ; BR=1.456

동은 상하대칭이며 상류쪽 baffle의 뒷면에 재순환 구역이 존재함을 알 수 있다. 이는 Roberts의 선행 연구에서 BR=1.456 Re=58.5 일 때와 비교하면 유동장의 양상이 매우 흡사함을 알 수 있다.^(4,9) 본 논문에서 BR=3을 예로 든 것은 연구결과 이 때의 임계레이놀즈수가 가장 낮게 나타났기 때문이다.

Fig. 4와 Fig. 5는 임계레이놀즈수 이상에서의 Re와 V_{cl} 을 시간에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 V_{cl} 이 증가함에 따라 Re는 일정한 값에 수렴하고($20 \leq t \leq 25$) 유동장의 모양은 Fig. 3과 같은 대칭해에 접근하게 된다. V_{cl} 은 계속해서 증가하다 일정한 값에 근접하게 되면 더 이상 증가하지 않고 주기적인 양상을 띄게 된다. 이때 비정상 주기유동으로 변하는 분기가 발생함을 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 주기유동에서의 레이놀즈수를 분기 후의 평균 레이놀즈수로 나타내었다. 즉 이 경우 U_m 은 분기후의 유량평균속도이다. Fig. 6을 통해 이때의 유동장을 살펴보면 상류쪽 배플의 뒷면에서 주기적으로 와류들이 생성되고

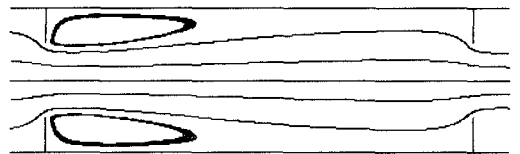


Fig. 3 Streamlines of steady flow ; Re=69.2, BR=3

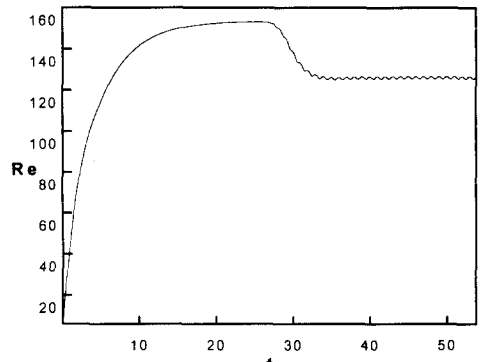


Fig. 4 Time history of Re(baffles only) ; Re=127, BR=3

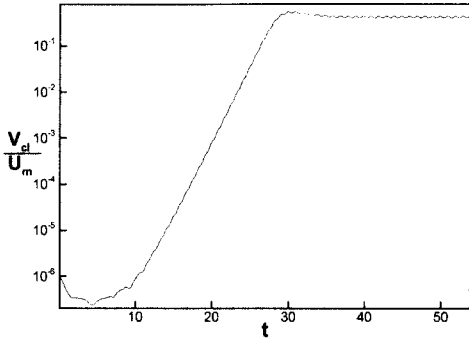


Fig. 5 Time history of V_{cl} (baffles only) ; $Re=127, BR=3$

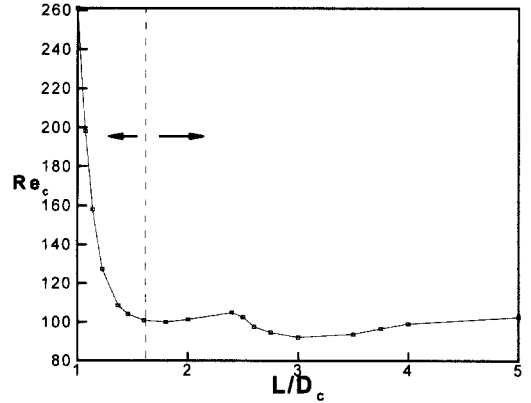


Fig. 7 Critical Re vs. BR

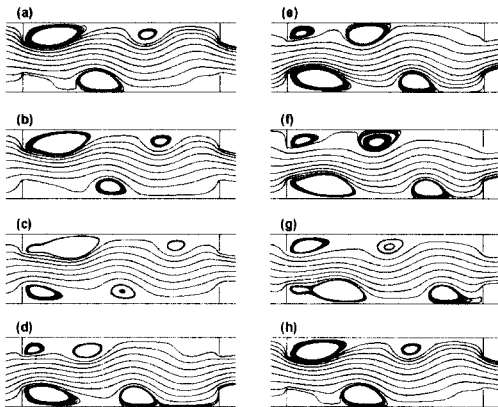


Fig. 6 Streamlines of unsteady flow at equal intervals during one period of time ; $Re=127, BR=3$

생성된 와류는 벽면을 따라 다음 배플까지 진행됨을 알 수 있다. 또한 Re 가 상당히 큰 값일 때는 선행연구에서와 같이 비정상 주기유동상태의 V_{cl} 이 2개의 피크를 갖는 sub-harmonic 현상도 관찰되었다.^(4,5)

Fig. 7은 임계레이놀즈수와 BR 과의 관계를 나타낸 것으로 BR 이 1.5 부근을 기점으로 해서 상당히 다른 양상을 보임을 알 수 있다. 점선왼쪽의 구간 즉 BR 이 1.5 이하인 경우 BR 이 감소함에 따라 급격하게 임계레이놀즈수가 증가함을 볼 수 있고, 1.5 이상에서는 임계레이놀즈수가 100부근에 형성됨을 볼 수 있다.

Fig. 8은 BR 에 따른 임계레이놀즈수와 평균압력

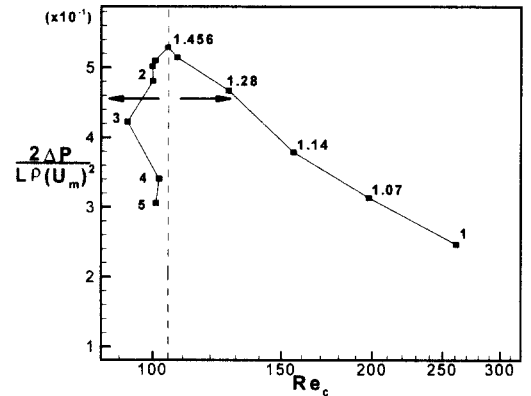


Fig. 8 Mean pressure gradient vs. critical Re with various BR

구배(PG)와의 관계를 나타낸 것이다. BR 이 1.5 이하에서는 평균압력구배역시 BR 과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 그러나 BR 이 1.5 이상에서는 그 변화양상이 현저히 달라지고 평균압력구배는 Fig. 8의 점선 왼쪽과 같이 불균일한 분포를 보임을 알 수 있다. 위에서 BR 은 1.5를 기점으로 임계레이놀즈수 및 평균압력구배가 Fig. 7, Fig. 8의 점선양쪽과 같이 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있었다.

가장 대조적인 양상을 보인 BR 이 1일 때와 2일 때 임계레이놀즈수와 아주 근접한 Re 에서 분기가 일어나기 직전 유동장의 양상을 유선을 통해 비교해보면 Fig. 9와 같이 전자의 경우(a)는 배플뒷면의 재순환구역에서 유동의 재부착점 자체가 형성되지 않는 것을 볼 수 있고, 후자의 경우(b)는 상류 배

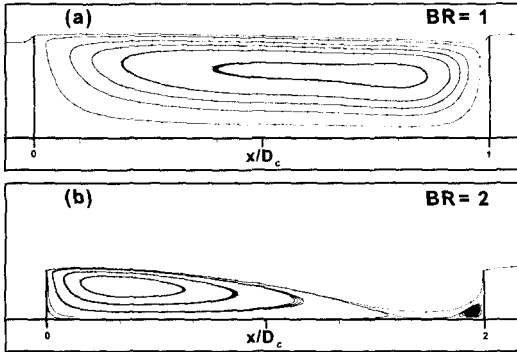


Fig. 9 Streamlines with different BR ; (a) Re=261, (b) Re=99.92

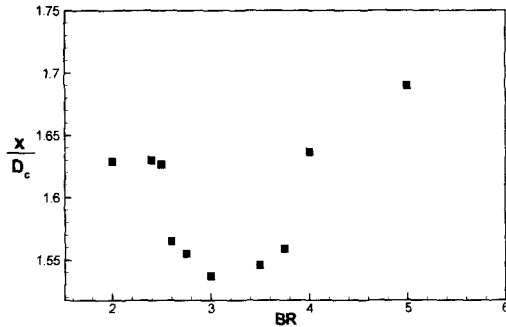


Fig. 10 Reattachment length for various BR

플로부터 일정한 거리에서 재부착점이 생성됨을 볼 수 있다. 여기서 x 축은 배플로부터의 거리를 의미한다. 이러한 경향은 $BR=1.5$ 를 기준으로 BR 값이 작을 때와 클 때 Fig. 9(a) 혹은 Fig. 9(b)의 양상으로 각각 관찰되었다.

Fig. 10은 BR 이 2 이상에서 재부착점과 BR 과의 관계를 나타낸 그래프이다. 각 경우에 있어 레이놀즈수는 임계레이놀즈수에 최대한 근접한 상태에서 재부착점을 관찰하였다. 그림에서 보듯이 BR 이 2 이상에서 재부착점의 양상은 3부근에서 다른 경우보다 X 값이 작게 나왔고, 실제 Fig. 7에서와 같이 BR 이 3인 경우 임계레이놀즈수가 92 부근으로서 계산한 결과 중에는 가장 낮게 나타났다. 또한 BR 이 2.4인 경우 임계레이놀즈수가 104 부근으로서 유사한 BR 중에는 가장 높게 나타났다. 이상으로부터 BR 이 2 이상에서는 재부착점의 거리는 임계레이놀즈수와 연관되어 있음을 알 수 있다.

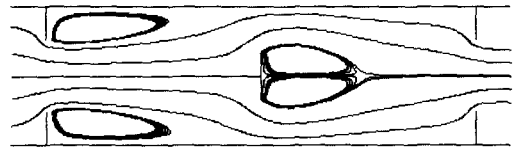


Fig. 11 Streamlines of steady flows ; Re=60, BR=3, $D_b = \frac{1}{3} D_c$

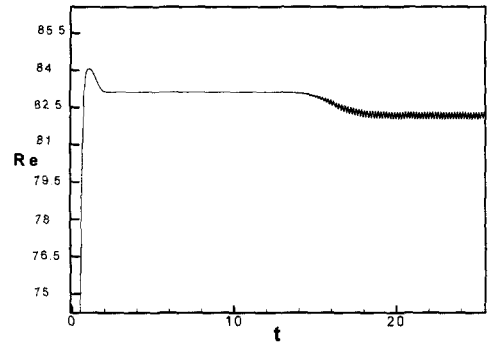


Fig. 12 Time history of Re (Baffles and blocks) ; Re=82.2, BR=3, $D_b = \frac{1}{3} D_c$

3.3 baffle 및 block을 부착했을 때

3.2절에서 평판에 배플만이 부착된 경우 BR 이 3에서 임계레이놀즈수가 가장 낮음을 보였다. 이 절에서는 배플과 배플사이에 Fig. 11과 같이 블록을 부착했을 때 유동장 및 유동불안정성이 어떠한 영향을 받는 지에 대해 알아보았다.

Fig. 11은 $D_b = \frac{1}{3} D_c$ 이고 임계레이놀즈수 이하에서의 수렴된 정상상태 유동장이다. 유동은 상하대칭이며 배플과 블록의 뒷면에 각각 재순환구역이 존재함을 볼 수 있다.

Fig. 12, Fig. 13은 블록이 부착된 상태에서 임계레이놀즈수 이상의 Re와 V_{cl} 의 양상을 시간에 대해 나타낸 것이다. 이를 배플만을 부착했을 때의 Re 및 V_{cl} (Fig. 4, Fig. 5)과 비교하면 Re가 최고점을 지난 후 어느 정도 감소하여 정상상태에 도달한 후 분기가 일어남이 관찰되었다. V_{cl} 의 양상은 배플만을 부착했을 때와 크게 다르지 않았으나 임계레이놀즈수 보다 낮은 Re에 대해서는 배플만을

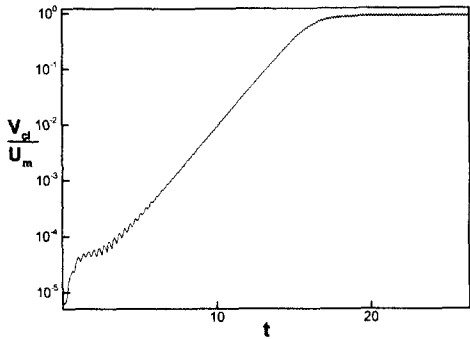


Fig. 13 Time history of V_{cl} (baffles and blocks) ; $Re=82.2$, $BR=3$, $D_b = \frac{1}{3} D_c$

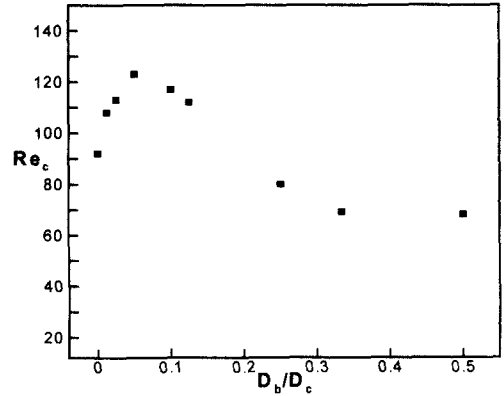


Fig. 15 Critical Re of different block height, $BR=3$

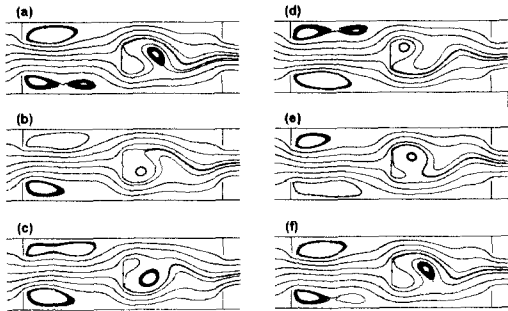


Fig. 14 Streamlines of unsteady flows at equal intervals during one period of time ; $Re=82.2$, $BR=3$, $D_b = \frac{1}{3} D_c$

부착한 경우 V_{cl} 은 지속적으로 감소하는 양상을 보이지만 Fig. 14에서 보듯이 블록 뒷면의 재순환 유동에 의해 일정한 값으로 접근함이 관찰되었고 이때의 Gr 은 0으로 간주하였다.

Fig. 14는 이 경우의 수렴된 비정상주기유동의 유동장을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 배플 뒷면에서 발생하는 주기적인 와류(vortex)는 벽을 따라 다음 배플까지 이동하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 블록을 부착했을 때는 Fig. 14에서와 같이 블록 뒷면에서 블록에 의한 주기적인 와류shedding이 발생함을 볼 수 있고, 또한 배플에 의해 발생된 와류가 블록의 뒷면에서는 관찰되지 않았다.

Fig. 15는 D_b 를 채널높이에 대해 $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{20}$, $\frac{1}{40}$, $\frac{1}{80}$ 로 변화시키며 각각의 경우 임계

레이놀즈수를 구해보았다. 그림에서 보듯이 임계레이놀즈수는 블록의 크기가 $\frac{1}{2}$ 일 때 가장 낮음이 관찰되었다. 이는 블록이 없이 배플만 부착된 경우보다 낮은 것이다. 또한 D_b 가 작아짐에 따라 점점 증가하다가 $\frac{1}{20}$ 보다 작아지면 다시 작아지는 양상을 보였다. 즉 블록의 높이에 따라 유동불안정성이 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

3.4 baffle과 block을 부착했을 때의 유동장에 대한 Fourier mode 해석

앞 절에서 장애물을 부착했을 때 유동장은 BR 과 D_b 에 많은 영향을 받음을 알 수 있었다. 이 절에서는 배플과 블록을 부착했을 때의 유동불안정성을 Fourier mode 해석을 통해 알아보겠다.

Fig. 16은 완전히 수렴된 비정상 유동상태의 무차원화된 V_{cl} 을 모드해석한 결과로서 (a)는 배플만을 부착한 경우, (b)와(c)는 각각 배플과 블록이 부착되어 있으며 블록의 뒷면에서 배플에 의해 생성된 와류가 관찰되지 않는 경우(b), 배플과 블록이 부착되어 있으며 블록의 뒷면에서 배플에 의해 생성된 와류가 관찰된 경우(c)로서 (a)-2, (b)-2, (c)-2는 각각의 V_{cl} 을 푸리에 변환한 결과이다. 그림에서 y축은 에너지($|\phi|^2$)를 x축은 파동수(k_x)를 의미한다. 각 경우에 있어 유사한 레이놀즈수에 대해 가장 energy가 큰 모드를 비교해 보았다.

평판에 배플만이 부착된 유동에서는 배플이 유

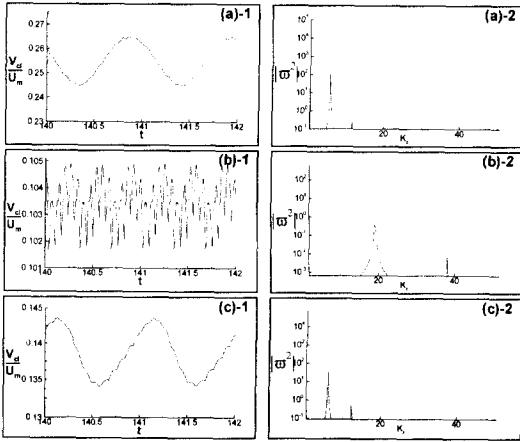


Fig. 16 Fourier Transform of V_{cl} at $BR=3$; (a) only baffles ($Re=121$), (b)baffles and blocks ($Re=120, D_b = \frac{1}{20} D_c$), (c)baffles and blocks ($Re=120, D_b = \frac{1}{40} D_c$)

동불안정성의 주된 요인이라는 선행연구^(4,5)의 결과로부터 Fig. 16(a)-2에서 energy가 가장 큰 모드는 배플에 의한 것임을 짐작할 수 있다.

Fig. 16(b)-2의 경우는 energy가 가장 큰 모드가 (a)-2와는 다른 곳에 존재함을 볼 수 있으며, D_b 가 $\frac{1}{20} D_c$ 이상에서는 유사한 양상을 보였다. 실제로 Fig. 16(b)-1과 유동장을 살펴보면 Fig. 14와 같이 블록의 뒷면에서는 배플에 의한 와류가 관찰되지 않고 블록에 의한 와류 shedding만이 관찰되는 점으로 미루어 이를 블록에 의한 유동불안정성모드라고 볼 수 있다.

또한 D_b 가 상당히 작아질 때(Fig. 16(c)), 본 논문에서는 $\frac{1}{40} D_c$ 일 때는 위의 Fig. 16(a)의 그림과 매우 유사한 양상을 보였다. 하지만 이 경우에도 Fig. 15에서 보듯이 임계레이놀즈수는 배플만을 부착한 경우보다 높게 나타났다. 이를 유동장을 통해 알아보면 Fig. 14의 블록 뒷면에서 관찰되지 않았던 배플에 의한 와류가 Fig. 17에서는 관찰됨을 볼 수 있다. 하지만 이때의 와류는 배플만이 부착된 경우 즉 Fig. 6과는 달리 좀더 약한 형태로 나타났고, Fig. 17(a)에서 사각형모양의 점선으로 그려진 블록 주위를 확대한 Fig. 18에서 보듯이 블록의 영

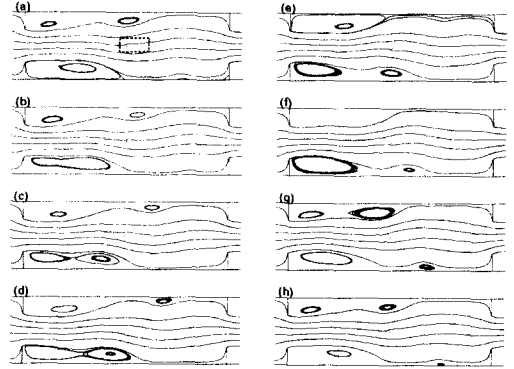


Fig. 17 Streamlines of unsteady flow at equal intervals during one period of time (baffles and blocks) ; $BR=3, Re=120, D_b = \frac{1}{40} D_c$

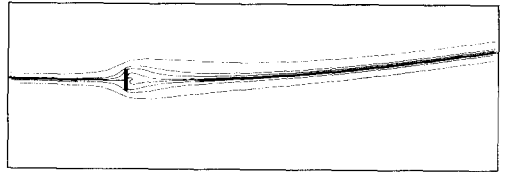


Fig. 18 Streamlines near the block ; $Re=120, BR=3, D_b = \frac{1}{40} D_c$

향이 완전히 소멸되지 않았음을 알 수 있다.

위의 결과를 토대로 본 논문에서 고찰된 경우에만 배플과 블록이 부착된 유동장에서는 블록의 크기가 채널 간격의 $\frac{1}{20}$ 이상에서는 블록이 유동장에 더 많은 영향을 주는 것을 알 수 있고, 크기가 상당히 작을 때는 배플이 더 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그러나 이때도 블록에 의한 영향은 여전히 남아 있다.

4. 결론

평행한 두 평판에 주유동방향으로 장애물(baffle과 block)을 부착했을 때의 유동에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

배플만을 부착했을 때는 배플 사이의 간격에 따라 BR 이 1에서 1.5 부근까지는 임계레이놀즈수 및 평균압력구배가 BR 과 깊은 연관이 있고, 그 이상에서는 BR 이 달라져도 크게 변하지 않았다. 이는

BR이 작아질수록 유동은 안정적이며 평균압력구배가 증가함을 의미한다. 또한 BR이 1.5 이하에서는 주유동방향으로 배플뒷면에서 유동의 재부착점이 형성되지 않았고 이는 유동의 불안정성을 감소시키는 결과를 초래하였다.

배플의 사이에 블록을 부착한 경우에 있어서도 Hopf 분기현상이 관찰되었다. 가시화를 통한 관찰을 통해 D_b 가 클 때는 블록의 뒷면에서는 배플에 의해 생성된 와류가 블록의 영향으로 소멸됨이 관찰되었다. 블록 부착이 임계레이놀즈수에 미치는 영향은 블록의 크기가 커질수록 낮은 임계레이놀즈수가 관찰되었고 블록의 크기가 작아질수록 임계레이놀즈수는 증가하는 양상을 보였다. 그러나 블록의 크기가 상당히 작을 때는 임계레이놀즈수는 다시 감소함이 관찰되었다.

배플과 블록을 부착한 경우 유동장의 Fourier mode 해석을 통해 가시화결과와 비교해 보았다. 이를 통해 블록의 크기가 상당히 작을 때는 배플이, 블록의 크기가 채널간격의 $\frac{1}{20}$ 이상에서는 블록이 유동장에 더 많은 영향을 준다는 사실이 관찰되었다.

참고문헌

- (1) 황기영, 김홍제, 모정하, 1994, "수직관이 부착된 평행평판 채널내의 유동 및 열 전달에 관한 수치해석," 공기조화 냉동공학 논문집, 제7권, 제4호, pp. 642~653.
- (2) Howes T., Mackley M. R. and Roberts E. P. L., 1991, "The Simulation of Chaotic Mixing and Dispersion for Periodic Flows in Baffled Channels," *Chemical Engineering Science*, Vol. 46, No. 7, pp. 1669~1677.
- (3) Cheng C. H. and Huang W. H., 1991, "Numerical Prediction for Laminar Forced Convection in Parallel-plate Channels with Transverse Fin Arrays," *Int. J. Heat Transfer*, Vol. 34, No. 11, pp. 2739~2749.
- (4) Roberts E. P. L., 1994, "A Numerical and Experimental Study of Transition Process in an Obstructed Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 260, pp. 185 ~ 209.
- (5) Yang K. S., 2000, "Numerical Investigation of Instability and Transition in an Obstructed Channel Flow," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 7, pp. 1173~1178.
- (6) Battaglia F., Tavener Simon J., Kulkarni A. K. and Merckle Charles L., 1997, "Bifurcation of Low Reynolds Number Flows in Symmetric Channels," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 99~106.
- (7) Habib M. A., Mobarak A. M., Sallak M. A., Abdel Hadi E. A. and Affify R. I., 1994, "An Experimental Investigation of Heat Transfer and Flow over Baffles of Different Heights," *J. Heat Transfer*. Vol. 17, No. 11, pp. 1049~1058.
- (8) Kim J and Moin P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comp. Physics*, Vol. 59, pp. 308~323.
- (9) Berner C., Durst F. and McEligot D. M., 1984, "Flow Around Baffles," *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 743~749.