

돌출된 표면 위의 층류유동에 대한 전산 해석적 연구 (I)

- 유동 해석 -

황 종 연* · 양 경 수**

(1999년 4월 13일 접수)

Numerical Study of Laminar Flow over a Protruding Surface (I)

- Flow Analysis -

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Horseshoe Vortex(말굽와류), Junction(접합), Singular Point(특이점), Saddle Point, Nodal Point, Focus

Abstract

Flow over a protruding surface is investigated using numerical simulation. We consider flow between two parallel plates with a cube mounted on one side of the channel. As the flow approaches the cube, the adverse pressure gradient produces three-dimensional boundary-layer separation, resulting in the formation of horseshoe vortices. The objective of our study is to clarify both the steady and the unsteady characteristics of the vortex system. As the Reynolds number increases, the structure of the vortices near the cube becomes complex and the number of vortices increases. The distribution of skin friction on the cube-mounted wall reflects the effect of the horseshoe vortices. All these results are consistent with the experimental findings currently available.

1. 서 론

평판과 돌출된 장애물의 접합부에서 발생하는 박리에 의해 생성되는 말굽와류는 3차원 경계층 유동에서 흔히 발견되는 현상이다. 주유동 방향으로 발달하는 경계층은 장애물의 저해효과에 의해서 역압력 구배를 겪게 된다. 이런 매우 큰 역압력 구배 때문에 3차원 경계층 박리가 생성되고 장애물을 따라 흐르면서 와류를 형성하게 되는데

이 와류의 형태가 말굽의 모양과 흡사해서 이를 말굽와류라고 한다. 이러한 유동을 기하학적 측면에서 juncture flow라 부르는데 이는 고전적인 유체역학의 주제일 뿐만 아니라 항공역학 등의 여러 응용분야에서도 중요한 문제이다.

가령 항공기 동체와 날개 접합부 근처에서는 와류의 생성에 의해 증가된 항력을 유발할 수 있으며, 열 교환기 평판의 junction부분에서는 강한 전단응력이 생기며 열전달이 활발히 일어날 수 있다. 또한 터보머신의 터빈 cascade passage, 교각과 강바닥 등에서 이러한 말굽와류 구조를 흔히 볼 수 있다. 잠수함이나 선박같은 경우 표면의 튀어나온 부분 뒤의 후류는 하류에 위치한 프로펠러의 성능을 저하시킬 수도 있으므로 이러한 복잡한 유동에 대한 정확한 이해는 선박용 기계

* 인하대학교 대학원

** 회원, 인하대학교 기계·항공·자동차공학부

의 효율적 설계에 도움을 준다. 이밖에도 여러 경우의 응용 적인 유동에서도 말굽와류는 다양한 형태로 발견된다. 예를 들어 3차원 돌출물의 크기가 경계층 두께보다 아주 작은 경우(혹은 경계층내에의 매우 작은 거친 요소) 또한 말굽와류를 유발하며 특히 이 경우에는 층류경계층을 유지하기 위한 요소의 가능한 높이에 대한 측정이 중요시된다. 이는 층류 유동장의 제어 측면에서도 중요한 문제로 인식되고 있다.

말굽와류에 대해서 여러 측면의 연구가 진행되어 왔다. 횡방향 대칭면에서는 복잡한 양상의 와류 시스템이 발견되는데 이 말굽와류 시스템은 돌출된 장애물의 기하학적 형상, 레이놀즈수, 경계층 두께 등 여러 가지 유동 파라미터에 따라 성질이 달라지며 정상 또는 비정상의 특성이 나타날 수 있으나 이러한 특성에 대해서는 아직도 이해되지 못한 점들이 산재해 있다. 레이놀즈수가 증가함에 따라 와류시스템이 복잡해지고 또 여러 와류가 생성되면서 주기적인 비정상(unsteady) 현상으로 발전해 나간다.⁽¹⁾ 말굽와류를 제어하기 위한 연구⁽²⁾와 장애물대신 jet에 의해서 생성되는 말굽와류의 주기적 비정상성에 대한 연구⁽³⁾도 시도되었다. 특히 이러한 형태는 juncture flow의 범주에 속하지 않지만 jet와 juncture 사이의 위상학적 개념을 도입하여 juncture flow와 매우 유사한 유동현상을 발견하였다. 그러나 이 대부분이 실험으로 행해지고 있으며⁽²⁻⁶⁾ 그에 따른 정확성과 계측 기술의 한계 때문에 아직까지도 이런 현상에 대해 명쾌한 해답이 제시되어지지 않고 있다.

이를 극복하기 위해 최근 들어 급속히 발전된 컴퓨터 성능과 알고리즘을 기반으로 말굽와류에 대한 전산 해석적 연구가 수행되어 왔다.⁽⁷⁻⁹⁾ Ono⁽⁷⁾는 원형단면 실린더 형상에서 난류 유동장에 대해 실험과 전산해석을 병행하였다. 실린더 부근에서 난류강도를 측정하였으며 압력분포 또한 계산하였다. Visbal⁽⁸⁾은 원형단면 실린더 형상에서의 juncture 유동을 전산 해석적 방법으로 비정상 현상을 연구하였다. 그는 말굽와류 구조에서 경우에 따라 Saddle point of attachment(new topology)와 Saddle point of separation (standard topology)이 생성될 수 있다고 보고하였는데 본 연구의 경우에서도 실제로 확인되었다. 그는 또한 비정상 말굽와류에 대해서는 다음과 같은 주

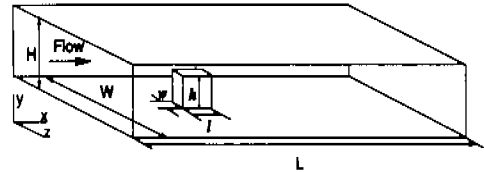


Fig. 1 Geometric configuration.

기성을 갖는다고 보고하였다. 1) 새로운 와류가 주기적으로 생성되며 와류들이 실린더를 향해 하류로 대류 한다. 2) 실린더 바로 앞의 와류가 실린더 쪽으로 더욱 가까이 이동한다. 3) 그 와류가 점차 소멸하며 대류 되어 다가오는 상류쪽 와류와 병합한다. Kaul and Kwak⁽⁹⁾은 원형단면 실린더 형상에 대해서 여러 가지 다양한 말굽와류의 메커니즘을 규명하였다. 실린더 후류에서의 박리점과 유동 현상을 자세히 보고하였고 그 3차원성을 관찰하였다. 그러나 Visbal 과 Kaul and Kwak의 경우 모두 원형단면 실린더의 양끝이 평판에 부착되어있는 경우를 해석하였고 횡방향 및 수직방향의 중심 평면들에 대해 대칭성이란 가정을 도입하는 한계가 있다.

본 연구에서는 한쪽 면에 정육면체의 장애물이 접합되어있는 두 평판사이에서(Fig. 1) 발생하는 말굽와류의 구조에 대해 전산해석을 수행하였다. 횡방향으로 주기조건을 적용하여 실제로는 장애물이 횡방향으로 주기적으로 배열된 경우에 해당된다. 본 연구에서는 장애물사이의 간격이 길어 이웃하는 말굽와류사이의 간섭이 없는 즉 단일 장애물에 의한 말굽와류인 경우와 간섭이 존재하는 경우 모두 고려하였다. 이 형상은 난류 유동장에서 LES 기법을 이용하여 수치적 연구를 수행한 Shah⁽¹⁰⁾의 유동장과 유사하다. 대칭성이란 제약을 탈피하여 wake가 존재할 수 있고 또 한쪽 면에만 장애물이 접합되어 장애물 위로 유동이 지날 수 있는 유동장을 높은 해상도의 수치모사를 이용하여 해석하였다. 따라서 전 유동장에서 계산이 수행되었기 때문에 파다한 CPU 시간이 소요되었다. 이러한 유동형상은 실제로 컴퓨터칩(chip)이 부착된 인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)과 같은 많은 상업적 유동에서 발견된다. 또한 횡방향으로의 주기적인 구조는 일정

한 간격으로 세워진 교각이나 항공기 날개의 난류 발생장치, 가스터빈의 rotor와 blade들, 그리고 열교환기 등에서 쉽게 볼 수 있다. 도시공학적 측면에서는 직육면체 형상의 빌딩들과 바닥 면에서 말굽와류가 생성될 수 있다. 3차원 비정상 비압축성 나비에-스톡스 방정식의 해로부터 와류의 구조를 가시화 하였고 그 유동특성과 메커니즘을 규명하였다. 원형 단면의 실린더에 대한 실험은 많이 수행되어 왔지만 육면체가 부착된 평판사이 유동의 경우에 대한 자료는 저자가 아는 한 극히 드물다. 본 연구와 비슷한 형상에 대한 실험이 Hunt *et al.*⁽¹¹⁾에 의해서 수행되었다. 그는 기구학적, 위상학적 측면에서 말굽와류의 특이점들을 고찰하였다. 또한 본 연구에서는 층류 정상 말굽와류 상호간의 거리에 따른 파라메터적 연구를 수행하여 장애물 상호간 끼치는 영향의 정도를 확인하였으며 여러 범위의 레이놀즈수에 대해 유동의 의존성을 규명하였다. 또한 Baker⁽¹⁾의 연구에서 보고된 바 있는 정상 및 비정상 유동 판정 자료를 토대로 비록 기하학적인 형상은 다르지만 그것을 본 연구에 적용하여 불안정성 메커니즘을 발견할 수 있었다.

2. 연구방법 및 이론

2.1 수식전개 및 수치해석법

본 연구에서는 비압축성 유체에 대해 다음과 같은 연속 방정식과 나비에-스톡스 방정식이 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

여기서 u_i 는 흐름방향(streamwise, x 혹은 x_1), 수직방향(normal, y 혹은 x_2), 횡방향(spanwise, z 혹은 x_3)의 속도성분이 각각 u, v, w (혹은 u_1, u_2, u_3)인 속도벡터이고, p 는 압력, Re 는 레이놀즈수이다. 사용된 모든 변수들은 속도 스케일로서 평판사이의 평균속도 (U_b)로, 길이 스케일로서 돌출물의 높이 h 로 무차원화 하였고 압력

차이는 $\frac{1}{2} \rho U_b^2$ 으로 무차원화 하였다. Re 는 ν 를 동점성계수라 할 때 $U_b h / \nu$ 로 정의된다. 사용된 코드는 유한체적법을 적용하여 작성되었고, 사용된 격자는 비균일 엇갈림 직교격자(nonuniform staggered cartesian grid)로서 주어진 형상에 대해서 가장 적합한 격자라고 할 수 있다. 시간에 따른 수치해결 구하기 위해서 fractional step method⁽¹²⁾가 사용되었다. 모멘텀방정식의 시간에 따른 적분은 복합적인 형태로서, 대류항(convective terms)은 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법으로 explicit하게 적분하였고, 점성항(viscous terms)들은 Crank-Nicolson 방법으로 implicit 하게 적분이 수행되었다. 사용된 수치해석 알고리즘은 Yang^(13,14) 및 Shah⁽¹⁰⁾의 논문에 자세히 설명되어 있다.

2.2 경계조건 및 유동 파라미터

본 연구는 두 부분으로 나뉘어질 수 있다. 비교적 낮은 레이놀즈수에서 정상적인 층류 말굽와류에 대한 연구와 높은 레이놀즈수에서 비정상적인 말굽와류에 대한 연구이다. 두 경우 모두 모든 고체면에서는 no-slip 조건이, z 방향으로의 주기 조건이 사용되었다. 즉 횡방향으로 장애물이 주기적으로 배열된 경우에 해당된다. x 방향의 입구에서는 정상 말굽와류의 경우 완전히 발달된 층류 속도분포를 적용하였고, 비정상 말굽와류의 경우 균일한 속도분포를 적용하였는데 이는 비정상 해를 얻기 위하여 경계층을 유동장의 입구에서부터 발달시켜 돌출물 앞에서 일정한 배제두께(displacement thickness, δ^*)를 얻기 위함이다. 출구에서는 두 경우 모두 대류경계조건(convective boundary condition)이 적용되었다.⁽¹⁵⁾ 출구경계조건에 의한 영향을 최소화하기 위하여 유동방향의 계산영역을 충분히 길게 설정해야 하고, 고 레이놀즈수의 경우, 저 레이놀즈수보다 더욱 긴 계산영역을 설정하였으므로 그만큼 많은 격자점의 수가 요구되었다. 수행한 모든 유동의 계산에서는 돌출물의 형상을 유동방향과 횡방향의 길이가 같고($l/h = w/h = 1$), 돌출물의 높이가 평판사이 간격의 반($h/H = 0.5$)인 정육면체로 고정하였다.(Fig. 1) 사용된 계산 영역의 크기는 $Re = 250$ 이하의 저 레이놀즈수에서는 유동, 수직, 횡방향

으로 각각 10h, 2h, 7h이고 돌출물의 앞면은 유동장의 입구에서부터 3h인 지점에 위치한다. 특히 이 Re 범위에서는 횡방향의 계산영역의 크기는 영역확장 연구 결과 5h이상이면 장애물 상호간의 영향이 없음이 밝혀졌으며 그에 대한 파라메터적 연구가 수행되었다.

Re=250 보다 높은 레이놀즈수에서는 각각 15h, 2h, 7h이고 돌출물의 앞면은 층류 정상 발달과류의 경우 3h인 지점에, 비정상 발달과류의 경우 원하는 배제두께의 위치인 5h인 지점에 위치하게 된다. 정상 층류 유동장의 경우 입구에서의 영향이 최소화되는 지점에 돌출물을 위치시켰으며 비정상 유동장의 경우 Baker⁽¹⁾의 데이터를 참고하여 돌출물의 위치가 결정되었다. 사용된 격자 점의 수는 격자 세분화 연구(grid-refinement study)를 통해 결정하였다. 자세한 계산 정보는 Table 1에 나타나 있다.

소요된 계산 시간은 ETRI 슈퍼컴퓨팅 센터의 Cray-c90에서 한 시간단계당 저 레이놀즈수의 경우 약 12초, 고 레이놀즈수의 경우 약 30초, 비정상 유동장의 경우 약 38초가 소요되며, 수행된 유동장을 얻기 위하여 비정상 유동장의 경우 약 12,000시간 단계가 필요하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 정상 층류 juncture 유동

Juncture flow의 유동장에는 여러 가지 종류의 특이점(singular points)이 발견된다. 특이점들은

크게 node(N)와 saddle point(S)로 나뉘어 질 수 있다.⁽¹¹⁾ Node는 다시 nodal point (of attachment 또는 separation)와 focus (of attachment 또는 separation) 두 가지로 나뉘어 진다. Nodal point는 주변의 유선 (streamline) 들이 한 직선(critical line)에 접하면서 들어오거나(separation) 나오는 (attachment) 점이고 focus는 나선을 그리며 들어 오거나(separation) 나오는(attachment) 점이다. saddle point는 주위의 유선들이 한 직선에 접하며 들어오면서 다른 한 직선에 접하며 밖으로 나가는 점이다. Juncture flow에서는 이러한 특이점들에 대한 이해가 필수적이다. 특이점들에 대한 자세한 정의와 고찰은 Hunt⁽¹¹⁾의 연구를 참조하기 바란다.

본 연구에서는 레이놀즈수에 따른 정상유동의 변화를 관찰하기 위하여 각 Re에 해당하는 평판 사이유동의 정상해를 유동장의 입구경계조건으로 하여 정상해로 수렴할 때까지 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 Re=350인 경우에 횡방향으로 대칭 평면인 z=3.5 위치의 x-y 평면의 유선과 아래 평면 첫 번째 y 격자 점에 해당되는 x-z 평면에서의 유선을 보여준다. 유동의 박리가 발생하는 지점을 명확히 볼 수 있고 그로 인해 vortex1이 생성되었다. 그 박리 지점이 saddle point가 되며(Fig. 2(b)) 돌출물 바로 앞에서 부착

Table 1 Computational cases.

Flow Type	Re	Resolution	L/h
Steady	5	128×64×96	10
	25	128×64×96	10
	50	128×64×96	10
	100	128×64×96	10
	150	128×64×96	10
	250	128×64×96	10
	350	224×96×96	15
900	224×96×96	15	
Unsteady	3,500	256×96×96	15

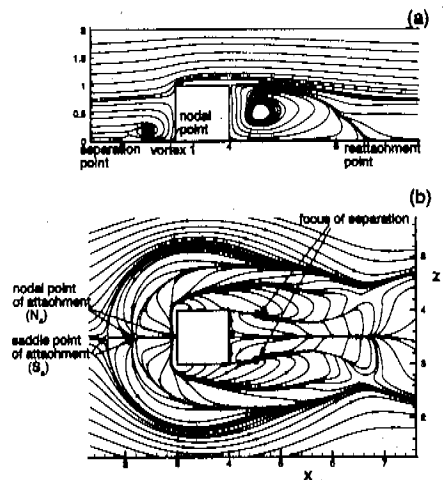


Fig. 2 Streamlines at Re=350; (a) at the center plane, (b) at the x-z plane at y/h = 0.0053.

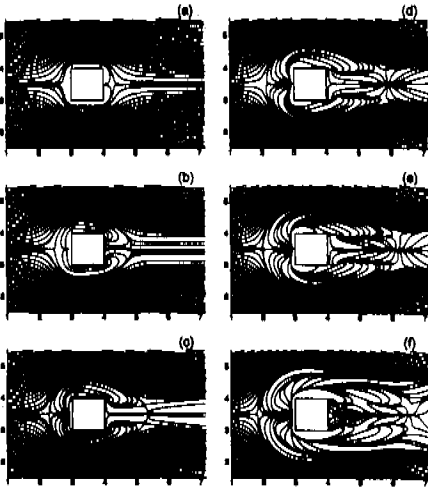


Fig. 3 Streamlines; (a) $Re=5$, $y/h=0.021$, (b) $Re=25$, $y/h=0.021$, (c) $Re=50$, $y/h=0.01$, (d) $Re=100$, $y/h=0.01$, (e) $Re=150$, $y/h=0.01$, (f) $Re=250$, $y/h=0.01$.

점(attachment point)인 node를 붙 수 있다(Fig. 2(a), Fig. 2(b)). 따라서 말굽 형태의 와류가 생성 되기 위해서는 박리가 반드시 일어나야 하며 그로 인해 vortex 1이 존재해야 함을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a)에서 (f)까지는 각각 $Re=5, 25, 50, 100, 150, 250$ 에서 아래 평면 위 첫 번째 격자 점에 해당하는 $x-z$ 평면에서의 유선을 보여준다. 레이놀즈수가 매우 작을 때 ($Re < 25$)에는 박리가 일어나지 않고 예상대로 말굽와류 또한 발견할 수 없었다. $Re=25$ 이상이 되면 역압력 구배로 인하여 박리가 발생되면서 말굽와류가 관찰되는데 돌출물 바로 앞에서 node가 생성되고 상류에서는 saddle point가 관찰된다.

돌출물 뒷면으로부터 후류에서의 유선 분기점까지의 거리로 정의된 돌출물 뒤쪽 bubble 길이 (l_B)의 Re 에 따른 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 레이놀즈수의 증가에 따라 l_B 가 일정하게 증가하다가 높은 Re 에서 다시 증가율이 감소하는 경향을 보여준다. 즉 높은 Re 에서는 장애물 주위의 유동이 큰 횡방향 모멘텀을 얻게되고 따라서, envelope의 길이의 증가율은 작아지고 폭은 커지는 경향이 나타난다.

한편 3차원 박리가 생성되는 원인은 서론에서

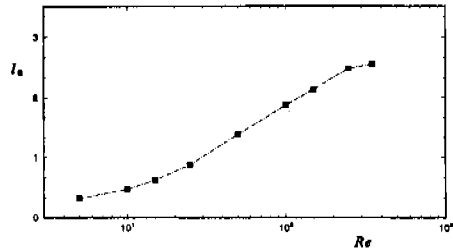


Fig. 4 Dependency of the rear bubble length on Re .

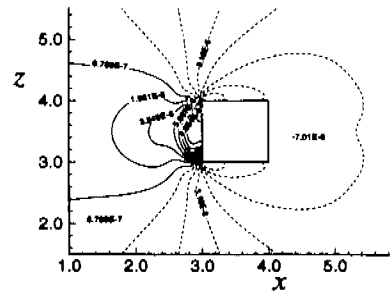


Fig. 5 Pressure contour at the first grid point away from the bottom wall ($y/h=0.021$); $Re=150$.

도 언급한 바와 같이 돌출물의 저해효과에 의한 역압력 구배 때문이고 돌출물의 표면을 따라 유동이 trailing off 되면서 말굽와류의 형태가 나타나는 것이다. Fig. 5를 보면 바닥근처 돌출물 앞에서 매우 경사가 급한 역압력 구배를 볼 수 있다. 이렇게 생성된 말굽와류에 의한 유동을 침식을 유발할 수 있고 해저구조의 안전성에 문제가 되며 일종의 피로에 의한 파괴의 원인이 될 수 있다.

Fig. 6은 $Re=900$ 일 때 돌출물 근처 바닥 면에서 x 방향 전단력과 y 방향 전단력을 벡터 적으로 더한 후 그 크기를 나타낸 것이다. 돌출물 주위에서 침식을 유발하는 강한 전단용력을 볼 수 있으며 이는 말굽와류의 형태와 매우 흡사하다.

Fig. 7은 각각의 Re 에 대하여 $y=0$ 에서 횡방향 대칭선 ($z=3.5$)을 따라 표면 마찰 계수 (skin friction coefficient)의 변화를 보여준다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)를 돌출물 부근에서 확대한 그림이다. 박리점인 saddle point와 부착점인 node에서

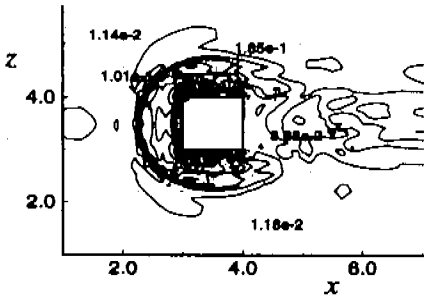


Fig. 6 Shear stress on the lower wall; $Re=900$.

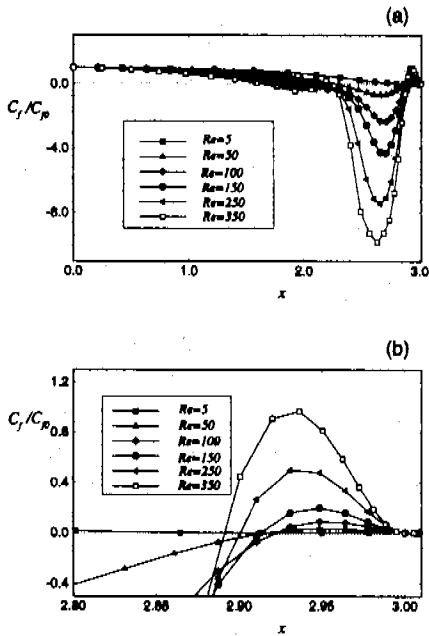


Fig. 7 Dependency of the local C_f on Re .

표면마찰이 0이 됨을 알 수 있다. 또한 표면마찰계수(C_f)의 크기가 Fig. 6에서 유추할 수 있듯이 말굽와류 영역에서 매우 큼을 볼 수 있다. 레이놀즈수가 큰 경우 돌출물에 의한 마찰의 영향을 더 크게 받음을 알 수 있다. 여기에서 각각의 Re 에 따라 돌출물에 의한 마찰 효과를 상대적으로 명확히 관찰하기 위하여 C_f 를 입구에서의 표면마찰계수 C_{f0} 로 나눈 값을 제시하였다.

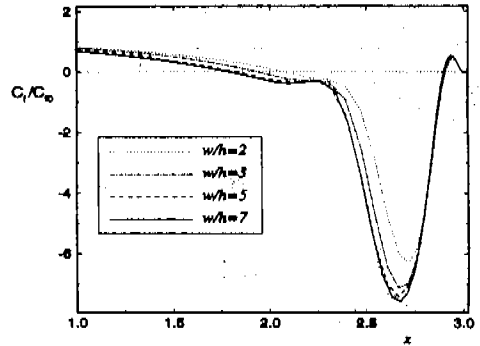


Fig. 8 Dependency of skin-friction coefficient upstream of the obstacle on spanwise distance between neighboring obstacles; $Re=250$.

횡방향 유동장 길이의 의존성을 알아보기 위하여 $Re=250$ 에서 횡방향 유동영역의 크기에 대한 파라메트릭 연구를 수행하였다. 그 결과 $W/h=5$ 이상의 계산영역에서는 돌출물 상호간의 의존성이 거의 없는 것으로 밝혀졌으며 그 이하에서는 상호간 의존성에 의해 여러 가지 물리량들의 차이가 발생하였다. Fig. 8 은 각각의 경우에 대해서 C_f 를 보여주는데 장애물 사이의 간격이 좁을수록 최대 마찰력은 작아짐을 알 수 있다. 레이놀즈수 350인 경우도 250인 경우의 결과와 크게 다르지 않았다. 즉 횡방향 계산영역의 크기가 5 h보다 크면 횡방향 주기조건에 의한 장애물간의 상호적 영향 및 간섭을 무시할 수 있다는 사실을 확인했다.

3.2 비정상 juncture 유동

본 연구에서는 Re 를 증가시켜 $Re=1,500$ 까지 계산을 수행하였으나 말굽와류의 비정상성은 발견되지 않았다. Shah⁽¹⁰⁾는 본 연구에서와 같은 형상에서 $Re=2,100$ 의 난류유동을 계산하였다. 따라서 $Re=2,100$ 을 임계 레이놀즈수의 한계로 본다면 완전히 발달된 입구 경계조건으로는 비정상 말굽와류를 얻는 것이 매우 어려움을 알 수 있다.

비정상 말굽와류를 얻기 위해서 두 가지 측면의

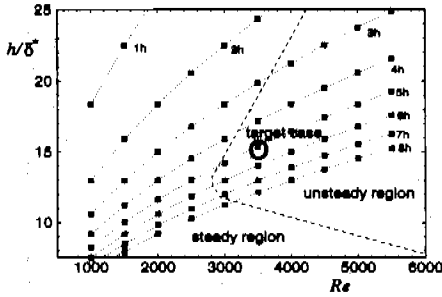


Fig. 9 Dependency of unsteady region on Re and displacement thickness (δ^*) for the laminar horseshoe vortex in a boundary layer.⁽¹⁾ Here, h represents the height of the circular cylinder in Baker's experiment. Symbols indicate $h/\delta^* - Re$ relations at various distances from the leading edge in Blasius flow.

노력이 시도되어졌다. 비정상 해를 얻기 위해 필요한 관성력 즉 레이놀즈 수와 적절한 배체두께에 돌출물을 위치시키는 것이다. 원형단면 실린더에 대한 Baker의 실험자료를 본 연구에도 적용하여 적절한 Re 와 돌출물의 위치를 얻을 수 있었다.(target case, Fig. 9) 즉 Fig. 9에서의 각 점들은 돌출물 앞면의 x 좌표(1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 7h, 8h)에 대해서 Blasius 유동의 Re_x 를 본 연구의 Re 로 환산하여 Re 와 δ^* 의 관계를 나타낸 것이다. 또한 Baker의 결과를 이용하여 비정상 해가 나타나는 구역을 점선으로 표시하였다.

만일 완전히 발달된 유동을 유동장의 입구에 적용하면 h/δ^* 가 작아지고 따라서 모든 Re 에 대해 비정상 와류구조를 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다. 이는 경계층 밖의 inviscid 영역의 존재가 유동 불안정성에 필수적이며 유동전체가 경계층영역이라면 벽면 no-slip에 의한 모멘텀의 전달이 비정상성을 방해한다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 $Re=3,500$, $h/\delta^*=15.0$, 즉 돌출물의 앞면을 5h인 지점에 위치시키고 균일한 입구 속도분포를 적용시켜 시도한 결과 비정상 층류 와류 system을 얻을 수 있었다. 정상유동의 경우는

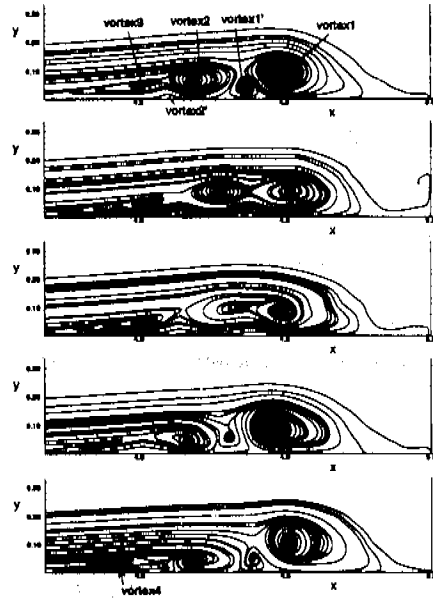


Fig. 10 Unsteady vortex system ; $Re=3,500$.

레이놀즈수가 증가할수록 와류의 개수가 짝수로 여섯 개까지 증가하지만 이들의 비정상적인 움직임은 볼 수 없었다.

Fig. 10은 와류시스템의 대표적인 주기적 거동을 보여준다. 이 그림에서 한가지 큰 특징은 vortex2가 vortex1으로 주 유동의 속도와 비슷한 정도로 대류하여 merge하며 동시에 새로운 vortex4가 생성된다는 것이다. 또한 vortex1'과 같은 미약한 와류의 존재는 유동장의 연속을 만족하는 속도 구배의 필요에 의한 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 평행한 두 평판사이 유동에서 정육면체/평판구조의 정상 및 비정상 층류 juncture flow에 대해서 고찰하였다. 실제 유동에 위배되는 가정들을 가급적 배제하여 나비에-스톡스 방정식에 대해 전산해석을 수행하였다. 예상한대로 역압력 구배에 의해서 3차원 박리가 일어났고 그로 인해 말굽와류가 생성되었다. 이 말굽와류의 형태나 크기 또는 와류시스템은 레이놀즈수에 크게 영향을 받음이 확인되었으며 3차원적 구조를 자세히 관찰할 수 있었다. 그리고 말굽와류의 큰

특정인 특이점들 즉 saddle point와 nodal point에서의 물리적 현상을 규명하였다. 또한, 횡방향으로 이웃하는 말굽와류 사이의 간섭을 연구한 결과 상호 간섭을 받지 않는 횡방향 크기를 알 수 있었으며 영역을 축소한 경우 최대 마찰력이 작아짐을 확인 할 수 있었다. 비정상 층류 말굽와류 시스템이 생성되기 위해서는 적절한 레이놀즈수와 배제두께의 존재가 필요한 것이 확인되었고 와류시스템의 비정상적 현상이 관찰되었다. 와류가 주기적으로 공급이 되고 소멸하는 현상이 관찰되었으며 이는 원형단면 실린더의 경우와 다소 차이를 보인다. 한편 말굽와류 시스템을 위상학적(topological)으로 관찰한 결과 원형단면 실린더의 실험과 많은 면이 일치되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(95-0200-16-01-3)와 재정적 지원으로 수행되었으며 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Baker, C. J., 1978, "The Laminar Horseshoe Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 95. pp. 347~367.
 (2) Kubendran, L. R., and Harvey, W. D., 1988, "Flow Control in a Wing/Fuselage-type Juncture," *AIAA paper* 88-0614.
 (3) Kelso, R. M., and Smits, A. J., 1995, "Horseshoe Vortex Systems Resulting from the Interaction Between a Laminar Boundary Layer and a Transverse Jet," *Phys. Fluid* 7(1), pp. 153~158.
 (4) Larousse, A., Martinuzzi, R., and Tropea, C., 1991, "Flow Around Surface-Mounted, Three-Dimensional Obstacles," *TURBULENT SHEAR FLOWS*. Technical University of Munich., pp. 14-4-1~14-4-6.
 (5) Thomas, S. W., 1987, "The Unsteady Characteristics of Laminar Juncture Flow," *Phys. Fluids* 30 (2), pp. 283~285.

(6) Baker, C. J., 1991, "The Oscillation of Horseshoe Vortex Systems," *J. Fluids Eng.*, Vol. 113. pp. 489~495.
 (7) Ono, K., Tamura, T., Kuwahara, K., and Motohashi, T., 1991, "Instability of Flow Past an Isolated Roughness Element in the Boundary Layer," *TURBULENT SHEAR FLOWS*. Technical University of Munich., pp. 14-5-1~14-5-6.
 (8) Visbal, M. R., 1991, "Structure of Laminar Juncture Flows," *AIAA J.*, Vol. 29. No. 8. pp. 1273~1282.
 (9) Kaul, U. K., and Kwak, D. C., 1985, "A Computational Study of Saddle Point Separation and Horseshoe Vortex System," *AIAA paper* 85-0182.
 (10) Shah, K., "Large Eddy Simulation of Flow Past a Cubic Obstacle," 1998 Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University.
 (11) Hunt, J. C. R., Abell, C. J., Peterka, J. A., and Woo, H., 1978, "Kinematical Studies of the Flows Around Free or Surface-Mounted Obstacles; Applying Topology to Flow Visualization," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86. part 1. pp. 179~200.
 (12) Kim, J., and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Computational Physics* 59, pp. 308~323.
 (13) Yang, K. S., and Ferziger, J. H., 1993, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Obstacle Flow Using a Dynamic Subgrid-Scale Model," *AIAA J.*, Vol. 31. No. 8. pp. 1406~1413.
 (14) 양경수., 1996, "천이박리유동의 직접수치모사, Part I : 주 불안정성," 대한기계학회 논문집(B), 제20권. 제9호. pp. 2965~2972.
 (15) 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.