

장애물 주위의 와구조 형성과정에 관한 수치적 연구

황 종 연* · 양 경 수†

(2004년 1월 15일 접수, 2004년 4월 12일 심사완료)

Numerical Study on the Vortex Evolution from a Sharp-Edged, Wall-Mounted Obstacle

Jong-Yeon Hwang and Kyung-Soo Yang

Key Words: Vortical Structure(와류 구조), Quasi-Periodic(준 주기적인), Hairpin Vortex(헤어핀 와류), Lateral Vortex(측면 와류), Lambda Vortex(Λ 와류)

Abstract

Direct numerical simulation was carried out to study the vortical structures of the flow around a wall-mounted cube in a channel at $Re=1,000$ and $Re=3,500$ based on cubic height and bulk mean velocity. The cubic obstacle is situated in the entrance region of the channel flow where the boundary layers are developing. Upstream of the obstacle, steady and unsteady laminar horseshoe vortex systems are observed at $Re=1,000$ and $Re=3,500$, respectively; the near-wake flow is turbulent in both cases. The flow separates at each leading sharp edge of the cube, and subsequent vortex roll-up is noticed in the corresponding free-shear layer. The vortex shedding from the upper leading edge (upper vortices) and that from the two lateral leading edges (lateral vortices) are both quasi-periodic and their frequencies are computed. The upper and lateral vortices further develop into hairpin and Λ vortices, respectively. A series of instantaneous contours of the second invariant of velocity gradient tensor helps us identify spatial and temporal behaviors of the vortices in detail. The results indicate that the length and time scales of the vortical structures at $Re=3,500$ are much shorter than those at $Re=1,000$. Correlations between the upper and lateral vortices are also reported.

1. 서 론

3차원 장애물을 지나는 난류유동의 경우 난류 경계층 박리에 의해 생성되는 자유 전단층 및 벽 전단층에 의하여 큰 규모의 와류 구조(coherent structure)들이 다양하게 발견된다. 특히 난류로 천이되는 과정에서 발견되는 여러 가지 와류들의

거동이나 구조에 대한 정보는 주어진 유동장이 어느 정도로 난류의 성질을 가지고 있는가를 판단할 수 있는 단서가 될 수 있다. 따라서 난류 메커니즘에 대한 심도 있는 이해를 위해서는 이러한 와류의 공간적 및 시간적인 구조와 거동에 대한 정확한 이해와 풍부한 자료들이 요구되어진다. 평판을 지나는 비교적 간단한 난류유동의 경우조차도 유동 조건에 따라 헤어핀 와류, 또는 람다 와류(Λ -vortex) 등이 발견된다.⁽¹⁾ 특히 한쪽 벽에 부착되어있는 3차원 장애물을 지나는 복잡한 유동장의 경우 장애물 주위에 말굽 와류, 헤어핀 와류, 측면 와류(lateral vortex), 소용돌이 와류(spiral vortex) 등 여러 종류의 와류들이 발견되므로 이러한 와류들에 대한 연구는 그동안 많은 연구자들에게 흥미로운 주제가 되어 왔다.

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

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

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학부

Haidarj and Smith⁽²⁾는 평판 난류 경계층 유동에 서 발견되는 헤어핀 와류의 생성과 그 형태를 기술하고자 실험적 연구를 수행하였다. Yoon and Kim⁽³⁾은 PIV를 이용하여 다양한 압력구배 조건에서의 평판 난류 경계층의 구조에 대하여 자세히 기술하였다. Elavarasan and Meng⁽⁴⁾은 실험을 통하여 탭을 지나는 난류 경계층 후류에서 발생하는 헤어핀 와류의 주파수를 찾아내었다.

최근 들어 급속히 발달한 컴퓨터 하드웨어의 성능과 수치적 알고리즘의 비약적인 발전에 힘입어 이러한 와류의 조직적인 구조를 규명하고자 수치모사를 이용한 연구도 시도되고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 특히 본 연구에서는 한쪽 면에 정육면체 장애물이 부착되어 있는 두 평판 사이의 유동에서 발생하는 와류들에 대하여 DNS를 이용한 전산 해석적 연구를 수행하였다(Fig. 1). 그동안 본 연구와 유사한 형상을 지나는 유동에 대하여 많은 수치 해석적 연구가 이루어졌다.⁽⁶⁻⁹⁾ Rodi⁽⁶⁾의 연구에서는 완전히 발달된 난류 유동장에 대한 대와동모사(LES)와 RANS 모델의 비교 및 검토가 이루어졌다. Shah⁽⁷⁾는 LES를 이용하여 정육면체 주위에서의 난류 통계량들을 분석하였고 Krajnovic and Davidson⁽⁸⁾은 정육면체 주위에서 생성되는 측면 와류의 생성 및 붕괴에 대한 LES를 수행하였으며 Hwang and Yang⁽⁹⁾은 DNS를 이용하여 정육면체의 윗면과 후류에 걸쳐 존재하는 헤어핀 와류의 준 주기적인 거동에 대하여 보고하였다. 이러한 연구들의 결과를 종합하여 보면 정육면체 옆면에서는 측면 와류가 존재하고 윗면과 후류에서는 헤어핀 와류가 존재함을 알 수가 있지만 이에 대한 시간적인 거동 및 레이놀즈 수(Re)에 따른 형태 및 구조의 변화에 대한 연구를 수행한 경우는 저자가 아는 한 전무하다.

본 연구의 유동형상과 같은 복잡한 형태의 난류유동에서는 여러 가지 다양한 와류들이 혼재하고 있으며 이러한 와류들의 시간 및 공간적인 규모 역시 매우 다양하다. 그리고 각진 모서리로부터의 와홀림(vortex shedding)과 같은 준 주기적인 난류유동의 규칙성을 찾기 위해서는 많은 경우의 Re 에 대한 해석이 요구되어진다. 또한 관심되는 와류의 형태 및 거동을 찾아내기 위해서 적당한 Re 의 선택 및 고 해상도의 수치적 모사를 통하여 시간 변화에 따른 3차원적인 와류 구조의 변화를 면밀히 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 고해

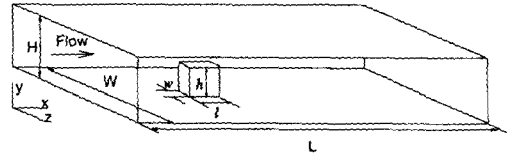


Fig. 1 Physical configuration

상도의 DNS를 수행하여 정육면체 주위에 형성되는 윗면 와류(upper vortex)와 측면 와류의 공간적인 분포 형태와 시간적인 거동 및 두 와류의 상호간의 연관성을 밝혀 내는데 주안점을 두었다. 또한 이들 와류가 헤어핀와류와 람다와류로 각각 발전되는 과정도 다루었다. 특히 와류들의 구조를 가시화 하기 위하여 Jeong and Hussain⁽¹⁰⁾의 논문에서 소개된 속도구배텐서의 두 번째 불변량(Q)를 이용하였다. 정육면체 한번의 길이(h)와 평판 내의 입구 평균 속도(U_b)로 정의한 Re 가 1,000과 3,500인 경우에 대하여 계산을 수행하여 와류 조직의 Re 의존성에 대해서도 검토하였다. 본 논문의 전반부에서는 $Re=1,000$ 인 경우에 대하여 헤어핀 와류와 측면 와류의 주기적인 거동에 대한 연구가 이루어졌고 후반부에서는 전반부와 유사한 방법으로 $Re=3,500$ 인 경우를 다루어 그에 대한 자세한 비교가 이루어졌다.

2. 연구방법

2.1 지배방정식 및 수치해석법

본 연구에서 사용된 비압축성 유체에 대한 연속방정식과 모멘텀 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \tag{1}$$

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

여기서 \mathbf{u} , ρ , ν , p 는 각각 유체의 속도벡터, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미하며 위의 지배방정식들은 공간적으로 2차의 정확도를 갖는 유한 체적법을 사용하여 차분 되었다. 시간에서의 적분은 비선형 항들은 3차 정확도의 Runge-Kutta기법으로 명시적으로, 다른 항들은 2차 정확도의

Crank-Nicolson 기법으로 묵시적으로 적분되었다. 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리(decouple)하기 위해서 Fractional Step 기법⁽¹¹⁾이 사용되었다. 사용된 수치해석 알고리즘은 Yang and Ferziger⁽¹²⁾ 및 Shah⁽⁷⁾의 논문에 자세히 설명되어있다.

2.2 경계조건 및 유동 파라미터

모든 고체면에서는 점착(no-slip) 조건이, 횡방향(z)으로는 주기조건이 적용되어 실제로는 장애물이 횡방향으로 주기적으로 배열된 경우에 해당된다. 주유동방향(x)의 입구에서는 균일한 속도 분포를 적용하여 장애물이 위치된 부근에서 형성되는 경계층의 두께가 장애물의 높이보다 비교적 작게 되도록 결정하였다. 따라서 $Re=1,000$ 인 경우에는 입구로부터 $3h$ 인 지점에, $Re=3,500$ 인 경우에는 $5h$ 인 지점에 각각 장애물을 위치시켰다. 이럴 경우 $Re=1,000$ 인 경우는 4-와류 형태인 정상 말굽 와류가 형성되고 $Re=3,500$ 인 경우는 6-와류 형태인 비정상 말굽 와류가 형성된다.⁽¹³⁾ 출구에서는 대류경계조건(convective boundary condition)이 적용되었다.⁽¹⁴⁾ 출구 경계조건에 의한 장애물 근처 유동장애의 영향을 최소화하기 위해서는 장애물 뒤의 계산영역을 길게 설정해야 한다. 즉 $Re=1,000$ 인 경우에는 $L/h=15$ 를, $Re=3,500$ 인 경우에는 $L/h=18$ 를 사용하였다. 장애물의 형상은 정육면체로서($l=h=w$) 한 번의 길이가 평판사이 간격의 반($h/H=0.5$)이 되도록 설정하였다. 횡방향의 계산영역은 두 경우 모두 $W/h=7$ 을 사용하였는데 횡방향 영역확장 연구 결과 장애물 상호간의 영향이 거의 없음이 밝혀졌다.⁽⁹⁾ 사용된 격자수는 격자 세분화 연구(grid-refinement study)를 통해 결정하였으며 $Re=1,000$ 인 경우는 주유동, 높이, 횡방향으로 각각 $192 \times 96 \times 144$ 의 격자 수를, $Re=3,500$ 인 경우는 $224 \times 96 \times 144$ 의 격자 수를 사용하였다. 더 자세한 계산 정보는 Hwang and Yang⁽⁹⁾의 논문을 참조하기 바란다.

3. 결과 및 토론

3.1 $Re=1,000$ 인 경우

Hwang and Yang⁽⁹⁾은 $Re=1,000$ 인 경우 장애물 위 자유전단층에서 생성된 윗면 와류가 장애물 후류에서 헤어핀 와류로 발전되며 무차원화된 주파수(St)가 약 0.8정도인 준 주기적인 거동을 한다고

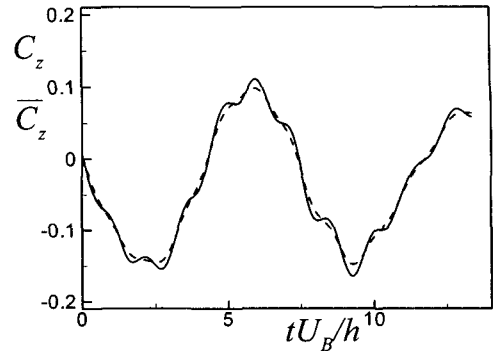


Fig. 2 Time histories of C_z (solid line) and its counter-part filtered by a Gaussian filter ($\overline{C_z}$, dashed line)

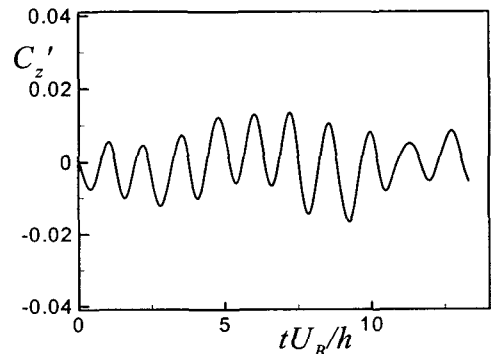


Fig. 3 Time history of C_z'

보고하였다. 또한 난류유동의 경우 장애물의 양 옆면에서는 측면 와류가 형성된다고 알려져 있다.⁽⁸⁾ 본 절에서는 $Re=1,000$ 인 경우 이러한 와류들의 시간 및 공간적인 거동과 상호간의 연관성에 대해서 살펴보았다. 측면 와류의 역학적 거동을 파악하기 위한 방법으로서 다음과 같은 무차원 계수를 정의하였다.

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho U_B^2 h^2} \quad (3)$$

여기서 F_z 는 장애물의 4개 측면들에 작용하는 횡방향으로의 합력을 의미한다. 따라서 C_z 는 2

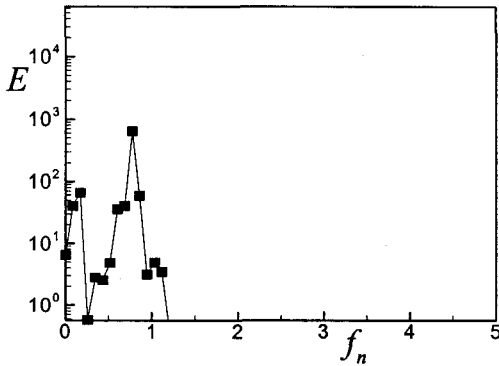


Fig. 4 Energy spectrum of C_z'

차원 실린더 주위를 지나는 유동과 비교할 때 마치 양력계수와 흡사하다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 U_B 와 h 로 무차원화된 시간에 따른 C_z 의 변화를 살펴보면 두 가지의 지배적인 모드, 즉 장파장의 저주파 모드와 단파장의 고주파 모드가 혼재되어 있음을 발견할 수 있다. 여기서 장파장의 모드의 St 는 약 0.13이다. 참고로 2차원 사각단면 실린더 주위를 지나는 난류 유동장에서는 $St=0.124 \sim 0.13$ 으로서 본 연구에서 발견된 장파장의 St 와 매우 유사함을 알 수 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 장애물 후류에서 형성될 수 있는 후류 와홀립과 Fig. 2의 장파장과는 밀접한 관련이 있다고 판단되지만 유동장에서 뚜렷한 후류 와홀립의 거동은 발견되지 않았다.

한편 고주파 모드는 장파장과 혼재되어 있기 때문에 그 거동 양상을 제대로 파악하기가 수월하지 않다. 따라서 본 연구에서는 고주파 모드를 보다 명확히 밝혀내기 위한 방법으로 다음과 같은 과정을 수행하였다. 즉, Gaussian filter를 이용하여 C_z 에 여과 과정을 수행하여 $\overline{C_z}$ 를 구한 후 C_z 에서 빼어준다. 그러면 $\overline{C_z}$ 는 장파장 모드만 포함하게 되고(Fig. 2의 점선) $C_z' (= C_z - \overline{C_z})$ 는 단파장 모드만 포함하게 된다(Fig. 3). 이 고주파 모드의 원인은 측면 와류에 의한 것으로 이의 지배적인 주파수를 구하기 위하여 시간에 따른 C_z' 를 푸리에 변환하여 Fig. 4에 제시하였다. 여기서 횡축 f_n 은 무차원화된 주

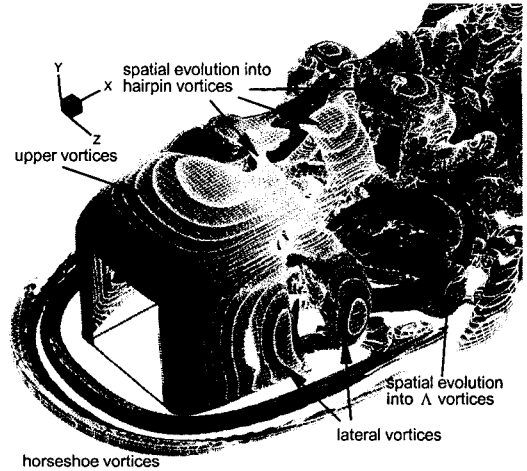


Fig. 5 Instantaneous contours of the second invariant of the velocity gradient tensor($Q=1.2$), $Re=1,000$

파수를 나타내고 이는 wave number를 2π 로 나눈 값에 해당한다. 종축인 E 는 푸리에 계수의 크기의 제곱을 의미한다. 가장 지배적인 모드의 f_n 의 값이 약 0.8로서 윗면 와류 및 헤어핀 와류의 와홀립 주파수와 동일하다. 이는 윗면 와류와 측면 와류가 서로 밀접히 연관되어 마치 한 구조를 이루며 거동할 수 있다는 단서를 제공한다.

윗면 와류와 측면 와류의 시간적 및 공간적 거동을 살펴보기 위해서는 이러한 와류들을 효과적으로 가시화 할 수 있는 물리량이 필요하다. 특히 윗면 와류와 측면 와류는 장애물 주위에서 생성되고 또한 장애물 근처에서는 모멘텀의 급격한 소실에 의한 벽 전단층과 장애물 선단부에서의 박리에 의한 자유 전단층이 존재하게 된다. 그 결과 비교적 큰 와도장이 장애물 주위에 형성되므로 각종 와류들의 구조를 명확히 가시화하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 속도구배텐서의 두 번째 불변량(Q)을 도입하여 와류의 가시화를 시도하였다.⁽¹⁰⁾ Fig. 5는 순간 유동장에서의 $Q=1.2$ 에 해당하는 값을 보여준다. 장애물 앞면과 바닥의 접합부근에서 정상상태인 말굽 와류가 발견되며 이는 4.와류구조에 해당한다.⁽¹³⁾ 장애물 선단부에서는 박리가 발생하며 정상상태를 유지한다. 좀더 하류부근에는 측면 와류와 윗면 와류가 뚜렷이 보이고 있으며 그 형태가 마치 한 구조를 이루고 있는 것처럼 보인다. 특히 장애물

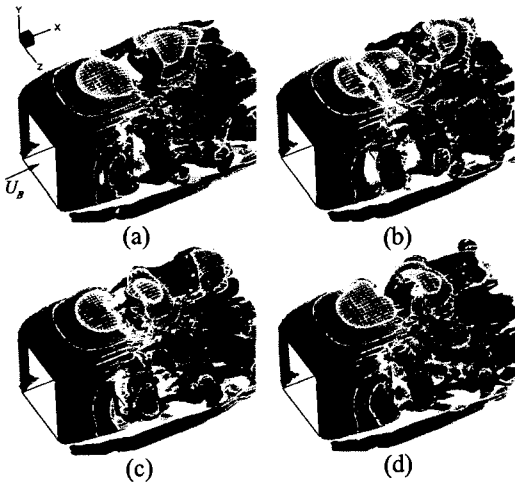


Fig. 6 Instantaneous contours of the second invariant of the velocity gradient tensor ($Q=1.2$) at $Re=1,000$ during one quasi-period of generating hairpin and lateral vortices, (a) $t=0$, (b) $t=1/3T$, (c) $t=2/3T$, (d) $t=T$

모서리 부근에서 생성된 측면 와류는 주 유동 방향으로 공간적으로 발달하면서 장애물 뒤에서는 Λ 형태의 두 개의 와류로 갈라지며 복잡한 형태를 나타낸다. 윗면 와류 또한 장애물 뒤에서 후류로 진행함에 따라 헤어핀 와류로 발전하고 길이 스케일이 작아지며 점점 복잡해진다. 뿐만 아니라 하류로 이동하면서 헤어핀 와류와 Λ 와류 상호간의 연관성이 점차로 미약해지게 됨을 발견할 수 있다. 이러한 사항들은 공간적인 난류로의 천이과정에서 발견될 수 있는 전형적인 특성이다. 이에 대해서는 3.3절에서 자세히 다룬다.

이러한 와류들의 시간에 따른 거동을 살펴보기 위하여 시간에 따른 contour의 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 여기서 $Q=1.2$ 이고 T 는 헤어핀 와류와 측면 와류의 시간적 거동의 한 주기이며 이는 Fig. 3에서 제시된 모우드의 한 파장에 해당하는 시간이다. 즉 무차원 T 의 값은 St 의 역수로서 약 1.25이며 이러한 시간적 거동은 준 주기적 형태로 비교적 규칙적으로 반복됨이 확인되었다. Fig. 6의 각 그림들을 보면 장애물의 선단부를 지나면서 윗면 와류와 측면 와류가 동시에 생성됨이 관찰된다. 또한 이러한 와류들이 생성되는 선단부분은 유동형태가 정상상태이며 생성된 두

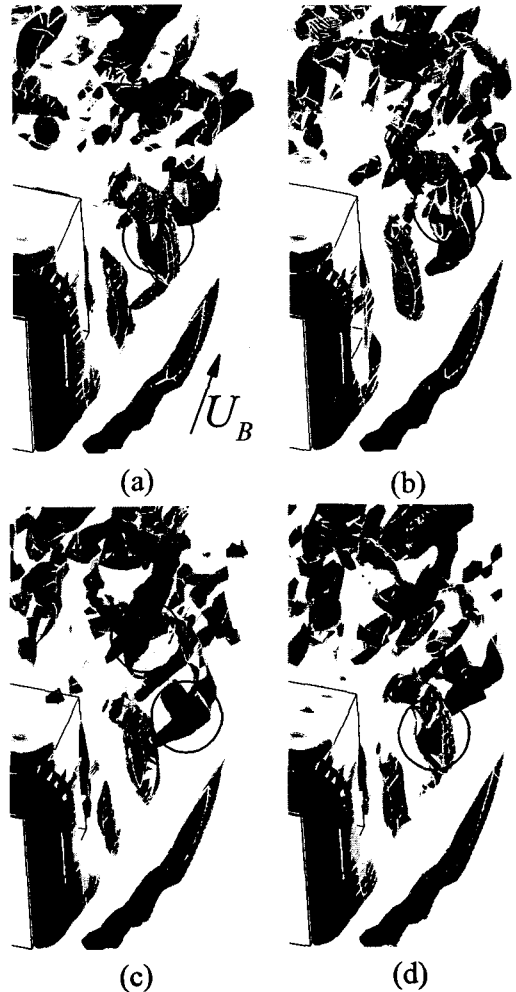


Fig. 7 Instantaneous contours of the second invariant of the velocity gradient tensor ($Q=7.5$) at $Re=1,000$ during one quasi-period of generating lateral vortices, (a) $t=0$, (b) $t=1/3T$, (c) $t=2/3T$, (d) $t=T$

와류가 마치 한 구조처럼 시간에 따라 주 유동 방향으로 이동하고 있음을 볼 수 있다. $Re=40,000$ 인 경우에 대해서 실험을 수행한 Martinuzzi and Tropea⁽¹⁶⁾의 논문에 수록되어있는 이러한 와류들의 개략도를 참조하면 윗면 와류와 측면 와류가 독립적인 형태로 표시가 되어 있으며 $Re=40,000$ 인 경우에 대하여 LES를 수행한 Kranjnovic and Davidson⁽⁹⁾의 논문에 제시된 순간 유동장을 보면 이러한 와류들이 역시 독립적인 거동을 보인다. 즉 이러한 두 와류들의 연관성은 본 연구에서와

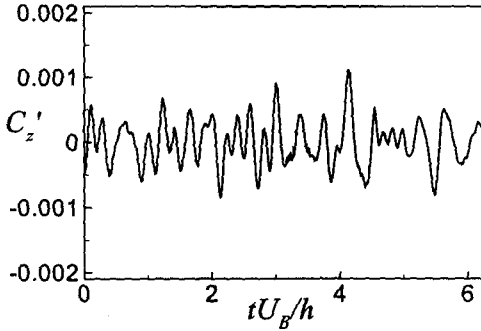


Fig. 8 Time history of C_z' at $Re=3,500$

같은 비교적 저 레이놀즈수의 난류유동에서만 관찰됨을 알 수 있다.

측면 와류의 거동을 자세히 관찰하고자 $Q=7.5$ 에 해당하는 값을 나타낸 것이 Fig. 7이다. 여기서 각 그림들의 시간은 Fig. 6에 해당하는 시간과 일치한다. $Re=1,000$ 인 경우 헤어핀 와류의 Q 의 값이 측면 와류의 Q 의 값보다 상대적으로 작다. 따라서 $Q=1.2$ 의 값을 나타내는 그림에서는(Fig. 5, Fig. 6) 헤어핀 와류와 측면 와류를 동시에 관찰하기는 용이하지만 측면 와류를 세부적으로 뚜렷이 관찰하기는 어렵다는 단점이 있다. Fig. 7(a)에 표시된 측면 와류는 시간이 경과함에 따라 주 유동방향으로 이동하는 양상이 뚜렷이 관찰된다(Fig. 7(b)). 이때 측면 와류의 공간적인 평균 이동속도는 U_g 의 약 반정도로 이는 헤어핀 와류의 머리 중심의 이동속도와 일치한다.⁽⁹⁾ 이는 헤어핀 와류와 측면 와류가 마치 한 구조처럼 거동한다는 사실을 뒷받침해준다. 시간이 더욱 경과하면 Fig. 7(c)에서처럼 측면 와류가 공간적으로 Λ 형태의 두 개의 와류로 분리되는 일종의 분기(bifurcation)가 발생하며 종국에는 그 형태가 일정하지 않은 복잡한 난류의 성질을 갖게 된다.

3.2 $Re=3,500$ 인 경우

$Re=3,500$ 인 경우에도 윗면 와류의 생성과 헤어핀 와류로의 발전은 준 주기적인 거동을 한다고 알려져 있으며 대략 $St=1.6$ 정도로서 $Re=1,000$ 인 경우의 약 두 배 정도에 해당한다.⁽⁹⁾ 또한 장애물 앞에 형성되는 말굽 와류 역시 준 주기적 거동을 보이며 그에 해당하는 St 는 0.25 이다.⁽¹³⁾ 본 절에서는 $Re=3,500$ 인 경우에 대하여 $Re=1,000$ 의

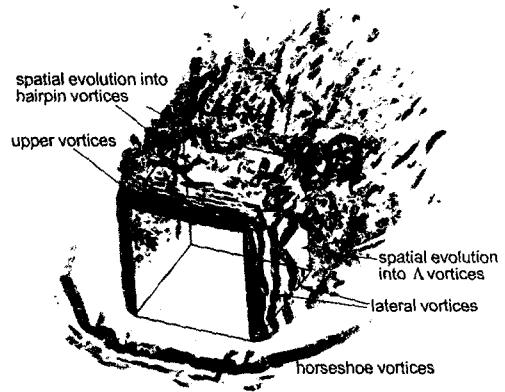


Fig. 9 Instantaneous contours of the second invariant of the velocity gradient tensor($Q=45$), $Re=3,500$

경우에서 수행한 방법과 유사하게 헤어핀 와류와 측면 와류의 거동을 고찰하였다. 헤어핀 와류의 준 주기적 거동을 자세히 살펴보기 위하여 선행 연구⁽⁹⁾보다 더욱 오랜 시간동안에 계산을 수행한 결과 $St=1.6 \pm 0.1$ 로 관찰되었다. 또한 시간에 따른 C_z 의 변화를 살펴본 결과 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 후류 와홀림에 해당하는 저주파 모우드는 발견되지 않았지만 측면 와류의 거동에 해당하는 고주파 모우드는 관찰 되었다. Fig. 8은 무차원 시간에 따른 C_z' 를 보여준다. 이는 대략적으로 헤어핀 와류의 10주기에 해당하는 시간이다. $Re=3,500$ 인 경우에는 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 주파수가 일정하지 않고 다소 복잡한 양상을 보이고 있다. 그러나 $Re=3,500$ 인 경우에도 역시 준 주기적인 거동이 발견되었으며 $St=2.0-7.2$ (평균 3.7) 정도로서 St 의 평균값을 기준으로 볼 때 헤어핀 와류의 St 의 약 2배 정도에 해당한다. 또한 각각의 모우드의 주파수가 일정하지 않고 많은 차이를 보인다. 뿐만 아니라 측면 와류와 헤어핀 와류가 한 구조를 이루기 보다 거의 독립적으로 거동하는 양상이 발견되었다. 만일 더욱 높은 Re 의 경우에는 이러한 준 주기적 거동 양상이 나타나지 않게 됨을 쉽게 유추할 수 있으며 실제로 $Re=40,000$ 인 경우 주기적 양상은 발견되지 않는다.⁽⁸⁾

Fig. 9는 장애물 주위에서 한 순간에서의 $Q=45$ 에 해당하는 contour를 보여준다. $Re=3,500$ 인 경우

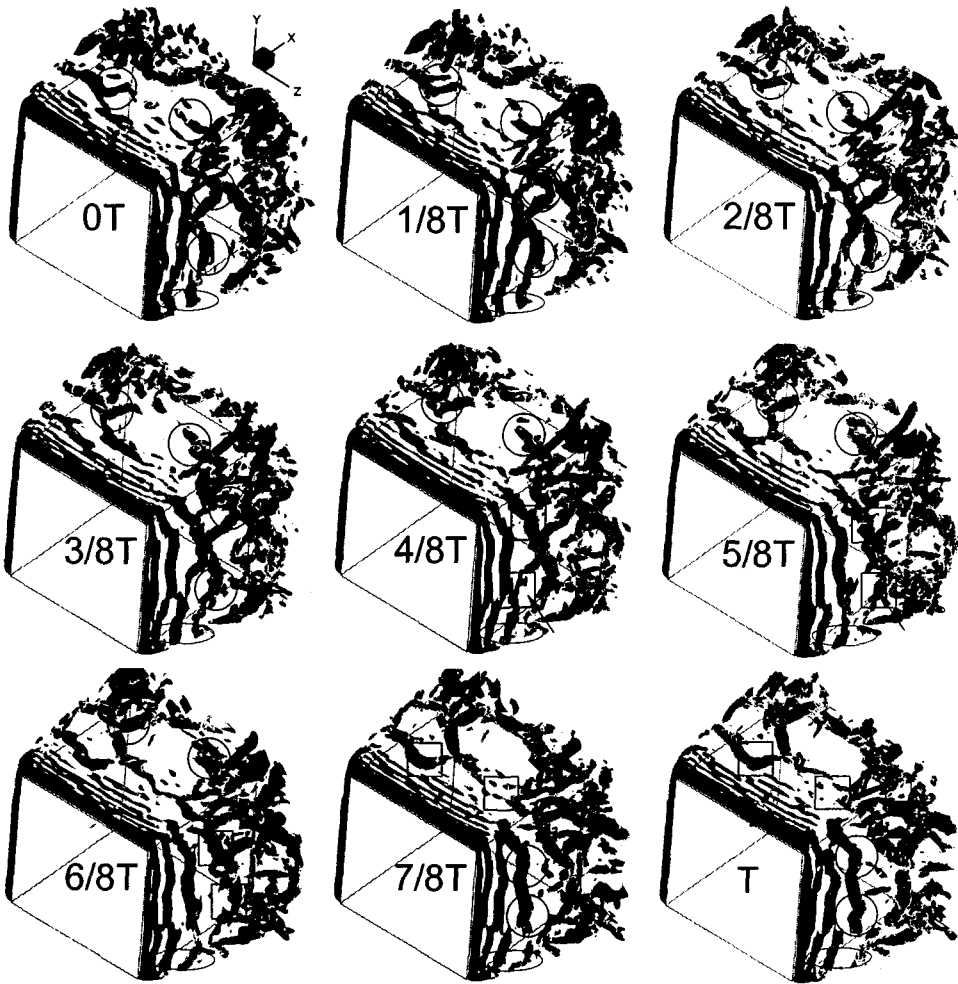


Fig. 10 Instantaneous contours of the second invariant of the velocity gradient tensor($Q=45$) at $Re=3,500$ during one quasi-period of generating hairpin vortices

장애물 앞에서 비정상 준 주기적 거동을 하는 말굽 와류가 존재한다고 알려져 있으며 6-와류 구조를 형성한다.⁽¹³⁾ Fig. 9의 말굽 와류를 보면 가장 상류에 있는 와류가 나타나지 않고 있으므로 마치 4-와류 구조처럼 보이지만 이는 $Q=45$ 인 경우의 값으로 표현 할 경우 가장 상류의 말굽 와류에 해당하는 Q 가 상대적으로 작기 때문에 보이지 않는 것이다. 그림에서 보듯이 측면 와류와 헤어핀 와류가 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 그 길이 규모가 더욱 작아졌으며 공간적으로 다소 복잡한 형태로 분포한다. 헤어핀 와류의 경우 양

측면으로 두 개로 나뉘어 있으며 매우 불규칙한 곡선의 형태이다. 또한 형성되는 위치도 장애물 후류 윗부분이 아니라 장애물의 바로 윗 부분에 분포하게 된다. 이는 윗면와류가 급속히 헤어핀 와류로 발전되기 때문이다. 측면 와류를 살펴보면 헤어핀 와류와는 달리 양 측면에 주 유동방향으로 여러 개가 공간적으로 분포하고 있으므로 주 유동방향으로의 헤어핀 와류의 파장보다 측면 와류의 파장이 더 짧게 된다. 또한 본 연구에서 관찰한 결과 헤어핀 와류와 측면 와류의 하류로의 이동 속도가 매우 비슷하다. 이는 헤어핀 와

류의 거동 주파수보다 측면 와류의 거동 주파수가 훨씬 큼을 보여주는 중요한 단서가 된다. 또한 측면 와류의 형태도 선단부에서는 직선 형태이나 하류로 이동할수록 Λ 형태를 보이며 한 쌍으로 분리되고 있다. 이러한 현상은 $Re=1,000$ 인 경우에도 발견 되었으나 그 위치가 장애물 선단으로부터 약 $1/2h$ 정도로 이는 $Re=1,000$ 인 경우보다 훨씬 상류부근에 해당한다. 특히 장애물 선단으로부터 약 $3/4h$ 지점을 지나면 그 형태를 알 수 없을 정도로 복잡하고 작은 규모의 와구조를 보인다. 즉 Re 가 높아짐에 따라 공간적으로 난류로의 천이가 더욱 상류에서 일어남을 보여준다. 헤어핀 와류와 측면 와류의 시간에 따른 거동을 고찰하고자 헤어핀 와류의 한 주기(T)동안에 $Q=45$ 에 대한 contour를 Fig. 10에 나타내었다. $TU_b/h=0.625$, $St=1.6$ 이고 이 시간동안에 측면 와류의 준 주기적 거동은 약 두 번 관찰되며 대략 $St=3.2$ 에 해당한다. 우선 헤어핀 와류를 살펴보면 $t=0$ 인 시각에 보이는 헤어핀 와류(\circ 로 표시)는 시간이 경과함에 따라 하류로 이동하게 된다. 그 형태는 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 불규칙 적이며 두 부분으로 나뉘어져 있고 시간에 따라 그 형태가 크게 변하지 않는다. 하지만 $6/8T$ 시각에서의 그림을 보면 헤어핀 와류의 길이규모가 작아지고 더 복잡하게 되며 하류의 다른 와류들과 혼합된다. 그리고 $7/8T$ 와 T 시간을 지나면서 헤어핀 와류의 한 주기가 완료된다(\square 로 표시) 측면 와류의 경우 두 개의 Λ 와류로 발전하여 하류로 이동하며 $4/8T$ 에서 한주기를 마치고 있다. 한 가지 흥미 있는 점은 측면와류의 바닥부분(타원으로 표시)은 시간에 따라 하류로 거의 이동하지 않고 있음을 확인할 수 있다. 특히 $4/8T$ 와 $5/8T$ 의 그림에서 타원으로 표시한 바와 같이 측면 와류의 바닥 쪽에 해당하는 부분은 $4/8T$ 와 $5/8T$ 사이에서 여전히 정지하고 있는 반면에 윗부분(화살표로 표시)은 하류로 이동하고 있다. 따라서 와류의 아랫부분과 윗부분이 서로 분리 되며 이런 현상은 $7/8T$ 와 T 사이에서도 발견되고 있다. 이는 $Re=1,000$ 인 경우에는 발견되지 않는 현상으로서 고 레이놀즈 수의 경우에는 측면와류의 하류로의 이동 속도가 공간적으로도 다르다는 사실로서 설명될 수 있다. 고레이놀즈 수에서 측면와류의 형태가 Λ 형태로 발전된다는 점도 측면와류의 공간적인 이동 속도가 다르기 때문에 발생하는 현상이

라고 유추할 수 있다. 특히 이 부분의 와류의 거동은 상당히 불규칙적이며 상대적으로 매우 느리게 이동할 뿐만 아니라 간헐적으로 소멸하는 양상도 발견되므로 만일 어떠한 주기적인 거동이 존재한다면 더욱 과도한 계산시간이 소요될 것으로 사료된다.

3.3 공간상의 천이과정

앞에서 간략히 언급했듯이 장애물을 지나면서 생성되는 측면 와류는 하류로 이동함에 따라 와류의 구조가 점점 복잡해지면서 중국에는 난류가 된다. 본 절에서는 측면 와류가 주 유동방향으로

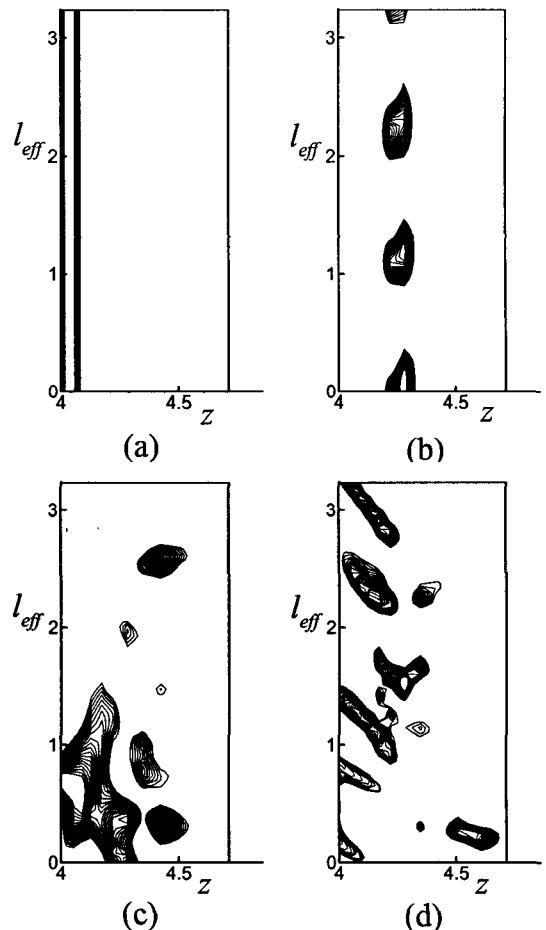


Fig. 11 Contours of the second invariant of the velocity gradient tensor $l_{eff}z$ plane at $y=0.5h$ at $Re=1,000$, (a) $x^*=0.01$, (b) $x^*=0.5$, (c) $x^*=1.93$, (d) $x^*=2.6$

공간적으로 발달하면서 난류로 천이 되는 과정에 대하여 고찰하였다. 이를 위해서는 장애물 선단으로부터 주 유동 방향으로의 여러 지점에서 시간에 따른 와류의 변화를 관찰할 필요가 있다. 따라서 다음과 같은 무차원 변수를 도입하였다.

$$l_{eff} = tU_B/h \quad (4)$$

$$x^* = (x - x_{obs})h \quad (5)$$

즉 l_{eff} 는 유효길이로서 시간에 평균속도(U_B)를 곱하여 공간적으로 표시한 것이다. 이는 난류유동에서 Taylor의 가설과 유사한 개념이라고 볼 수 있다. 그리고 x_{obs} 는 장애물 선단의 주 유동방향으로의 위치로서 x^* 는 장애물 선단으로부터 주 유동방향으로의 거리에 해당한다. Fig. 11은 $Re=1,000$ 인 경우에 $y=0.5h$ 상의 여러 지점의 x^* 에서 $z-l_{eff}$ 평면에서의 Q 값을 보여준다. 와류의 형태를 명확히 관찰하기 위해서 z 축의 길이에 대한 l_{eff} 축의 길이의 비를 0.5로 설정하였다. Fig. 11(a)는 $x^*=0.01$ 인 위치로서 장애물의 선단 부근에 해당한다. 이 지점은 측면 와류가 생성되는 영역으로 뚜렷한 측면 와류는 나타나지 않고 있다. 또한 l_{eff} 에 따른 Q 의 변화가 거의 없으므로 정상상태임을 확인할 수 있다. 한편 $x^*=0.5$ 지점에 해당하는 Fig. 11(b)를 보면 주기적으로 형성된 측면 와류가 뚜렷히 발견된다. 즉 $x^*=0.5$ 지점에서의 측면 와류는 비교적 규칙적인 준 주기적 거동을 하고 있음을 재확인 할 수 있으며 이 지점은 정상 층류유동에서 난류유동으로 천이 되는 지점이다. Fig. 11(c), (d)는 각각 $x^*=1.93, 2.6$ 지점으로서 장애물의 뒷부분에 해당한다. l_{eff} 에 따른 규칙성을 발견할 수 없고 다양한 길이 규모를 보이는 등 공간적으로 복잡한 난류 유동으로 천이 되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 $Re=3,500$ 의 경우에서 위에서 제시된 같은 방법으로 적용된 그림이며 이 경우에는 z 축의 길이에 대한 l_{eff} 축의 길이의 비를 0.25로 설정하였다. $x^*=0.008$ 에 해당하는 지점인 Fig. 12(a)를 보면 매우 규칙적인 와류의 형태를 볼 수 있다. 완전한 측면 와류의 형태를 보이지는 않지만 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 측면 와류가 생성되는 선단 부근에서 비정상 주기적 거동이 확인된다. Fig. 12(b)는 $x^*=0.21$ 지역으로 준 주기적인 형태

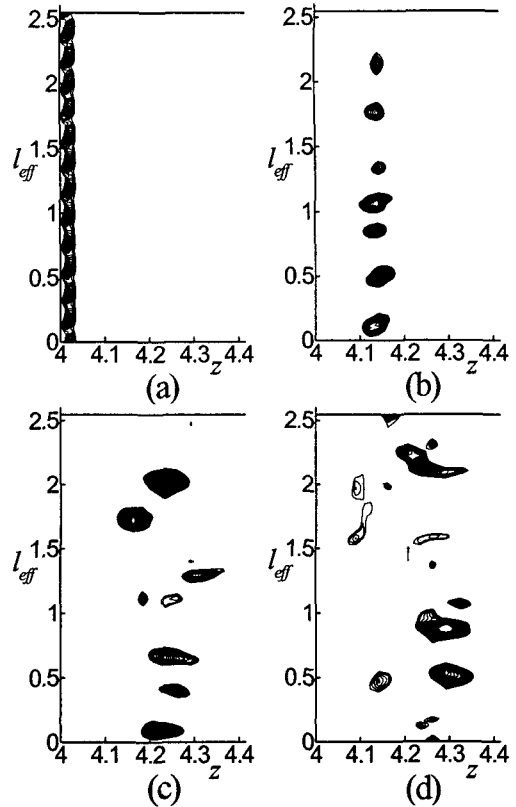


Fig. 12 Contours of the second invariant of the velocity gradient tensor l_{eff} - z plane at $y=0.5h$ at $Re=3,500$, (a) $x^*=0.008$, (b) $x^*=0.21$, (c) $x^*=0.5$, (d) $x^*=0.79$

의 측면 와류를 보이는 천이 과정에 해당한다. $x^*=0.5$ 지점을 지나면서 준 주기적인 형태가 점차로 사라지면서[Fig. 12(c)] $x^*=0.79$ 지점에서는 규칙성이 없는 난류가 된다.[Fig. 12(d)] 즉 난류로 천이되는 영역이 $Re=1,000$ 인 경우보다 더 상류에서 발생함을 뚜렷히 확인할 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 채널에 부착된 정육면체 장애물 주위에서 생성되는 윗면 와류와 측면 와류의 시간적 공간적 구조에 대한 전산 해석적 연구를 수행하였다. $Re=1,000$ 과 $Re=3,500$ 인 비교적 저 레이놀즈수의 난류유동에 대하여 고해상도의 DNS를 이용하여 이러한 와류들의 3차원적 발전과정(윗면 와류 → 헤이븐 와류, 측면 와류 → Λ 와류)

및 구조를 살펴보았다.

먼저 $Re=1,000$ 인 경우 $St=0.8$ 의 주파수를 갖는 헤어핀 와류와 측면 와류의 준 주기적 거동이 발견되었다. 이 와류들은 마치 하나의 구조처럼 시간적 및 공간적 거동을 하고 후류로 이동함에 따라 점차적으로 길이 규모가 작아지며 복잡한 난류로 천이 되었다. 또한 측면에서 시간에 따른 역학적 분석을 통해 후류의 와홀림 주파수도 발견되었으며 이 와홀림에 대해서는 $St=0.13$ 으로 관측되었으나 유동장에서 후류 와홀림 형태의 유동은 발견되지 않았다.

$Re=3,500$ 인 경우 이러한 헤어핀 와류와 측면 와류의 구조가 $Re=1,000$ 인 경우보다 더욱 작은 규모로, 상류 부근에, 비교적 좁은 영역에 걸쳐서 존재함이 관찰되었다. 헤어핀 와류의 주파수는 $St=1.6\pm 0.1$ 정도이고 측면 와류의 경우 $St=2.0\sim 7.2$ (평균 3.7)정도로서 $Re=1,000$ 인 경우에 비해 두 와류 간에 연관성이 없이 비교적 불규칙하게 준 주기적으로 거동함이 밝혀졌다. 공간적인 측면 와류의 형태는 두개의 Λ 형태로 발전되며 헤어핀 와류 역시 횡방향으로 한 파장으로 존재하는 $Re=1,000$ 인 경우와는 달리 두 개의 파장으로 분리되는 현상이 관찰되었다. 즉 Re 가 증가함에 따라 길이 규모가 더욱 작아지고 시간적으로도 더욱 불규칙하고 매우 높은 주파수를 갖는 거동을 보였다. 또한 공간적으로 난류로의 천이 영역도 $Re=3,500$ 인 경우에는 더욱 상류에서 일어남이 확인되었다.

후 기

이 논문은 2003학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(INHA-30217).

참고문헌

(1) Holmes, P., Lumley, J. L. and Berkooz, G., 1998, "Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry," *Cambridge Univ. Press*, pp. 63~82.
 (2) Haidarj, A. H. and Smith, C. R., 1994, "The Generation and Regeneration of Single Hairpin Vortices," *J. Fluid Mech.*, Vol. 277, pp. 135~162.
 (3) Yoon, H. and Kim, K. C., 2001, "Effect of Pressure Gradients on the Hairpin Structures in

Turbulent Boundary Layers," *KSME B*, Vol. 25, No. 8, pp. 1103~1112.
 (4) Elavarasan, R. and Meng, H., 2000, "Flow Visualization Study of Role of Coherent Structures in a Tab Wake," *Fluid Dynamics 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) Rodi, W., 1997, "Comparison of LES and RANS Calculations of the Flow Around Bluff Bodies," *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 55, pp. 69~71.
 (7) Shah, K., 1998, "Large Eddy Simulation of Flow Past a Cubic Obstacle," *Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Stanford University*.
 (8) Krajnović, S. and Davidson, L., 2002, "Large-eddy Simulation of the Flow Around a Bluff Body," *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 5, pp. 927~936.
 (9) Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 2001, "On the Structures in Near-Wake Region of a Cubic Obstacle Mounted on a Channel Wall," *KSME B*, Vol. 25, No. 12, pp. 1861~1868.
 (10) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69~94.
 (11) 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.
 (12) Yang, K. S. 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.
 (13) Hwang, J. Y. and Yang, K. S., 1999, "Numerical Study of Laminar Flow over a Protruding Surface (I), Flow Analysis," *KSME B*, Vol. 23, No. 11, pp. 1418~1425.
 (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) Kim, D. H., Yang, K. S. and Senda, M., 2004, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Past a Square Cylinder Confined in a Channel," *Computers & Fluids*, Vol. 33, No. 81, pp. 81~96.
 (16) Martinuzzi, R. and Tropea, C., 1993, "The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow," *J. Fluids Engineering*, Vol. 115, pp. 85~92.