

# 정육면체 주위 층류 유동에 근처 벽면이 미치는 영향

김 동 주<sup>1</sup>

## WALL EFFECTS ON LAMINAR FLOW OVER A CUBE

Dongjoo Kim<sup>1</sup>

*Laminar flow over a cube near a plane wall is numerically investigated in order to understand the effects of the cube-wall gap on the flow characteristics as well as the drag and lift coefficients. The main focus is placed on the three-dimensional vortical structures and its relation to the lift force applied on the cube. Numerical simulations are performed for the Reynolds numbers between 100 and 300, covering several different flow regimes. Without a wall nearby, the flow at  $Re=100$  is planar symmetric with no vortical structure in the wake. However, when the wall is located close to the cube, a pair of streamwise vortices is induced behind the cube. At  $Re=250$ , the wall strengthens the existing streamwise vortices and elongates them in the streamwise direction. As a result, the lift coefficients at  $Re=100$  and 250 increase as the cube-wall gap decreases. On the other hand, without a wall, vortex shedding takes place at  $Re=300$  in the form of a hairpin vortex whose strength changes in time. The head of hairpin vortex or loop vortex, which is closely related to the lift force, seems to disappear due to the nearby wall. Therefore, unlike at  $Re=100$  and 250, the lift coefficient tends to decrease more or less as the cube approaches the wall.*

**Key Words :** 정육면체(Cube), 후류(Wake), 면대칭 유동(Planar-symmetric flow), 벽면 효과(Wall effect)

### 1. 서 론

지난 수십년간 원형 실린더 및 사각 실린더는 대표적인 뒤편 물체(bluff body)로서 많은 유체역학 연구자들의 관심 대상이었다[1-3]. 그 이유는 뒤편 물체에서 발생하는 보텍스 shedding(vortex shedding)이 구조물의 진동 및 유동 소음을 발생시키므로 이를 효과적으로 제어하는 것이 매우 중요하기 때문이다. 최근 컴퓨터 하드웨어 및 수치해석 알고리즘의 발달로 구(sphere)와 같은 3차원 형상의 물체 주위의 유동 및 보텍스 shedding의 특성을 연구하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 구 주위 유동은 박리점이 고정되지 않는다는 점에서 원형 실린더와 비교되는 반면, 박리점이 고정되는 정육면체(cube)는 사각 실린더와 비교된다. 최근의 연구[4,9]를 통해 구 주위의 유동 특성은 원형 실린더 유동과 매우 다르다는 사실이 잘 알

려졌다. 하지만, 정육면체에서 발생하는 후류 및 보텍스 shedding의 특성에 대한 선행연구는 소수의 문헌을 제외하고는 찾아보기 힘들다.

정육면체 후류에 대한 이전 연구를 살펴보면, Raul 등[10]은 와도-벡터포텐셜 방법을 이용하여 레이놀즈수 100 이하의 정상 유동을 해석하고, 정육면체 낙하실험 결과와 항력계수를 비교하였다. 그 후 Raul과 Bernard[11]는 관심 영역을  $Re=2,000$ 과 14,000의 난류 유동장으로 확장하였다. 최근 Saha[12]는 레이놀즈수 300 이하에 대해 연구를 수행하여, 비정상 유동으로의 천이가 레이놀즈수 265와 270 사이에서 발생함을 보였다. 한편, 본 연구자[13]는 정육면체 및 직육면체 주위의 층류 유동을 수치해석적으로 연구하여 3차원 유동구조 및 구 주위 유동과의 차이를 분석하였다.

뒤편 물체 주변에 벽이 존재하는 경우, 벽의 존재는 물체에서 발생하는 보텍스의 비대칭성을 야기하며 후류 및 보텍스 shedding에 큰 영향을 준다. 실린더와 같은 2차원 형상 주위의 유동에 벽이 미치는 영향에 대한 연구는 이미 오래전부터 많은 연구가 수행되었다[14-16]. 하지만, 구와 같은 3차원 형

접수일: 2011년 2월 11일, 수정일: 2010년 3월 10일,

게재확정일: 2011년 3월 18일.

1 정회원, 금오공과대학교 기계공학과

E-mail: kdj@kumoh.ac.kr

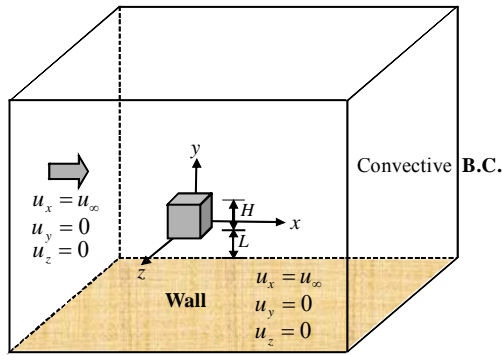


Fig. 1 Coordinate system and boundary conditions

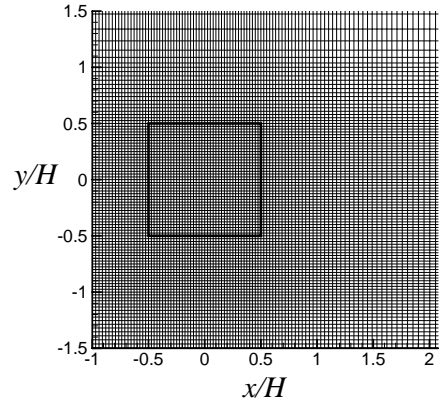


Fig. 2 Mesh near a cube on the  $(x, y)$ -plane for the case of  $L/H=1$ . Thick lines denote the surface of the cube

상의 물체, 특히 정육면체 유동에 대해서는 벽면 효과에 대한 연구를 찾아보기 힘들다. 본 연구와 유사한 구에 대한 선행연구를 찾아보면, Zeng 등[17]은 근처 벽면이 구에 작용하는 힘, 특히 양력에 미치는 영향을 조사하였다. 레이놀즈수가 100 미만일 때, 레이놀즈수 또는 벽과 구의 거리가 증가하면 양력계수는 감소하지만, 레이놀즈수가 100보다 큰 경우에는 레이놀즈수의 증가에 따라 양력 계수가 급격히 증가한다고 보고하였다. 이때, 양력 계수가 급격히 증가하는 이유는 구 후류에 발생하는 보텍스 구조 때문이라고 추정하였다. 하지만, 정육면체 후류에 근처 벽면이 미치는 영향에 대한 연구는 아직까지 수행된 적이 없다.

따라서, 본 연구에서는 벽 근처에 존재하는 정육면체를 지나는 층류 유동을 수치해석을 이용하여 예측한 후, 정육면체에 작용하는 항력 및 양력과 유동 구조의 상관관계를 분석하고자 한다. 특히, 3차원 보텍스 구조를 관찰함으로써 레이놀즈수와 벽과의 거리가 유동장의 불안정성 및 대칭성에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 Kim 등[18]이 제시한 가상경계방법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이 방법은 Navier-Stokes 방정식에 운동량 부가(momentum forcing)와 질량 원천/흡입(mass source/sink)을 도입함으로써 유동장 내에 존재하는 물체를 모사하는 방법으로, 지배방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} - q = 0. \quad (2)$$

여기서,  $f_i$ 와  $q$ 는 각각 물체 내부에 정의되는 운동량 부가와 질량 원천/흡입을 나타낸다. 모든 변수는 정육면체의 길이  $H$ 와 입구에서의 유동속도  $u_\infty$ 로 무차원화 하였고, 레이놀즈수는  $Re = u_\infty H / \nu$ 로 정의하였다. 최근 다수의 연구자들이 가상경계방법을 사용하고 있으며, 이 방법을 사용하여 본 연구자는 구 및 정육면체 주위의 유동장을 성공적으로 해석한 바 있다[7-9,13].  $f_i$  및  $q$ 를 구하는 방법 등의 자세한 수치해석 방법은 Kim 등[18]의 논문을 참고하길 바란다.

Fig. 1은 좌표계 및 경계조건을 나타내고 있으며, 본 연구에서는 직교좌표계에 가상경계방법을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 좌표계의 중심은 정육면체의 중심으로 정의하였다(Fig. 2 참조). 전체 계산영역은 주유동 방향( $x$ )과 횡 방향( $z$ )으로  $-15H \sim 15H$ , 벽에 수직 방향( $y$ )으로  $-(H/2 + L) \sim 15H$ 를 사용하였고,  $L$ 은 정육면체와 벽 사이의 거리를 나타낸다. 경계조건으로는 입구 및 원거리에서 Dirichlet 경계조건을 사용하였고, 출구에서는 대류경계조건을 사용하였다. 정육면체 아래에 위치한 벽면의 경계조건으로 점착조건을 사용하는 대신 입구 및 원거리와 동일한 자유유동속도를 사용하였다. 이러한 경계조건은 이전의 연구[16,17]에서도 자주 사용된 것으로, 물체가 움직이는 경우로 생각하면 주변 유체와 벽면이 모두 정지되어 있는 경우에 해당한다. 이러한 경계조건을 사용하면 점착조건에 의한 벽 경계층 효과를 배제하고 벽면의 효과만을 고려할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 2는 해석에 사용된 격자계의  $(x, y)$ -단면을 나타낸 것으로 굵은 선은 정육면체 표면을 의미한다. 정육면체와 벽 사이의 거리에 따라 사용된 격자의 수 및  $y$  방향 분포에 다소 차이가 있지만, 사용된 격자수는 대략 360만개이다. 전체 격자수는 해석 결과에 영향을 주지 않도록 테스트를 통해 결정

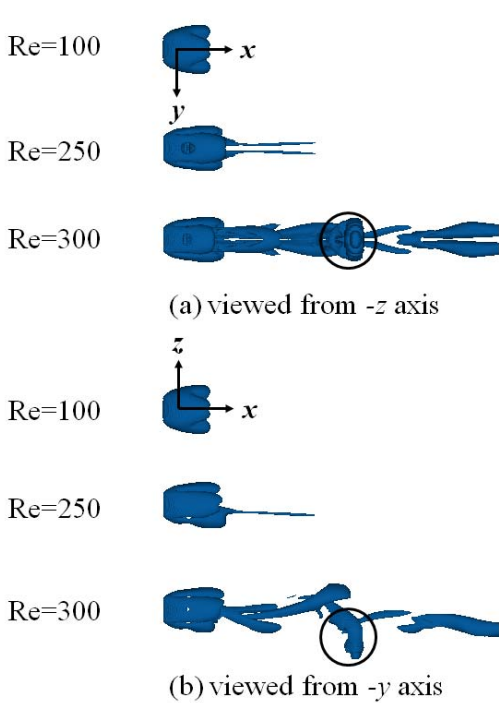


Fig. 3 Variation of vortical structures behind a cube far away from the wall with respect to the Reynolds number (In this study,  $\lambda_2 = -0.005$  is used for the vortex identification method of Jeong & Hussain[19].)

하였으며, 그림의 경우를 예로 들면  $x, y, z$  각 방향으로 288, 112, 112개의 격자를 사용하였다.

### 3. 결과 분석

#### 3.1 정육면체 근처에 벽이 없는 경우

벽면 효과를 분석하기에 앞서 벽이 정육면체 주변에서 충분히 멀리 떨어져 있는 경우( $L/H = 14.5$ )에 대한 해석 결과를 먼저 살펴본다. 본 연구에서 사용한 수치해석 방법과 동일한 방법으로 이 경우에 대한 해석 결과를 이미 선행연구[13]에서 검증하였기 때문에 여기서는 간단히 요약한다.

Fig. 3은 대표적인 레이놀즈수인 100, 250, 300의 경우에 대해 보텍스 구조를 나타낸 것으로, Jeong & Hussain[19]의 방법을 이용하였다.  $Re=100$ 에서는 정육면체 후류에 보텍스 구조가 발견되지 않으며, 유동장은  $(x, y)$ -평면 및  $(x, z)$ -평면에 대해 대칭을 이룬다. 하지만,  $Re=250$ 에서는 후류에 한 쌍의 주 유동 방향 보텍스가 발생하며, 그 결과  $(x, z)$ -평면에 대해서만 대칭성을 유지한다. 정상상태 유동인  $Re=100$  및 250과 달리  $Re=300$ 에서는 보텍스 shedding이 주기적으로 발생하며 비정상

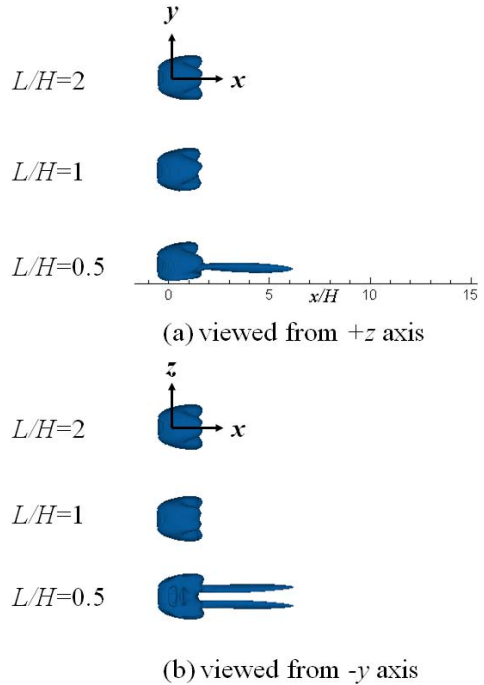


Fig. 4 Variation of vortical structures behind the cube depending on the distance from the wall at  $Re=100$

유동이 된다. 그림에서 원으로 표시된 것처럼 머리핀 형태의 보텍스(hairpin vortex)가 발생하며, 이 경우에도  $(x, z)$ -평면에 대한 대칭성은 여전히 유지된다. 여기서, 보텍스가 발생하는 방향 또는 대칭성을 유지하는 방향은 특정 방향으로 정해져 있지 않음을 주의해야 한다. 구 주위 유동의 해석[6,7,9]에서도 관찰되었듯이 보텍스의 발생 위치 및 유동의 대칭성은 초기 조건, 컴퓨터의 round-off 에러 등 수치해석 조건에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 압력에 대한 포아송 방정식(Poisson equation)을 풀 때  $x$ 와  $z$  방향으로 Multigrid 방법을 사용하고  $y$ 방향으로는 TDMA를 사용하였는데, 이 선택으로 인해 본 연구에서는 유동의 대칭면이  $(x, z)$ -평면으로 결정되었다고 판단된다.

#### 3.2 정육면체 근처에 벽이 존재하는 경우

##### 3.2.1 $Re=100$ 에서의 유동

Fig. 4는  $Re=100$ 에서 정육면체와 벽의 거리에 따른 3차원 보텍스 구조의 변화를 나타낸다.  $L/H=2$  또는 1의 경우, 벽이 근처에 없는 경우(Fig. 3)와 비교하여 유동 구조의 변화를 찾기 힘들다. 하지만,  $L/H=0.5$ 인 경우에는 벽의 영향으로 후류에 한 쌍의 보텍스가 발견되며, 벽이 없는  $Re=250$  유동

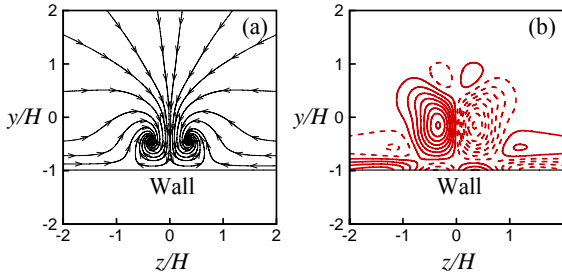


Fig. 5 Flow fields associated with a pair of streamwise vortices near the wall at  $L/H=0.5$  for  $Re=100$ : (a) streamlines at  $x/H=3$ ; (b) streamwise vorticity contours at  $x/H=3$

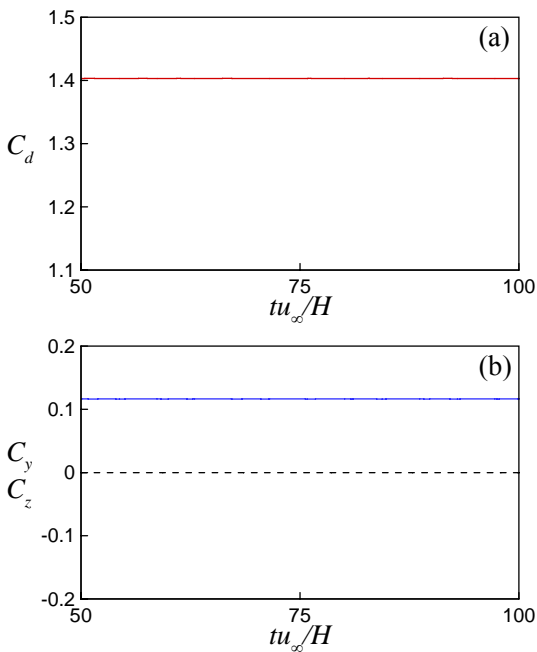


Fig. 6 Temporal variation of drag and lift coefficients at  $L/H=0.5$  for  $Re=100$ : (a) drag; (b) lift (—,  $C_y$ ; - - - - ,  $C_z$ )

(Fig. 3)에서 발견되는 보텍스의 구조와 매우 유사하다. 보텍스 주변의 유동장을 이해하기 위해  $x/H=3$ 에서 보텍스 주변의 주유동 방향 와도와 유선을 Fig. 5와 같이 그려보았다. 먼저 유선을 살펴보면, 보텍스의 중심 높이는  $y \approx -0.5H$ 이며, 보텍스 쌍에 의해 대칭면 주변에서는 벽을 향하는 유동이 발생하고 벽면 바로 위에서는 대칭면에서 밖으로 멀어지는 유동이 관찰된다( $-H/2 < z < H/2$ ). 한편, 와도 분포를 살펴보면 보텍스와 벽면의 상호작용으로 인해 벽면 바로 위에 보텍스 쌍의 부호와 각각 반대가 되는 와도 성분이 나타난다( $-H/2 < z < H/2$ ).

Fig. 6은 주유동 방향 보텍스가 발견된  $L/H=0.5$ 에 대해

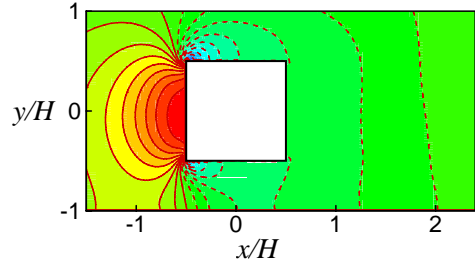


Fig. 7 Pressure distribution near the cube at  $L/H=0.5$  for  $Re=100$

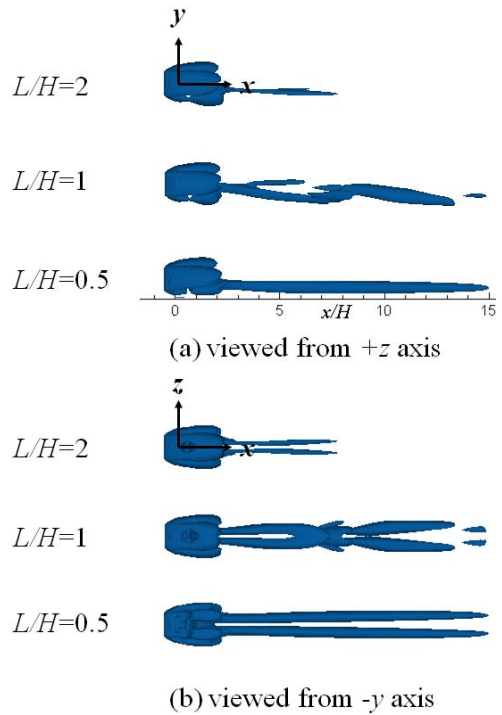


Fig. 8 Variation of vortical structures behind the cube depending on the distance from the wall at  $Re=250$

항력 및 양력 계수를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 정상 유동이므로 항력 및 양력 계수가 시간에 대해 일정하며, 항력은 벽이 없는 경우( $C_d=1.300$ )에 비해 약 8% 증가하였다. 양력 계수는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 유동장이  $(x,y)$ -평면에 대칭인 면대칭 유동이므로  $C_z$ 는 영이 된다. 반면, 양력 계수  $C_y$ 는 양수가 되며, 이는 정육면체가 벽에서 멀어지는 방향으로 힘을 받음을 의미한다. 구 또는 정육면체에 작용하는 양력의 방향은 일반적으로 보텍스의 형성 위치와 관련이 있는데, 보텍스가  $y < 0$  영역에 위치(Fig. 5)하므로 양력의 방향은 부호가 반대인  $+y$  방향이 된다. 정육면체가 벽으로부터 척력

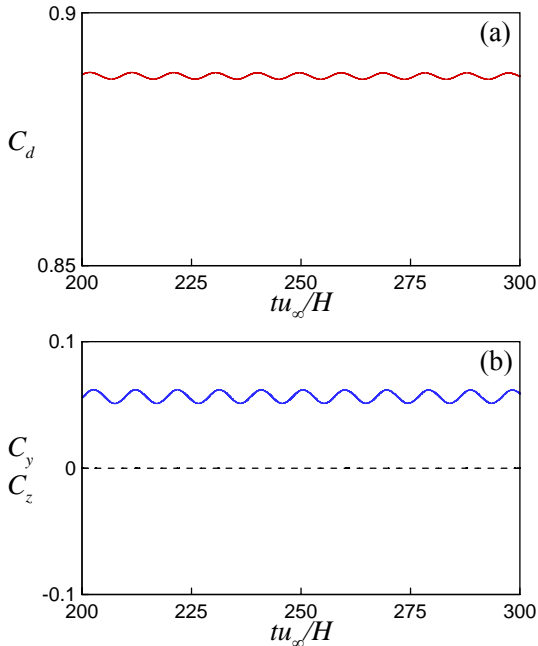


Fig. 9 Temporal variation of drag and lift coefficients at  $L/H=1$  for  $Re=250$  : (a) drag; (b) lift (—,  $C_y$ ; - - - - ,  $C_z$ )

(repulsive force)을 받는 이유를 정육면체 주위의 압력 분포로 설명할 수도 있다.  $(x,y)$ -평면에서의 압력 분포인 Fig. 7을 자세히 살펴보면, 정육면체 아랫면의 압력이 윗면의 압력보다 큰 것을 알 수 있다. 정량적인 예를 들면, 아랫면 중심의 압력계수는  $-0.37$ 인데 비해 윗면 중심의 압력계수는  $-0.43$ 로 압력이 상대적으로 낮다. 따라서, 압력 차이에 의한 양력 및 전체 양력은 정육면체의 위쪽을 향하게 된다.

### 3.2.2 $Re=250$ 에서의 유동

Fig. 8은  $Re=250$ 에서  $L/H$ 에 따른 보텍스 구조의 변화를 나타낸 것이다. 벽면에서 상대적으로 멀리 떨어진  $L/H=2$ 의 경우, 벽면의 효과가 매우 작아 벽이 없는 경우(Fig. 3의  $Re=250$ )와 비교할 때 보텍스의 구조나 강도의 차이가 거의 없다. 하지만,  $L/H$ 가 1 이하일 때 벽면 효과가 나타나기 시작하는데,  $L/H=1$ 의 경우 주유동 방향 보텍스가 주기적으로 쉐딩되어 비정상 유동이 된다. 그러나, 벽이 더욱 가까워져  $L/H=0.5$ 가 되면 흥미롭게도 유동장이 다시 정상상태가 된다. 이 경우 주유동 방향 보텍스는 주기적으로 쉐딩되지 않고, 계산 영역 끝까지 길게 늘어지며 벽면 위에 안정적으로 위치한다. 이 결과는 벽이 물체에 아주 가까워지면 물체 주위 유동장의 불안정성을 억제하는 효과가 있다는 것을 암시한다. 한편, 유동의 대칭성은 Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이  $L/H$ 에 상관없이 항상  $(x,y)$ -평면에 대칭이다.

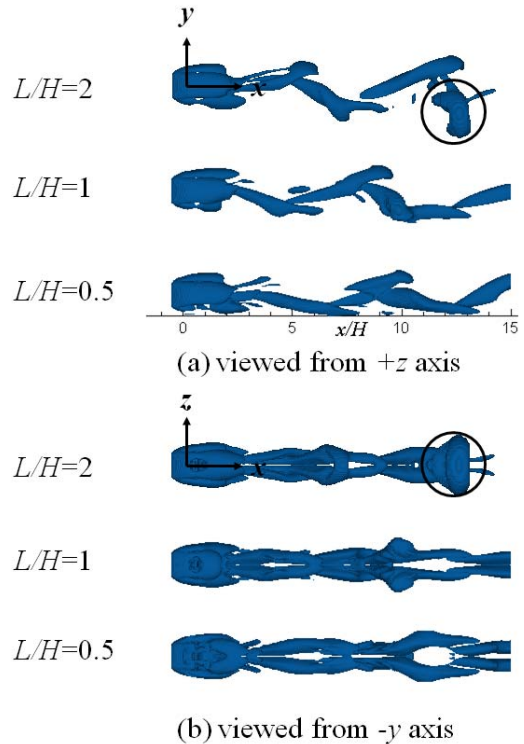


Fig. 10 Variation of instantaneous vortical structures behind the cube depending on the distance from the wall at  $Re=300$

비정상 면대칭 유동이 되는  $L/H=1$ 의 경우에 대해 항력 및 양력 계수의 시간에 따른 변화를 살펴보았다(Fig. 9). 항력 및 양력 계수가 주기적인 변화를 보이는데, 이는 주유동 방향 보텍스가 정육면체에서 주기적으로 발생하여 하류로 이동하기 때문이다. 항력 계수  $C_d$  및 양력 계수  $C_y$ 의 주파수  $f$ 는 무차원수( $St = fH/u_\infty$ )로 약  $0.105$ 이며, 보텍스 쉐딩의 주파수에 해당한다. 한편, 양력 계수  $C_z$ 는 항상 영이며 유동장이  $(x,y)$ -평면에 대칭임을 재확인할 수 있다.

### 3.2.3 $Re=300$ 에서의 유동

Fig. 10은  $Re=300$ 에서  $L/H$ 에 따른 순간 유동장의 보텍스 구조 변화를 나타낸 것이다. 연구를 수행한 모든  $L/H$ 에 대해 유동은 비정상 면대칭이며, 대칭면은  $Re=300$ 에서도 역시  $(x,y)$ -평면이 된다.  $L/H=2$ 의 경우, 벽이 없는 경우(Fig. 3의  $Re=300$ )와 마찬가지로 보텍스가 주기적으로 발생하지만, 보텍스의 강도가 매 주기 일정하지는 않다. 즉, 그림에서 원으로 표시한 루프(loop) 형태의 구조가 어떤 쉐딩 주기에는 강도가 약해지거나 사라지기도 하며, 그 결과 양력 계수가 다소 복잡한 특성을 갖는다(Fig. 11 참조). 한편,  $L/H=1$  및

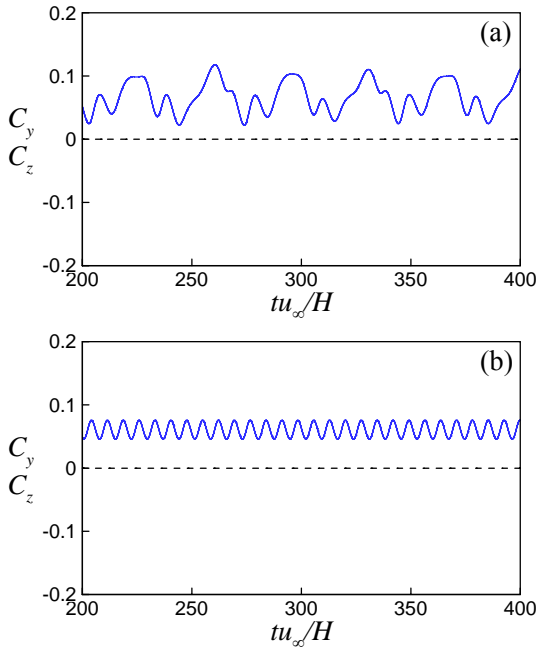


Fig. 11 Temporal variation of lift coefficients at Re=300 (—,  $C_y$ ; - - -,  $C_z$ ): (a)  $L/H=2$ ; (b)  $L/H=0.5$

0.5의 경우에는  $L/H=2$ 와 달리 주유동 방향 보텍스를 서로 잇는 루프 형태의 구조가 명확히 발견되지 않으며, 보텍스의 강도가 매 주기마다 일정하였다.

3차원 보텍스 구조와 양력 계수의 상관관계를 알아보기 위해 Fig. 11과 같이  $L/H=2$  및 0.5 두 경우에 대해 양력 계수를 시간의 함수로 나타내었다. 벽면 효과가 거의 없는  $L/H=2$ 이 경우, 웨딩되는 보텍스의 강도가 주기마다 일정하지 않기 때문에 양력 계수  $C_y$ 가 다수의 주파수 성분을 가지고 있음을 알 수 있다. 주파수 분석을 해 보면 두 개의 주요 성분이 발견되는데, 하나는 보텍스 웨딩 주기와 관련이 있고, 또 다른 저주파 성분은 보텍스 강도의 시간 변화 주기와 관련이 있다. 한편, 벽이 매우 가까운  $L/H=0.5$ 의 경우에는 웨딩되는 보텍스 강도가 주기마다 일정하므로 하나의 주파수 성분만을 가지고 있다. 두 경우에 대해 양력 계수  $C_y$ 의 섭동량을 비교해 보면, 벽이 가까운  $L/H=0.5$  경우에 섭동량이 더 작은 것을 알 수 있다. 이는 양력 계수에 영향을 주는 루프 보텍스의 강도가  $L/H=2$ 에서는 시간에 따라 계속 변하지만,  $L/H=0.5$ 에서는 벽면 효과로 루프 보텍스가 억제되어 사라졌기 때문이다.

### 3.2.4 평균 항력 및 양력 계수

Fig. 12는 항력 계수와 양력 계수( $C_y$ )를  $L/H$ 의 함수로 나

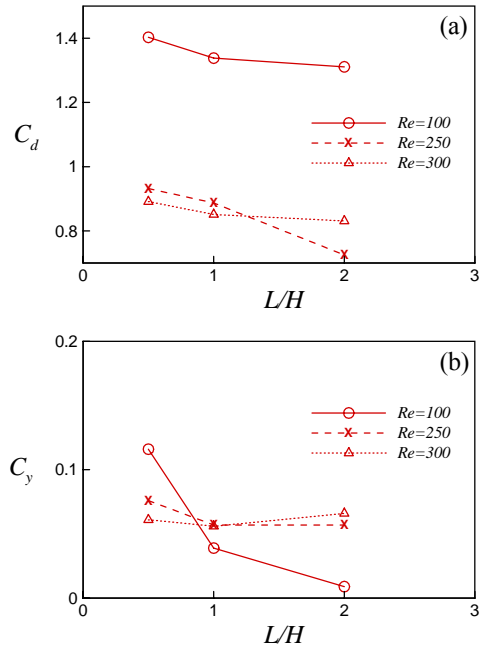


Fig. 12 Time-averaged drag and lift coefficients as a function of  $L/H$ : (a) drag; (b) lift

타낸 것으로, 비정상 유동의 경우에는 시간 평균한 값을 사용하였다. 연구를 수행한 모든 레이놀즈수에서 정육면체와 벽 사이의 거리가 감소함에 따라 항력 계수는 단조 증가하였다. 반면, 양력 계수는 벽과의 거리가 감소함에 따라 일반적으로 증가하는 경향을 보이지만, Re=300에서는  $L/H$ 가 2에서 1로 감소함에 따라 양력 계수가 다소 감소한다. Re=100과 250에서 정육면체가 벽에 가까워짐에 따라 양력이 증가하는 것은 벽에 가까울수록 주유동 방향 보텍스가 강화되었기 때문이다. 반면, Re=300에서 양력에 대한 벽면 효과가 반대의 경향을 보이는 것은 머리핀 보텍스의 머리에 해당하는 루프 보텍스의 생성이 벽면 효과로 억제되었기 때문으로 판단된다.

## 4. 결론

정육면체 주위에 벽이 존재할 때, 정육면체와 벽 사이의 거리가 정육면체 주위의 유동에 미치는 영향에 대해 수치해석 연구를 수행하였다. 연구 대상으로 선택한 레이놀즈수는 100, 250, 300이며, 정육면체와 벽의 거리는 정육면체 길이의 0.5배에서 2배까지를 연구대상으로 하였다. 본 연구를 통해 다양한 레이놀즈수와 벽의 거리에 대해 3차원 보텍스 구조를 규명하고, 보텍스 구조와 정육면체에 작용하는 양력의 관계를 밝힐 수 있었다.

해석 결과 정육면체 후류의 보텍스 구조와 항력 및 양력 계수의 특성이 레이놀즈수와 벽의 거리에 따라 크게 변함을 알 수 있었다.  $Re=100$ 과  $250$ 에서는 정육면체가 벽에 가까워질수록 한 쌍의 주유동 방향 보텍스가 더욱 강화되고 양력 계수도 증가하였다. 하지만,  $Re=300$ 에서는 정육면체가 벽에 가까이 존재하면, 루프 형태의 보텍스가 억제되고 양력계수가 다소 감소하는 경향을 보였다. 한편, 항력 계수의 경우에는 연구를 수행한 모든 레이놀즈수에서 벽의 거리가 가까울수록 항력 계수가 증가하였다. 한편, 유동장의 대칭성의 관점에서 벽이 없는 경우와 주변에 존재하는 경우에 차이점이 발견되었다. 주변에 벽이 없는 경우, 면대칭 유동의 대칭면은 고정되지 않고 수치해석 방법에 따라 달라질 수 있지만, 벽이 존재하는 경우에는 항상  $(x,y)$ -평면, 즉 주유동 방향을 포함한 벽에 수직인 평면으로 고정되었다. 이러한 특성은 벽 근처에서 움직이는 구 주위의 유동에서도 관찰되었다[17]. 이상의 연구 결과를 바탕으로 향후에는 높은 레이놀즈수의 난류 유동에 대한 연구를 수행할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의해 연구된 논문이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 1990, Strykowski, P.J. and Sreenivasan, K.R., "On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds numbers," *J. Fluid Mech.*, Vol.218, pp.71-107.
- [2] 1996, Williamson, C.H.K., "Vortex dynamics in the cylinder wake," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.28, pp.477-539.
- [3] 1996, Kwon, K. and Choi, H., "Control of laminar vortex shedding behind a circular cylinder using splitter plates," *Phys. Fluids*, Vol.8, pp.479-486.
- [4] 1990, Sakamoto, H. and Haniu, H., "A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow," *J. Fluids Eng.*, Vol.112, pp.386-392.
- [5] 1999, Johnson, T.A. and Patel, V.C., "Flow past a sphere up to a Reynolds number of 300," *J. Fluid Mech.*, Vol.378, pp.19-70.
- [6] 1999, Mittal, R., "Planar symmetry in the unsteady wake of a sphere," *AIAA J.*, Vol.37, No.3, pp.388-390.
- [7] 2002, Kim, D. and Choi, H., "Laminar flow past a sphere rotating in the streamwise direction," *J. Fluid Mech.*, Vol.461, pp.365-386.
- [8] 2006, Yun, G., Kim, D. and Choi, H., "Vortical structures behind a sphere at subcritical Reynolds numbers," *Phys. Fluids*, Vol.18, pp.015102-1-14.
- [9] 2008, 김동주, "구 주위의 비정상 면대칭 및 비대칭 유동의 특성," *한국전산유체공학회지*, 제13권 제4호, pp.39-44.
- [10] 1990, Raul, R., Bernard, P.S. and Buckley, Jr., F.T., "An application of the vorticity-vector potential method to laminar cube flow," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol.10, pp.875-888.
- [11] 1991, Raul, R. and Bernard, P.S., "A numerical investigation of the turbulent flow field generated by a stationary cube," *J. Fluids Eng.*, Vol.13, pp.216-222.
- [12] 2004, Saha, A.K., "Three-dimensional numerical simulation of the transition of flow past a cube," *Phys. Fluids*, Vol.16, pp.1630-1646.
- [13] 2008, 김동주, "직육면체를 지나는 층류 유동," *한국전산유체공학회지*, 제13권 제1호, pp.57-62.
- [14] 1978, Bearman, P.W. and Zdravkovich, M.M., "Flow around a circular cylinder near a plane boundary," *J. Fluid Mech.*, Vol.89, pp.33-47.
- [15] 1998, Kim, M.S. and Geropp, D., "Experimental investigation of the ground effect on the flow around some two-dimensional bluff bodies with moving-belt technique," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.74-76, pp.511-519.
- [16] 2008, Nishino, T., Roberts, G.T. and Zhang, X., "Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect," *J. Fluids Struct.*, Vol.24, pp.18-33.
- [17] 2005, Zeng, L., Balachandar, S. and Fischer, P., "Wall-induced forces on a rigid sphere at finite Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, Vol.536, pp.1-25.
- [18] 2001, Kim, J., Kim, D. and Choi, H., "An immersed boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries," *J. Comput. Phys.*, Vol.171, pp.132-150.
- [19] 1995, Jeong, J. and Hussain, F., "On the identification of a vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol.285, pp.69-94.