대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 B pp. 783~788 KSME 00S284

장애물이 부착된 평판사이유동의 수치해석적 연구

황인상* · 양경수**

Numerical Study of obstructed channel flow

In-Sang Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Instability, Hopf Bifurcation, Reattachment, Baffle.

Abstract

Flow fields in two-dimensional plane channels with thin obstacles("baffles and blocks") mounted symmetrically in the vertical direction and periodically in the streamwise direction are studied numerically to understand how various geometric conditions influence the critical Reynolds number and pressure drop. Changing BR(the ratio of channel height to baffle interval) from 1:1 to 1:5, we computed the critical Reynolds number and pressure drop. Especially when BR is 1:3, at which the critical Reynolds number turned out to be minimal, we added blocks in the geometry in order to study their destabiliting effects on the flows.

기호설명

BR : Baffle ratio ($1 : \frac{L}{D_c}$)

D_b : Block의 높이

D_{ba} : Baffle의 높이

D_c : 채널간격

L : Baffle 사이의 간격

Gr : 성장률(Growth rate)

Re : Reynolds Number($\frac{U_m D_c}{\nu}$)

Re_c : 임계레이놀즈수 (Critical Reynolds Number)

$\triangle P$: baffle 사이의 평균압력차이

$\triangle P_m$: 평균 압력구배 ($\frac{\triangle P}{L}$)

t : 무차원화 시간($t^* \frac{U_m}{D_c}$, t^*는시간)

U_m : 비정상주기유동의 채널내 평균속도

X : Baffle로부터 재부착점 까지의 거리

ρ : 밀도(density)

u_i : 2차원 속도성분

μ : 점성계수(coefficient of viscosity)

ν : 동점성계수(coefficient of kinematic viscosity $\frac{\mu}{\rho}$)

1. 서 론

층류에서 난류로의 천이과정(laminar-turbulent transition)은 대부분의 경우 층류유동의 유동불안정성(Instability)에 의해 촉발되며, 완전히 발달된 난류유동으로 발전되기 위한 첫 단계로 인식되고 있다. 많은 응용분야에서 층류 혹은 난류 중 원

* 인하대학교 대학원
** 정회원, 인하대학교 기계·항공·자동화공학부

하는 유동상태를 유지하기 위하여 천이를 억제하거나 혹은 조장하는 기법이 흔히 사용되고 있고 이러한 천이과정에 대한 연구는 유동의 제어 면에서 중요하다고 할 수 있다. 한편 천이과정의 올바른 이해를 위해서는 유동불안정성에 관한 연구가 선행되어야 한다.

특히 평판에 장애물이 부착된 형상은 일반적인 열 교환기및 난류발생기에서 많이 나타나는 것으로 동일한 레이놀즈수를 기준으로 했을 때 장애물을 부착하면 유동불안정성을 촉진하고 열 교환기에 있어서는 전열면적의 확대와 유동의 혼합(mixing) 및 분산(dispersion)현상을 초래하여 열전달효율을 높여 주는 것으로 알려져 있다.[(1)(2)]

2차원 채널유동의 유동불안정성은 임계레이놀즈수 이상에서의 분기(Bifurcation)현상에 의해 설명되어왔다.[(3)(4)] 분기현상에 있어 임계레이놀즈수는 이를 기준으로 유동불안정성이 나타나므로 중요한 수치라 할 수 있다. 또한 서로 다른 형상에 대하여 임계레이놀즈수와 형상간의 상관관계 및 이에 수반되는 압력강하와의 상관관계는 유동연구 및 열교환기 설계의 기초자료로서 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 Roberts[(3)]의 실험을 바탕으로 평행한 두 평판에 주유동방향으로 얇은 판(baffle)을 주기적으로 부착하고 평판사이의 거리와 baffle 사이의 간격(L)의 비를 1:1부터 1:5까지 순차적으로 증가하며 Hopf 분기를 관찰하였고, 더 나아가 baffle의 사이에 같은 형태의 판(block)을 부착하여(Fig. 1) 이것이 유동장 및 유동불안정성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. Baffle만 부착된 경우에 있어 baffle사이의 간격과 임계레이놀즈수와의 관계 및 평균압력강하와의 관계를 살펴보았고 위의 계산결과 가장 유동상태가 불안정하게 나타난 BR이 1:3의 경우 유동장에 삽입된 block의 크기(D_b)가 변할때의 유동상태및 유동불안정성을 고찰하였다. 이와 같은 유동정보는 열교환기 및 난류발생기의 설계에 큰 도움이 될 것이다.

2. 수치해석기법

2.1 지배방정식 및 수치해석기법

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

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

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

연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)시키기위하여 Fractional Step Method[(5)]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 explicit하게 적분하였고, 점성항(viscous terms) 들은Crank-Nicolson방법으로 implicit하게 적분이 수행되었다. 공간에서의 차분은 FVM을 적용한 중앙차분법(Central Differencing)을 이용하였고 격자계는 주어진 형상에 대하여 가장 적합한 비균일 엇갈림 직교격자계(nonuniform staggerd cartesian grid)가 사용되었다.

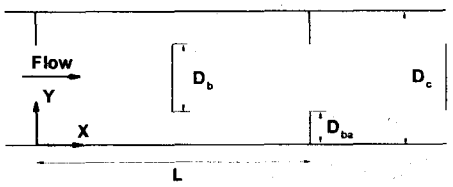

Fig. 1 Geometric configuration.

2.2 경계조건 및 유동파라미터

모든 고체면에서는 no-slip조건을 사용하였고 주유동방향으로는 주기조건을 사용하여 유동방향으로 날카로운 장애물이 주기적으로 아래위 평판에 부착된 경우를 고려하였다. 또한 본연구의 후반부에서는 baffle과 baffle의 사이에 또 하나의 장애물(block)을 대칭적으로 놓은 경우도 고려하였다.(Fig. 1) 본 논문에서 유동의 불안정성은 중간선(y=0.5)에서 속도의 y방향성분의 절대값을 적분한 후 baffle 사이의 간격(L)으로 나눈 V_{cl}의 거동으로 판정하였다.[(3)(4)]

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

대칭유동이라면 V_{cl}의 값은 0이되어야 하며, V_{cl}의 값이 Exponential한 증가를 하게되면 유동의 대칭성이 없어지게 된다. 본 유동에서 유동발생원인은 baffle 사이의 일정한 압력차이($\triangle P$)이며 평균압력구배($\triangle P_m$)는 $\triangle P$ 를 L로 나누어 구하였다. D_{ba}는 Roberts의 실험에서와 같은 0.25로서 $\frac{D_{ba}}{D_c}=0.25$이다. 본 논문에서는 $\triangle P$ 를 일정하게 유지하고 유량이 시간에따라 변동하는 조건을 사용하였다. 즉 정지된 유체에 일정한 $\triangle P$를 갑자기 적용시켜 유동을 유발한다.

3. 결과 및 논의

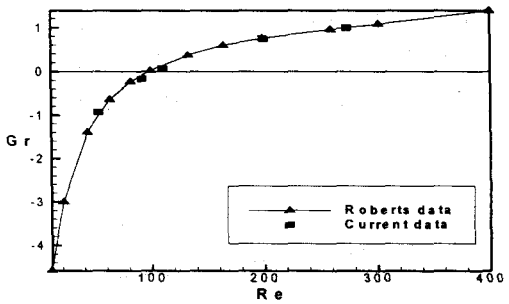

Fig. 2 Instability growth rate vs. Re.

3.1 코드의 검증

본 연구에서 사용된 코드에 대한 검증으로는 같은 형상에 대해 Roberts[3]의 유선함수를 사용한 2차원계산과 비교하였다.(Fig. 2) 여기서 Gr은 V_{cl}의 성장률을 의미한다. 임계레이놀즈수는 Gr이 0이되는 지점에서의 레이놀즈수이다. Control Volume의 개수로는 64×64, 96×96, 192×96의 경우로 계산한 결과 96×96이상에서는 0.2%의 오차만을 보여 본 연구에서는 이 해상도를 채택하였다.

3.2 Baffle만을 부착했을 때

Fig. 3은 임계레이놀즈수 이하에서의 수렴된 정상상태 유동장을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 유동은 상하대칭이며 시간이 지나도 유동장의 모양은 변함이 없다.

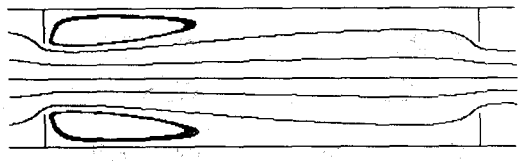

Fig. 3 Streamlines of steady flow. (Re=69.2, BR=1:3)

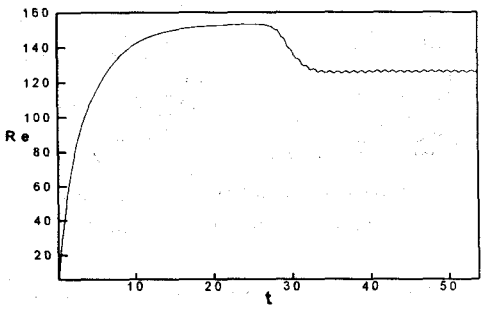

Fig. 4 Time history of Re.(baffles only) (Re=127, BR=1:3)

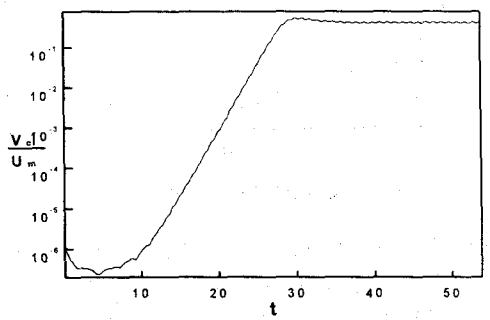

Fig. 5 Time history of Vcl.(baffles only) (Re=127, BR=1:3)

Fig. 4와 Fig. 5는 임계레이놀즈수 이상에서의 Re와 V_{cl} 을 시간에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 V_{cl}이 증가함에 따라 Re는 일정한값에 수렴하고($20\leq t\leq 25$) 유동장의 모양은 Fig. 3과 같은 대칭해에 접근하게 된다. V_{cl}은 계속해서 증가하다 일정한 값에 근접하게 되면 더 이상증가하지 않고 주기적인 양상을 띠게 된다.이때 비정상 주기유동(Fig. 6)으로 변하는 bifurcation이 발생함을 볼 수 있다. 또한 Re가 상당히 큰값일때는 비정상 주기유동상태의 V_{cl}

이 2개의 피크를 갖는 sub-harmonic현상이 관찰되었다.[3][4]

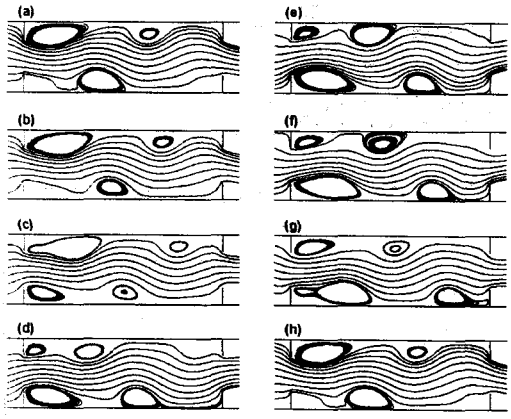

Fig. 6 Streamlines of unsteady flow at equal intervals during one period of time. (Re=127, BR=1:3)

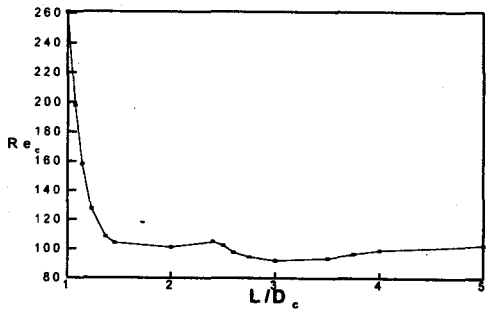

Fig. 7 Critical Re vs. BR.

Fig. 7은 임계레이놀즈수와 BR과의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 block을 부착하지 않은 상태의 BR과 임계레이놀즈수 사이에는 BR이 1:1.456이하인 경우 급격하게 임계레이놀즈수가 증가함을 볼 수 있다. 이는 유사한 형상에 있어 BR의 변화는 Re의 변화와도 같은 역할을 수행한다는 실험치와도 일치한다.[6]그러나 BR이 1:1.456 이상에서는 그 변화양상이 현저히 감소하고 Re는 100부근에서 형성됨이 관찰되었다.

Fig. 8은 레이놀즈수에 따른 평균압력구배 ($\triangle P_m$)를 나타낸 그래프로서 여기서 실선은 임계레이놀즈수일때의 평균압력구배를 의미한다. 그래프에서 알 수 있듯이 BR이 1:1.456이하에서는 BR이 변할 때 $\triangle P_m$과 Re_c는 선형적인 관계가 있다. 그이상의 BR에서는 임계레이놀즈수가 공통적으로 100부근이므로 그래프 상에서는 왼쪽 하단과 같은 양상으로 나타났다. 유동장의 입구와 출구의 압력차이는 주어진 형상에서 수렴된 비정상주기유동의 Re에서의 압력 강하(Pressure Drop)로 볼 수 있다.

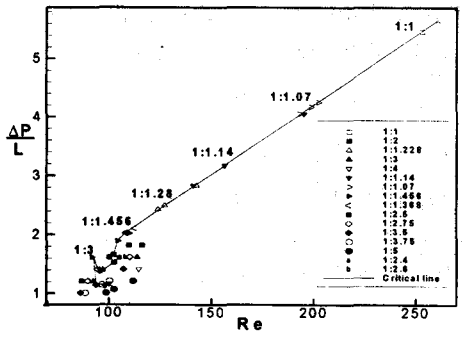

Fig. 8 Mean pressure gradient vs. BR.

실제로 순간압력강하는 baffle을 기준으로 일정한 양상으로 증가와 감소를 반복하게 되고 열 교환기의 경우 입구영역을 제외한 baffle영역에서는 이러한 양상이 유지되는 것으로 알려져 있다[1].

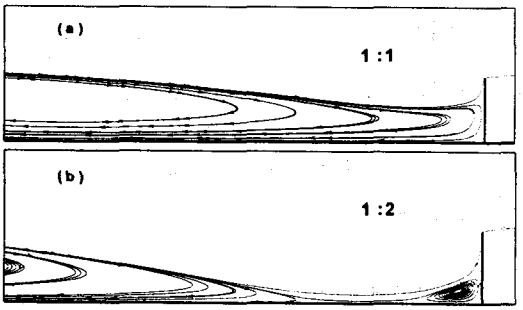

Fig. 9 Streamlines of steady flows near reattachment point for different BR.(a) Re=261 (b) Re=100

또한 가장 대조적인 양상을 보인 BR이 1:1일 때와 1:2일 때 임계레이놀즈수와 아주 근접한 Re에서 bifurcation이 일어나기전 정상상태 유동장의 양상을 유선(Streamlines)을 통해 비교해보면 Fig. 9과 같이 전자의 경우 재부착점 자체가 형성되지 않는 것을 볼 수 있고, 이 구간에서 임계레이놀즈수 및 압력차이는 Fig. 7, Fig. 8에서 보듯이 BR과 밀접한 관련이 있는 것으로 관찰되었다. BR이 1:1.456이상에서는 재부착점이 1.6부근에 위치한다. BR이 1:1.456이상에서 재부착점의 양상은 BR이 1:3부근에서 재부착점이 다른 경우

보다 상류쪽 baffle로부터의 거리가 가깝게 나왔다. 실제 Fig. 7에서와 같이 BR이 1:3인 경우 임계레이놀즈수가 92부근으로서 계산한 결과 중에는 가장 낮게 나왔다. 또한 BR이 1:2.4인 경우 임계레이놀즈수가 104부근으로서 유사한 BR중에는 가장 높게 나타났다.

3.3 baffle 및 block을 부착했을 때

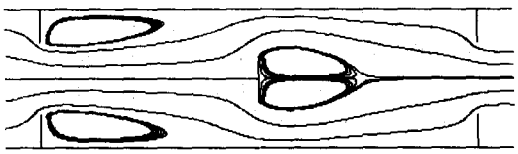

Fig. 10 Streamlines of steady flows.(Re=60, BR=1:3)

3.2절에서 평판에 baffle만이 부착된 경우 BR이 1:3에서 임계레이놀즈수가 가장 낮음을 보았다. 이 절에선는 baffle과 baffle사이에 Fig. 1과 같이 block을 부착하였다. Fig. 10은 임계레이놀즈수 이하에서의 수렴된 정상상태 유동장이다. 그림에서 보듯이 유동은 상하대칭이며 block의 뒷면에 재순환구역이 존재함을 볼 수 있다.

Fig. 11, Fig. 12는 block이 부착된 상태에서 대표적인 Re와 V_{cl}의 양상을 시간에 대해 나타낸 것이다. 이를 baffle만을 부착했을 때의 Re 및 V_{cl}(Fig. 4, Fig. 5)와 비교하면 Re가 최고점을 지난 후 어느 정도 감소하여 정상상태에 도달한 후 bifurcation이 일어남이 관찰되었다.

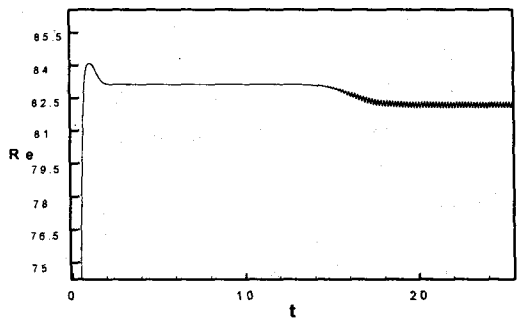

Fig. 11 Time history of Re.(Attached baffles and blocks)(Re=82.2,BR=1:3)

V_{cl}의 양상은 baffle만을 부착했을 때와 크게 다르지 않았으나 임계레이놀즈수 보다 낮은 Re에 있어서는 baffle만을 부착한 경우 V_{cl}은 Exponential하게 감소하는 양상을 보이지만 Fig. 10에서 보듯이 block뒷면의 재순환유동에 의해 감소하지 않고 일정한 값으로 접근함이 관찰되었고 이때의 Gr은 0으로 간주하였다.

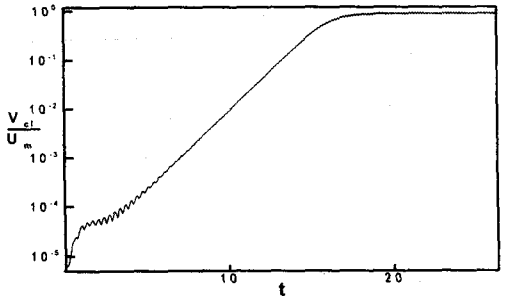

Fig. 12 Time history of Vcl (baffles and blocks) (Re=82.2, BR=1:3)

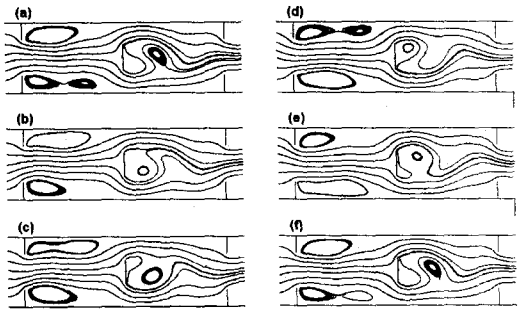

Fig. 13 Streamlines of unsteady flows at equal intervals during one period of time. (Re=82.2, BR=1:3)

Fig. 13은 이 경우의 수렴된 비정상주기유동의 유선으로, 한 주기를 나타낸 것이다. Fig. 6에서 baffle뒷면에서 발생되는 주기적인 와류(vortex)는 벽을 따라 다음 baffle까지 이동하는 것을 볼 수 있었다. block을 부착했을 때는 Fig. 13에서와 같이 block뒷면에서 block에 의한 주기적인 shedding이 발생함을 볼 수 있다. 또한 baffle에 의해 발생된 와류가 block뒷면에는 관찰되지 않았다.

Fig. 14는 D_b를 채널높이에 대해 $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$로 변화시키며 각각의 경우 임계레이놀즈수를 구해보았다. 그림에서 block의 크기가 커짐에 따라 임계레이놀즈수는 감소 하는 양상을 볼 수 있다. 하지만 baffle만 부착된 경우와 비교해 보면 D_b

가 작을 경우에는 오히려 Re_c가 증가할 수도 있음을 보여준다. Block의 크기가 $\frac{1}{2}$일 때 계산한 결과중에는 임계레이놀즈수가 가장 낮았고, BR은 1:3이고 block의 크기가 $\frac{1}{2}$일 때 유동은 가장 불안정함을 알 수 있다.

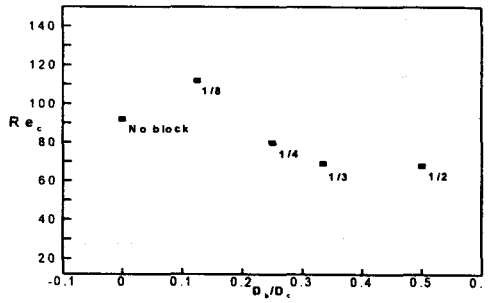

Fig. 14 Critical Re of different block height. (BR=1:3)

4. 결론

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

Baffle만을 부착했을 때는 baffle 사이의 간격에 따라 BR이 1:1에서 1:1.456까지는 임계레이놀즈수 및 압력강하가 BR에 따라 감소하는 관계를 보이고 그 이상에서는 BR이 달라져도 크게 변하지 않았다. 이는 BR이 작아질수록 유동은 안정적이며 압력강하가 증가함을 의미한다. 또한 BR이 1:1.456이하에서는 주유동방향으로 baffle뒷면에서 유동의 재부착점이 형성되지 않았고 이는 유동의 불안정성을 감소시키는 결과를 초래하였다.

Baffle의 사이에 판(block)을 부착한 경우에 있어서도 Hopf분기현상이 관찰되었다. 가시화를 통한 관찰을 통해 block의 뒷면에서는 baffle에 의해 생성된 와류가 block의 영향으로 소멸됨이 관찰되었다. Block부착이 임계레이놀즈수에 미치는 영향은 block의 높이가 채널높이의 $\frac{1}{2}$일 때 가장 낮은 임계레이놀즈수가 관찰되었다. 이는 실제설계시 유용한 자료로 사용될 수 있을것이다.

참고문헌

(1) 황기영, 김홍제, 모정하, 1994, "수직휜이 부착된 평행평판 채널내의 유동 및 열 전달에 관한 수치해석," 공기조화 냉동공학 논문집, 제7권, 4호, pp. 642 - 653.

(2) T. Howes, M. R. Mackley and E. P. L. Roberts, 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) E. P. L Roberts, 1994, "A numerical and experimental study of transition process in an obstructed channel flow," J. Fluid Mech., vol. 260, pp. 185 - 209.

(4) 양경수, 1996, " 천이박리유동의 직접수치모사, Part Ⅰ: 주 불안정성," 대한기계학회논문집(B), 제20권 제9호, pp. 2965 - 2972.

(5) J. Kim, P. Moin, 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," J. Comp. Physics, vol.59, pp. 308 - 323.

(6) M. A. Habib, A. M. Mobarak, M. A. Sallak, E. A. Abdel Hadi, R. I. Affify, 1994, " An Experimental investigation of heat transfer and flow over baffles of different heights," J. Heat Transfer. vol. 17, No. 11, pp. 1049 - 1058.

(7) Z. D. Chen, J. J. J. Chen, 1998, "Local Heat transfer for oscillatory flow in the presence of a single baffle within a channel," Chemical Engineering Science, vol. 53, No. 17, pp. 3177 - 3180.

(8) F. Battaglia, Simon J. Tavener, A. K. Kulkarni, Charles L. Merckle, 1997, "Bifurcation of Low Reynolds Number Flows in Symmetric Channels," AIAA Journal, vol. 35, No. 1, pp. 99 - 106.

(9) C. Berner, F. Durst, D. M. McEligot, 1984, "Flow Around Baffles," J. Heat Transfer, vol. 106, pp. 743 - 749.