

채널 내에 부착된 정육면체 장애물 후류에서의 Vortex 구조에 대하여

황종연* · 양경수*

(2001년 6월 11일 접수, 2001년 9월 18일 심사완료)

On Vortical Structures in Near-Wake Region of a Cubic Obstacle Mounted on a Channel Wall

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Horseshoe Vortex(말굽 와류), DNS(직접수치모사), Hairpin Vortex(헤어핀 와류), Coherent Structure(조직구조)

Abstract

Vortical structures in the near-wake region of a cubic obstacle are studied using numerical simulation. We consider flow between two parallel plates with a cube mounted on one of the plates. In the turbulent near-wake region of the flow, coherent structures such as hairpin vortices are found. Quasi-periodic behavior of the hairpin vortices is noticed; its dimensionless frequency at $Re=1,000$ is about 0.82 which is consistent with the result of Elavarasan *et al.*'s experiment [*Fluid Dyn. Research*, 2000, 27] although their geometry is somewhat different from ours. In the case of $Re=3,500$, the dimensionless frequency of the hairpin vortex is about 1.60. It is observed that the translating speed of the head of the hairpin vortex is lower than the streamwise mean velocity at that location. In the vicinity of the lower plate downstream of the cube, various length scales are identified thus less coherent. However, it is noticed that the vortical structures become gradually elongated downstream of the flow reattachment.

1. 서론

난류 경계층의 발생과 와의 조직구조(coherent structure, CS)에 대한 심도 있는 연구는 지난 수십년 전부터 다양하게 이루어져왔다. 난류의 조직구조란 속도, 압력, 와도 등과 같은 유동변수들이 비교적 큰 규모로 유동장내에 존재함을 의미한다. 이러한 구조는 벽근처 난류에서만 아니라 외부층(outer layer)이나 자유전단층(free shear layer)에서도 발견되며 난류 메커니즘의 이해를

위해서는 CS에 대한 심도 있는 연구가 필요하다. 특히 난류 경계층에서 발견되는 말굽와류, 헤어핀 와류, 버섯구름 와류 등과 같은 CS들은 상호간의 조직에 큰 영향을 미치며 그 동안 이러한 와류들의 조직거동에 대한 광범위한 연구가 이루어져왔다. Jeong 등⁽¹⁾은 벽근처 난류경계층에서 발생하는 큰 와에 의해서 난류의 CS를 관찰하기가 수월하지 않다는 사실에 입각하여 새로운 와의 정의방법을 이용하여⁽²⁾ 난류 CS의 동적 거동을 비교적 정확하고 상세하게 구현하였다. 즉 $S_{ik}S_{kj} + \Omega_{ik}\Omega_{kj}$ 의 두 번째로 큰 고유값(eigenvalue) λ_2 가 음일 경우에는 와의 중심을 의미한다는 사실로부터 이 음의 λ_2 등고선으로서 조직와를 재현하는 등 CS에 대하여 광범위한 연구를 수행하였다. 여기서 $S_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$ 이고 $\Omega_{ij} = (u_{i,j} - u_{j,i})/2$ 로서 속도구배텐서($u_{i,j}$)의 대칭과 비대칭 부분을 각각 의미한다. Haidari

* 회원, 인하대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7322 FAX : (032)863-3997

and Smith⁽³⁾는 hot-film 풍력 측정 법을 이용하여 헤어핀 와류의 생성과 발달과정에 대해 유동 가시화 작업을 수행하였다. 특히 벽에서의 적절한 유체분사(injection)는 헤어핀 와류의 소멸과 재생성을 유발할 수 있다고 보고하였다. Elavarasan and Meng⁽⁴⁾은 탭을 지나 난류 경계층 후류에서의 와의 구조에 대한 실험을 수행하였다. 탭의 후류에서 counter rotating vortex pair(CVP)가, 하류 지점에서는 헤어핀 와류가 생성되며 헤어핀 와류의 주파수가 CVP의 주파수보다 다소 크게 나타난다고 보고하였다. 최근 CS에 대하여 수치모사를 수행한 연구도 많이 보고되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ Yang 등⁽⁵⁾은 감속되는 경계층 유동에서 DNS를 수행하여 Δ 와류의 생성과 붕괴 과정에 대하여 자세히 기술하였다. Leiseur⁽⁶⁾는 LES를 이용하여 전단류, 후류, 혼합층 등에서 CS들의 상호작용에 대하여 연구를 수행하였으며 Suksangpanomrung 등⁽⁷⁾은 전향 계단을 지나 유동에 대하여 LES를 수행하여 재부착점 근처에서 헤어핀 와류가 생성됨을 보고하였다.

본 연구에서는 고 해상도의 직접수치모사(DNS)를 이용하여 두 평판사이의 유동에서 한쪽 평판에 부착된 정육면체 장애물 후류에서의 와의 거동에 대한 연구를 수행하였다.(Fig. 1) 아직까지는 이러한 형태의 복잡한 형상에 대해 후류에서의 와 거동에 대한 전산해석적 연구는 매우 드물다. 그런데 복잡한 장애물 주위 유동에서는 말굽와류, 헤어핀 와류, 나선와류 등 여러 가지 와류들이 혼재하고 있기 때문에 이들의 시간적 공간적 거동에 대한 정확한 구현을 위해서는 전산해석적 연구가 적합하다. 특히 이러한 유동형상은 열교환기에서의 회과 평판의 접합 부분에서 볼 수 있으며 후류에서의 와류의 거동에 대한 이해는 열교환기의 성능 향상을 위해서도 매우 중요하다. 이러한 형태의 유동을 juncture 유동이라 부르는데 juncture 앞 부분에서의 말굽와류 구조에 대한 연구와 그에 따른 위상학적 연구 결과는 이미 본 저자들에 의해 발표되었다.^(8,9) 본 연구에서는 장애물의 한 변의 길이(h)와 평균 입구속도(U)를 각각 특성길이와 특성속도로 정의한 레이놀즈수(Re)가 1,000과 3,500인 경우에 대하여 계산을 수행하였다. $Re=1,000$ 인 경우에는 장애물 앞에서 정상 4-vortex system 이 형성되고 $Re=3,500$ 인 경우에는 장애물 앞에서 비정상 준주기적 6-vortex

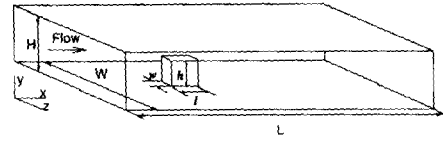


Fig. 1 Geometric configuration

system이 형성된다.⁽⁹⁾ 한편 장애물 뒤에서는 두 경우 모두 난류로 천이되며 헤어핀 와류가 발견된다.

본 논문의 전반부에서는 $Re=1,000$ 인 경우에 대하여 헤어핀 와류의 거동에 관한 관찰을 수행하였고 주파수(f)를 분석하여 헤어핀 와류의 스트로울 수 ($St = fh/U$)를 구할 수 있었으며 순간적인 와의 거동에 대해서 상세히 언급하였다. 따라서 특별한 언급이 없는 한 본 논문에서 제시하는 내용들은 $Re=1,000$ 인 경우이다. 논문의 후반부에서는 $Re=3,500$ 인 경우에 대하여 헤어핀 와류의 St 를 구하였고 $Re=1,000$ 인 경우와 비교가 이루어졌다.

2. 수식전개 및 수치해석법

본 연구에서는 비압축성 유체에 대해 다음과 같은 연속방정식과 모멘텀 방정식이 사용되었다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{u} , ρ , ν , p 는 각각 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미하며 위의 지배방정식들은 유한체적법을 사용하여 차분되었다. 공간에서의 차분은 2차의 정확도를 가지며, 시간에서의 적분은 혼합기법으로서, 비선형항들은 3차 정확도의 Runge-Kutta 기법으로 명시적으로, 다른 항들은 Crank-Nicolson 기법으로 묵시적으로 적분되었다. 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리하기 위해서는 Fractional Step 기법⁽¹⁰⁾이 사용되었다. 사용된 격자는 비균일 엇갈림 직교격자로서 주어진 형상에 대해서 가장 적합한 격자라고 할 수 있

다. 사용된 수치해석 알고리즘은 Yang and Ferziger⁽¹¹⁾ 및 Shah⁽¹²⁾의 논문에서 자세히 설명되어 있다.

3. 유동 파라미터 및 경계조건

모든 고체면에서는 점착 조건이, 횡방향(z)으로 는 주기조건이 적용되어 실제로는 장애물이 횡방향으로 주기적으로 배열된 경우에 해당된다. 하지만 $W/h > 5$ 인 경우에는 주위(neighboring)의 장애물에 의한 유동의 간섭은 없는 것으로 확인되었다.^(8,9) 주유동방향(x)의 입구에서는 균일한 속도분포를 적용하였는데 이는 장애물 앞에서 비정상 말굽와류를 형성시키기 위해서 필요한 배제두께(displacement thickness, δ^*)를 얻기 위함이다. 즉 장애물을 입구로부터 $5h$ 인 지점에 위치시켰는데 그 이유는 $Re=1,000$ 인 경우에는 4-vortex 정상 말굽와류가, $Re=3,500$ 인 경우에는 6-vortex 비정상 말굽와류가 형성된다는 사실에 입각한 것이다.⁽¹³⁾ 출구에서는 대류경계조건(convective boundary condition)이 적용되었다.⁽¹⁴⁾ 출구경계조건에 의한 반사(reflection)를 최소화하기 위하여 장애물 뒤의 계산영역을 길게 설정해야 하기 때문에 그만큼 많은 격자점의 수가 요구되었다. 즉 $Re=1,000$ 인 경우에는 $L/h=15$ 를 $Re=3,500$ 인 경우에는 $L/h=18$ 을 사용하였다. 장애물의 형상은 정육면체로서($l=h=w$) 한 변의 길이가 평균

사이 간격의 반 ($h/H=0.5$)으로 설정하였다. 횡방향의 계산영역은 두 경우 모두 $W/h=7$ 을 사용하였으며 사용된 격자수는 격자 세분화 연구(grid-refinement study)를 통해 결정하였고 두 경우의 자세한 계산 정보는 Table 1에 수록되어있다. 유동장이 과도 구간을 거쳐 완전히 발달할 때까지 CFL 수 1.5일 때 약 15,000 시간단계가 필요하였으며 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 SMP에서 한 시간단계 당 $Re=1,000$ 인 경우에는 약 85초가, $Re=3,500$ 인 경우에는 약 125초가 소요되었다.

4. 결과 및 토론

장애물 뒤의 유동장에는 여러 종류의 와류들이 발견된다. 아랫바닥 근처는 장애물 앞에서 발생되는 말굽와류의 다리(leg)가 존재하고 장애물 바로 뒤 벽에서는 말굽와류의 초점으로부터 나선와류가 형성되어 위로 올라가며 하류로 대류된다. 또한 장애물 위를 지나는 유동은 $Re=1,000$ 인 경우에는 장애물 뒤에서 자유 전단층을 이루며 헤어핀 와를 형성하고 $Re=3,500$ 인 경우에는 장애물 위에서 헤어핀 와를 형성한다. 본 논문에서는 이 헤어핀 와류의 조직적 거동을 중점적으로 다룬다. Figure 2는 $Re=1,000$ 인 경우에 횡방향 중앙평면에서 시간에 따른 z 성분의 와도(vorticity) 등고선을 보여준다. 여기서 * 표시는 헤어핀 와류의 머리의 중심을 나타내고 무차원화된 등고선 사이 간격의 크기는 $\Delta w_z h / U = 3.40$ 이다. Frame 1부터 frame8까지를 한 주기로 하는 준주기적 거동을 보여주는데 장애물 앞부분에서는 모든 프레임에서 정상적인 와를 볼 수 있으며 이 영역은 층류영역에 해당한다. 이러한 층류영역은 장애물 위의 선단(leading edge)으로부터 약 $0.8h$ 까지 형성됨이 관찰된다. 그러나 장애물 위의 $0.8h$ 인 지점을 지나면서 후류로 갈수록 비정상적인 동적 거동을 보이며 공간적으로 뚜렷한 조직을 갖는 헤어핀 와류가 형성됨을 볼 수 있다. 헤어핀 와류가 생성되는 이 곳은 난류영역에 해당된다. 전형적인 헤어핀 와류의 머리는 frame 3에 제시되어 있듯이 등고선이 기울어지면서 그 안에 z 성분 와도의 크기가 상대적으로 큰 아일랜드를 형성한다. 시간이 지날수록 헤어핀 와류의 머리는 하류

Table 1 Simulation cases

Re	Resolution	Vortex Type
1,000	192 × 96 × 144	<ul style="list-style-type: none"> steady 4-horseshoe vortex system quasi periodic hairpin vortex
3,500	224 × 96 × 144	<ul style="list-style-type: none"> quasi periodic 6-horseshoe vortex system quasi periodic hairpin vortex

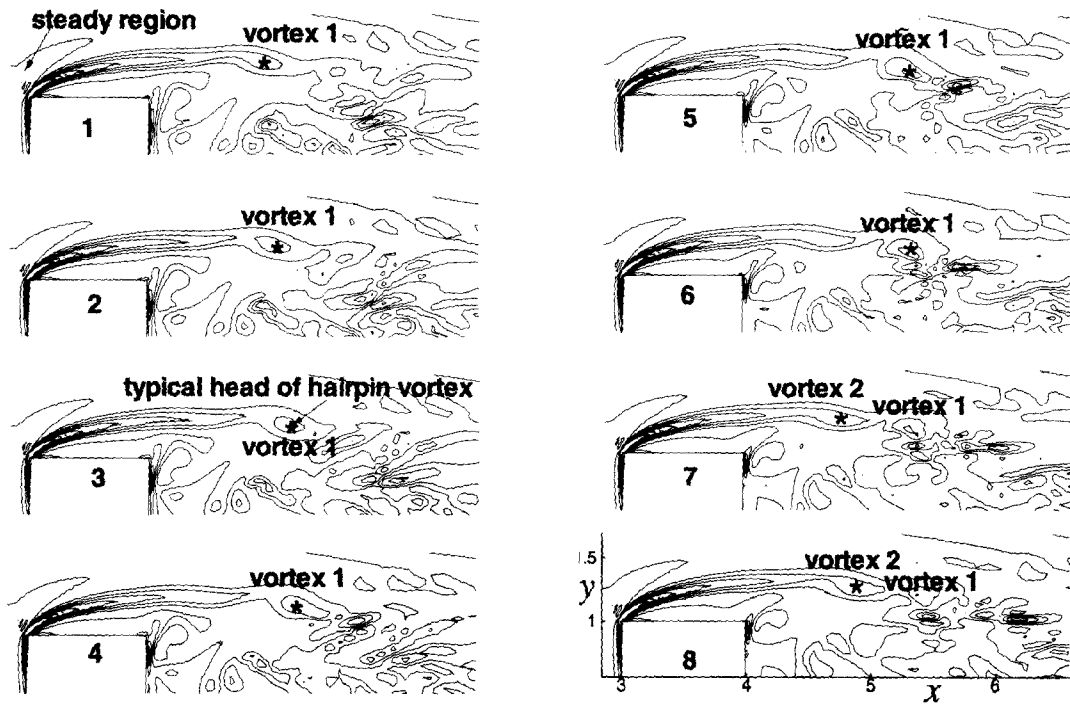


Fig. 2 Spanwise vorticity contours on the center plane at $Re=1,000$ during one quasi-period of generating a hairpin vortex; frame 1 is at same phase as frame 8, $\Delta w_2 h / U = 3.4$

로 대류 되면서 (frame 4, frame 5, frame 6) 또 다른 머리가 서서히 생성되기 시작한다.(frame 7, frame 8의 vortex 2) 시간이 더 지나면서 점차적으로 헤어핀 와류의 머리는 뚜렷해진다.(frame 2) 본 연구에서는 이러한 형태의 준주기적 거동이 계속해서 되풀이됨이 관찰되었다. 헤어핀 와류의 머리가 소멸하는 부근(frame 6, frame 7, frame 8의 vortex 1)에서의 와류의 형태가 불규칙 적이며 다양한 크기의 길이 스케일이 존재한다. 그 이유는 장애물 뒤에서 위로 돌아 상승하며 하류로 이동하는 나선와류와 재순환 영역에서 시계방향으로 회전하는 와류의 효과가 혼재되어 있기 때문이다. 유동장에 대한 이들의 영향은 정량화 하기가 힘들지만 헤어핀 와류와 시계방향으로 회전하는 다양한 규모의 와들 사이의 모멘텀 확산을 관찰할 수 있었다. 헤어핀 와류의 준주기적 거동을 정량화 하기 위하여 헤어핀 와류의 머리 중심(*)에서 주유동방향의 유체의 속도(u_c)의 시간에 따른 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 횡축은

입구속도(U)와 장애물의 높이(h)로 무차원화된 시간을 나타내고 종축은 U 로 무차원화된 속도를 나타낸다. 약 다섯 주기의 준주기적 거동을 볼 수 있다. 여기서 속도의 최저점은 헤어핀 와류가 분기되어 소멸하기 전 (Fig. 2의 frame 6의 vortex 1)이고 속도의 최고점은 헤어핀 와류의 머리부분에서 아일랜드가 생기기 시작하는 시점이다.(Fig. 2의 frame 7의 vortex 2) 따라서 최저속도에서 최고속도사이 에 불연속점이 발생하게 된다. 그림에서 보듯이 헤어핀 와류가 생성되어 하류로 대류 되면서 중심속도는 점점 감소하게 됨을 알 수 있다. 헤어핀 와류의 주파수를 측정하기 위하여 시간에 따른 u_c 를 푸리에 변환하여 Fig. 4에 제시하였다. 여기서 횡축 f_n 은 무차원화된 주파수를 나타내고 이는 wave number를 2π 로 나눈 값에 해당한다. 종축인 ϕ 는 다음과 같이 정의하였다.

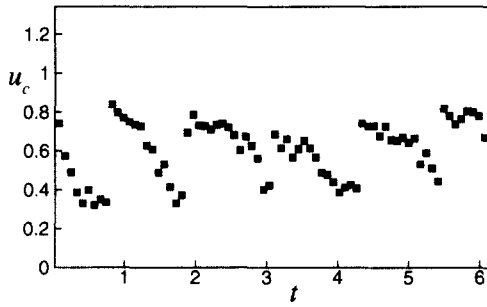


Fig. 3 Time history of streamwise velocity of hairpin vortex center during about five periods

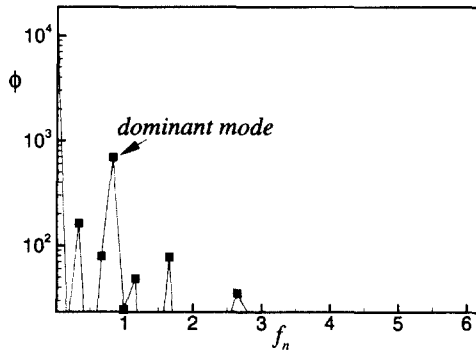


Fig. 4 Power spectrum of streamwise velocity of the hairpin vortex center

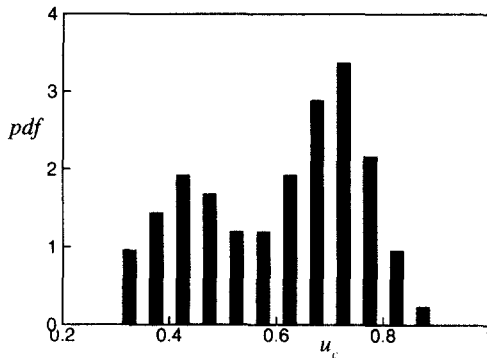


Fig. 5 Probability density function of streamwise velocity of the hairpin vortex center during five periods

$$\phi(f_n) = [h(f_n)_{real}]^2 + [h(f_n)_{imag}]^2 \quad (3)$$

여기서

$$h(f_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} u_c(t) e^{-2\pi i f_n t} dt$$

이고 $h(f_n)_{real}$ 과 $h(f_n)_{imag}$ 는 푸리에 계수의 실수부분과 허수부분을 각각 의미한다. 즉 ϕ 가 가장 클 때의 (또는 지배적일 때의) f_n 값이 헤어핀 와류의 와홀림 주파수 St 에 해당하며 약 0.82가 나왔다. $Re=1,000$ 인 경우 탭의 후류에서 헤어핀 와류의 거동에 대해 실험을 수행한 Elavarasan and Meng⁽⁴⁾의 결과인 0.84와 비교하면 비슷함을 알 수 있다. 시간에 따른 u_c 의 통계적 분포를 살펴보기 위하여 다음과 같이 정의되는 확률밀도함수(probability density function, P)를 Fig. 5에 나타내었다.⁽¹⁵⁾

$$P(u_c)\Delta u_c = \frac{n}{N} \quad (4)$$

$$P(u_c) \geq 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} P(u_c) du_c = 1$$

여기서 N 은 헤어핀 와류의 다섯 주기에 해당하는 시간동안의 샘플링 개수이고 세 주기에 해당하는 시간동안의 샘플링 개수를 사용한 결과 P 분포의 큰 차이는 발견되지 않았다. n 은 u_c 와 $u_c + \Delta u_c$ 사이에 해당되는 샘플링 개수이다. 이 결과를 보면 횡축의 가운데 부분에서 극소값을 보이고 양쪽 부근에서 극대값을 각각 보이고 있다. 이는 주기적 거동을 하는 유동의 전형적인 형태로서 u_c 가 큰 경우에 보이는 극대값은 헤어핀 와류가 생성되는 단계이고 u_c 가 작은 경우에 보이는 극대값은 헤어핀 와류가 소멸되는 단계에 해당한다. 즉 헤어핀 와류는 생성 및 소멸 단계에 많은 빈도를 보이며 형성되고 그 중간 단계에는 적은 빈도를 보임을 알 수 있다. 입구속도로 무차원화된 u_c 의 평균은 약 0.60이고 헤어핀 와류의 머리의 평균 이동속도는 0.50으로 헤어핀

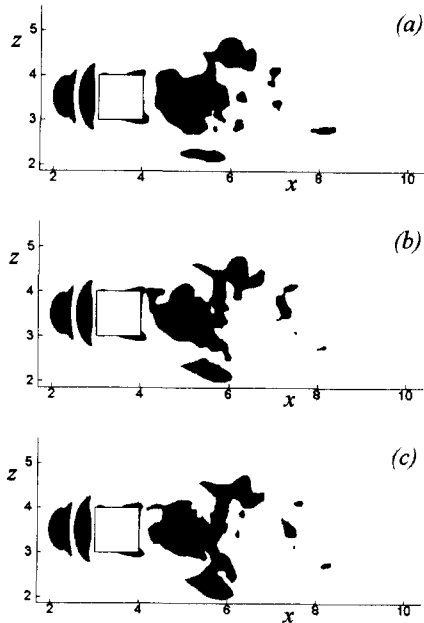


Fig. 6 Regions of instantaneous reversed flow on the $x-z$ plane at $y/h=0.005$, (a) $t=t_1$, (b) $t=t_1+0.64T$, (c) $t=t_1+T$, where T is a typical period of the hairpin vortex generation

와류의 머리는 u_c 보다 더 느린 속도로 이동함을 알 수 있다.

Figure 6은 장애물 주위 바닥면 근처에서 주유동 방향과 반대방향의 순간속도를 갖는 구역을 나타낸다. Figure 6(a), 6(b), 6(c)는 각각 헤어핀 와류의 한 주기 동안에서 임의의 시간에서의 상황을 보여준다. 장애물 앞에서 정상상태의 4-vortex 시스템의 말굽와류가 뚜렷이 보이고 있으며 장애물 뒤에서는 비정상성의 난류 구조를 보여주고 있다. 장애물 뒤의 횡방향 중심에서 재부착점의 평균위치를 계산해본 결과 약 $x=6.08$ 이 나왔고 재부착점 근처에서 활발한 유동장의 변화를 볼 수 있다. 또한 바닥근처에서의 시간에 따른 동적 거동은 헤어핀 와류의 거동과 무관하게 발생하고 있으며 주기성도 거의 찾을 수 없다. Figure 7은 바닥 근처에서 Fig. 6과 같은 순간에서의 주유동 방향 와도 등고선을 보여준다. 여기서 등고선 한 간격사이의 무차원화된 크기는 $\Delta w_x h/U=2.77$ 이

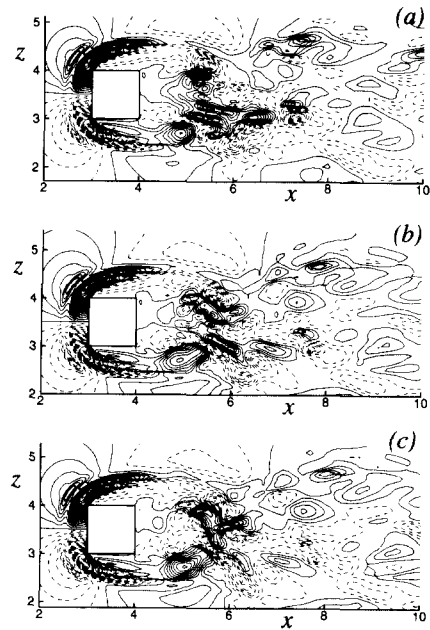


Fig. 7 Instantaneous streamwise vorticity contours on the $x-z$ plane at $y/h=0.005$, $\Delta w_x h/U=2.77$, (a) $t=t_1$, (b) $t=t_1+0.64T$, (c) $t=t_1+T$, where T is a typical period of the hairpin vortex generation

다. 장애물 앞과 옆면에서는 정상적인 말굽와류가 보이고 있다. 재부착지점 전후 지점에서는 $0.2h$ 에서 $0.8h$ 정도의 크기를 갖는 다양하고 비교적 작은 조직의 와들이 활발하게 움직이고 있음이 발견된다. 따라서 재부착지점 근처에서는 여러 가지 물리량들의 변화나 물질전달 등이 활발하게 일어날 수 있음을 제시해준다. 재부착지점을 지나 하류로 가면서 약 h 정도의 길이를 갖는 큰 조직의 와들이 횡방향으로 약간 기울어지면서 늘어나고(elongate) 있다. Figure 8은 Fig. 2의 frame 3에 해당하는 순간에서 장애물 뒤에 형성되는 헤어핀 와류의 머리 중심을 지나는 와선을 보여준다. 비교적 부드럽게 선이 형성되지는 않지만 머리부분에서는 뚜렷한 헤어핀 와류를 볼 수 있다. 다리부분에서는 말굽와류의 다리에 의해서 약간 왜곡되어 있음에도 불구하고 대략적인 “ Ω ” 형태를 취하고 있다. 횡방향으로 정확한 대칭이 나타나지 않음은 순간유동장의 비정상성 때문이

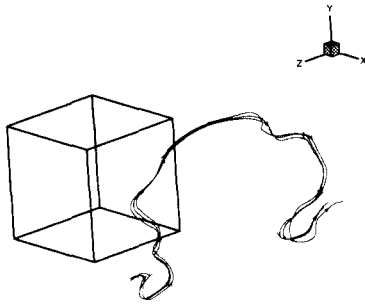


Fig. 8 Instantaneous vortex line through hairpin vortex center

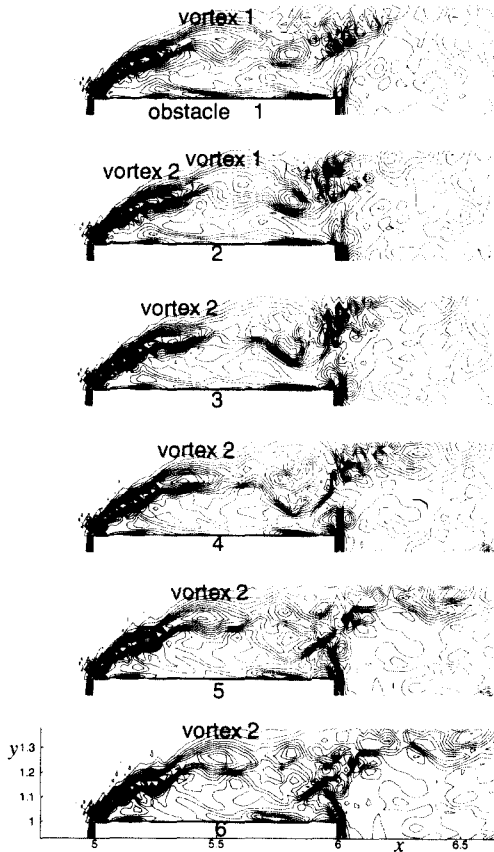


Fig. 9 Spanwise vorticity contours in the center plane at $Re=3,500$ during one quasi-period of a hairpin vortex; frame 1 is at same phase as frame 6

다. 다리부분에서 회전하는 형태를 나타내는 것은 장애물 앞에서 생성된 말굽와류의 다리가 통과하기 때문이다.

Figure 9는 $Re=3,500$ 인 경우에 횡방향 중앙평면에서 시간에 따른 z 성분의 와도(vorticity) 등고선을 보여준다. 여기서 무차원화된 등고선 사이 간격의 크기는 $\Delta w_z h / U = 2.0$ 이다. frame 1부터 frame 6까지를 한 주기로 하는 준주기적 거동을 하고 있으며 본 연구에서는 약 10회 이상의 이러한 주기적 거동이 반복될 때까지 계산을 수행하였다. $Re=1,000$ 인 경우와 비교해 볼 때 상이한 점을 발견할 수 있다. $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 장애물 선단으로부터 유동장의 전 영역이 비정상 유동이다. 따라서 장애물의 선단에서 헤어핀 와류가 비정상적으로 생성되며 헤어핀 와류의 머리도 선단에서 약 $0.4h \sim 0.6h$ 사이에서 형성됨을 볼 수 있다. $Re=1,000$ 인 경우에는 선단으로부터 약 $1.8h \sim 2.2h$ 사이에 헤어핀 와류의 머리가 형성된 것과 비교하면(Fig. 2) 정성적인 큰 차이점을 발견할 수 있다. 즉 $Re=1,000$ 인 경우에는 장애물 뒤의 재순환 영역과 주유동사이인 자유 전단층 영역에서 헤어핀 와류가 형성되지만 $Re=3,500$ 인 경우에는 박리가 발생하는 선단으로부터 형성되는 장애물 위의 2차 와류 영역과 주유동사이의 자유전단층 영역에서 형성됨을 의미한다. 따라서 헤어핀 와류가 발생하는 위치나 패턴은 다소 상이하지만 상대적으로 모멘텀 차이가 큰 자유 전단층 영역에서 두 경우 모두 헤어핀 와가 관찰되고 있다. 헤어핀 와류의 길이규모도 $Re=1,000$ 인 경우보다 더 작음을 볼 수 있다. Frame 1에서 헤어핀 와류의 머리에 해당되는 vortex 1은 하류로 대류 되면서(frame 2) 새로운 헤어핀 와류가 다시 생성된다.(frame 2의 vortex 2) 새로 생성된 헤어핀 와류는 $Re=1,000$ 인 경우와 비슷한 양상으로 하류로 이동한다.(frame 3, frame 4, frame 5, frame 6의 vortex 2) 또한 장애물이 끝나는 지점 ($x=6.0$)에서 작은 크기의 와들을 볼 수 있다. 이 작은 크기의 와들이 생성되는 이유는 장애물 뒤의 재순환 영역에서 시계방향으로 회전하며 생성되는 와들이 장애물의 벽을 타고 위로 올라오면서 헤어핀 와류와 만나 모멘텀 확산이 활발하게 일어나기 때문이다. St 는 약 1.60으로 $Re=1,000$ 인 경우보다 약 두 배 정도가 크다. 이는 공간적으로 뿐만 아니라 시간적으로 더 작은 규모로 헤어핀 와가 거동함을 의미한다.

5. 결론

본 논문에서는 바닥에 장애물이 부착된 평행한 두 평판사이 유동에서 $Re=1,000$ 인 경우와 $Re=3,500$ 인 경우에 대해서 장애물 뒤의 난류 구조 및 거동에 대해서 고찰하였다. $Re=1,000$ 인 경우에는 장애물 위의 선단으로부터 약 $0.8h$ 지점까지는 정상유동임이 발견되었고 장애물 뒤로부터 약 $1.8h \sim 2.2h$ 영역에서 헤어핀 와류의 머리가 형성되었다. 반면에 $Re=3,500$ 인 경우는 모든 유동장이 비정상 유동이었고 헤어핀 와류의 머리는 선단으로부터 약 $0.4h \sim 0.6h$ 영역에서 형성되었다. 두 경우 모두 헤어핀 와류가 준주기적 거동을 보였지만 $Re=3,500$ 인 경우 St 가 약 1.60으로 $Re=1,000$ 인 경우보다 두 배정도 더 크울 알 수 있었다. 이는 $Re=3,500$ 인 경우의 헤어핀 와의 구조가 공간적으로 뿐만 아니라 시간규모(time scale)가 더 작은 거동을 보임을 의미한다. 헤어핀 와류의 한 주기는 와의 생성과 하류로 이동 그리고 소멸하는 과정을 이루고 두 경우 모두 모멘텀의 변화가 큰 자유전단층에서 헤어핀 와가 발견되었다. $Re=1,000$ 인 경우 헤어핀 와류의 머리의 이동속도는 입구 유동 속도의 반 정도로 헤어핀 와류의 머리중심에서의 주유동방향의 유체 속도보다 다소 작음이 관찰되었다. $Re=1,000$ 인 경우에 바닥 면에서의 와의 구조를 관찰한 결과 재부착 지점에서 작은 규모의 와들이 활발하게 거동하였고 하류 영역에서 와의 늘어남(elongation)이 관찰되었다.

참고문헌

- (1) Jeong, J., Hussain, F., Schoppa, W. and Kim, J., 1997, "Coherent Structures near the Wall in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 332, pp. 185~214.
- (2) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69~94.
- (3) Haidari, A. and Smith, C., 1994, "The Generation and Regeneration of Single Hairpin Vortices," *J. Fluid Mech.*, Vol. 277, pp. 135~162.
- (4) Elavarasan, R. and Meng, H., 2000, "Flow Visualization Study of Role of Coherent Structures in a Tab Wake," *Fluid Dyn. Research*, Vol. 27, pp. 183~197.
- (5) Yang, K. S., Spalart, P. R. and Ferziger, J. H., 1992, "Numerical Studies of Natural Transition in a Decelerating Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 240, pp. 433~468.
- (6) Lesieur, M., 1996, "Large-Eddy Simulations of Shear Layers," *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 12, pp. 197~208.
- (7) Suksangpanomrung, A., Djilali, N. and Moinat, P., 2000, " *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 655~663.
- (8) 황종연, 양경수, 1999, "돌출된 표면 위의 층류유동에 대한 전산 해석적 연구 (I), 유동해석," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제11호, pp. 1418~1425.
- (9) 황종연, 양경수, 1999, "돌출된 표면 위의 층류유동에 대한 전산 해석적 연구 (II), 위상학적, 기구학적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권, 제11호, pp. 1426~1433.
- (10) Kim, J., and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Computational Physics* Vol. 59, pp. 308~323.
- (11) Yang, K. and Ferziger, J., 1993, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Obstacle Flow Using a Dynamic Subgrid-Scale Model," *AIAA J.*, Vol. 31, No. 8, pp. 1406~1413.
- (12) Shah, K., "Large Eddy Simulation of Flow Past a Cubic Obstacle," 1998 Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- (13) Baker, C. J., 1978, "The Laminar Horseshoe Vortex," *J. Fluid. Mech.*, Vol. 95, pp. 347~367.
- (14) Pauley, L. L., Moin, P., and Reynolds, W. C., 1988, "A Numerical Study of Unsteady Laminar Boundary Layer Separation," Report No. TF-34, Thermo-sciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
- (15) Tennekes, H. and Lumley, J., 1972, "A First Course in Turbulence," *The MIT Press*.