

## 평판 사이 정방형실린더 주위의 난류 유동에 대한 LES

김도형\* · 양경수†

(2001년 7월 16일 접수, 2001년 12월 3일 심사완료)

### Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Past a Square Cylinder Confined in a Channel

Do-Hyeong Kim and Kyung-Soo Yang

**Key Words:** LES(대와동모사), Turbulence(난류), Square Cylinder(정방형 실린더), Vortex Shedding(와홀림), Passive-Particle Tracking(수동입자 추적)

#### Abstract

Turbulent flow past a square cylinder confined in a channel is numerically investigated by Large Eddy Simulation(LES). The main objectives of this study are to verify the experimental results of Nakagawa *et al.*[Exp. in Fluids, Vol. 27, 3, pp. 284-294, 1999] by LES and to obtain related flow information in detail. The LES results obtained are in excellent agreement with the experiment both qualitatively and quantitatively. The passive particles numerically released into the flow field clearly show the Karman vortex street. However, the vortices shed from the cylinder are significantly affected by the presence of the plates. Furthermore, periodic and alternating vortex-rollups are observed in the vicinity of the plates. The rolled-up vortex is convected downstream together with the corresponding Karman vortex forming a counter-rotating vortex pair. It is also revealed that the cylinder greatly enhances mixing process of the flow.

#### 1. 서론

유동장 내에 실린더형 장애물이 유동방향과 일정한 각을 이루면서 존재하는 경우, 실린더 후류방면으로 와홀림(vortex shedding)에 의한 카르만 와류가 생성되어 대류되는데, 이 카르만 와류에 대한 이해는 물리적인 관점에서 뿐만아니라, 공학적인 관점에서도 오랜 기간동안 연구되어온 고전적인 주제들 중의 하나이다. 카르만 와류의 유동현상에서 두드러진 특징 중의 하나는 이러한 와류에 의해 실린더에 주기적인 하중이 작용한다는 것이다. 이러한 주기적인 하중은 실린더로부터 하류로 번갈아 흘러지는 와류에 의해 실린더면에 작용하는 압력이 주기적인 변화를 하기 때

문이다. 만약, 이러한 하중의 진동수가 구조물의 고유진동수와 비슷하면 공진현상에 의해 구조물의 안정성에 치명적인 결과를 초래할 수도 있다. 이러한 문제 때문에 그동안 많은 연구가 진행되어져 왔는데, 유동구조의 위상학적인 유사성에도 불구하고, 사각단면의 실린더보다는 원통형 실린더 주위 유동에 대한 연구가 더 많이 수행되어져 왔다. 두 유동구조의 구별되는 특징으로는 원통형 실린더의 경우 유동의 박리점이 고정되지 않고 원통형 실린더 표면위의 일정 간격을 시간에 따라 주기적으로 움직이는데 비해 사각단면 실린더에서는 극히 낮은 레이놀즈수( $Re$ )의 경우를 제외하고는 박리점이 실린더의 선단부에 고정된다는 것이다. 사각단면 실린더 주위 유동에서 실린더 선단부에서의 박리현상과 그에 따른 유동의 주기적인 거동에 대한 이해는 실린더의 근접 후류 지역에서의 비정상적인 유동현상을 이해하는데 도움을 줄 것이다. 그것은 또한, 열이나 물질

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : ksyang@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7322 FAX : (032)868-1716

의 이송현상의 실제적인 응용분야와 밀접한 관련이 된다.<sup>(1~3)</sup> 예를 들어 확산화염 연소기내 보염기 주위에서의 연료 이송현상의 규명은 연소기 설계와 그 성능 향상에 있어서 핵심적인 요소가 된다.<sup>(4)</sup>

사각단면 실린더 주위 유동에 관한 그동안의 연구들 중에서 Davis & Moore<sup>(5)</sup>는 실린더 단면의 높이와 길이의 비(단면형상비)와  $Re(100\sim 2,800)$ 를 변화시키며 수치연구를 수행하여 실린더 주위의 유동의 구조와 Strouhal수( $St$ ) 그리고, 항력계수 등이  $Re$ 에 따라 변화하는 것을 보였다. Lyn & Rodi<sup>(6)</sup>는 실린더의 후류부에 대한 직접적인 관찰보다는 사각단면 실린더의 선단부에서 일어나는 박리현상이 후류부에 주는 영향을 관찰하기 위하여 비교적 높은  $Re(21,400)$ 의 유동에서 실린더에 근접한 영역에 대해 주목하였다. Okajima<sup>(7)</sup>는  $Re$ 가  $70\sim 2\times 10^4$ 인 범위에서 단면형상비를 달리하면서 그에 따른 유동구조의 변화에 대한 실험을 수행하여 특정한 단면형상비에 대해  $St$ 의  $Re$ 에 따른 변화에 불연속적인 지점이 존재함을 보였다. 지금까지 언급한 연구들은 실린더 높이와 평판 사이간격의 비(가로막음비,  $h/H$ )가 7.5%미만인 유동들로서 평판이 후류의 발달에 끼치는 영향이 없거나 작고, 연구의 주된 관심은 실린더 주위에서의 유동과 후류에 집중되었다. 한편, Davis *et al.*<sup>(8)</sup>은 평판내 실린더가 존재하는 유동에 대해서  $Re(100\sim 2,000)$ , 입구조, 단면형상비, 가로막음비 등을 변화시켜 가면서 실험과 수치모사를 수행하였다. 이 연구에서 가로막음비는 최고 25%로 평판이 존재함으로써 항력계수와  $St$ 가 증가하고 후류와 평판면 사이에 재순환류가 발생하는 것을 보고하였다. 그러나, 그들은 수치모사에서 2차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하였는데, 실린더의 선단부에서의 박리 이후의 난류유동에 2차원의 지배방정식을 적용하였다는 것은 부적절한 것으로 사료된다. Nakagawa *et al.*<sup>(9)</sup>은 가로막음비가 20%인 평판사이에 존재하는 사각실린더 주위의 유동장에 대하여 실험을 수행하였는데, 그들은 상평균(phase average)과 시간 평균법을 이용하여 이러한 기하학적인 유동조건에 의존하는 고유한 유동구조(coherent structure)와 그와는 달리 완전히 난류적인 유동구조(incoherent or turbulent structure)가 주유동에 어떻게 기여하고 있는지를 보여 주었다.

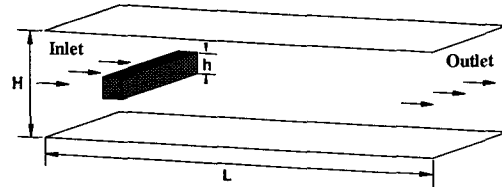


Fig. 1 Physical configuration

본 연구에서 다루는 유동형상은 Fig. 1과 같이 두 평판의 정중앙에 평판에 평행하게 정사각 단면실린더가 존재하는 형태인데 이는 Nakagawa *et al.*<sup>(9)</sup>의 실험 유동형상과 일치하는 형태로서 그들의 실험과 동일한 유동조건에 대하여 3차원 LES를 수행하였다. 그리고, 얻어진 LES결과를 그들의 실험결과와 정성적 및 정량적으로 비교하여 그들의 실험결과를 수치적으로 검증하였다. 제시된 유동형상은 가로막음비가 20%로서 실린더 후류에서의 카르만 와류의 발달이 평판들로 인해 큰 영향을 받게되고 역으로 평판 근처에서의 유동구조도 기존의 채널 유동과는 달리 실린더에 의해 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 LES에 의한 Eulerian 유동장 해석과 수동 입자를 이용한 Lagrangian 해석을 병행하여 평판과 실린더 상하간의 영향을 상세히 고찰하였다.

## 2. 연구방법 및 이론

### 2.1 수식전개

지배방정식으로는 검사체적 내에서 평균을 구하는 효과를 갖는 상자필터(box filter)를 사용하여 여과된(filtered) 3차원 비압축성 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \\ - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

( $i=1, 2, 3$ )

여기서,  $u_i$ 는  $x_i$ 방향으로의 속도성분,  $P$ 는 압력 성분,  $\tau_{ij}$ 는 아격자 스케일의 응력성분들을 나타

낸다. 수식전개에 대한 자세한 설명은 양경수<sup>(10)</sup>의 논문을 참조하기 바란다. 본 논문에 표기되는 모든 변수들은 입구에서의 평균 속도  $U_m$ 과 정사각 실린더의 높이  $h$ 를 각각 속도 및 길이 스케일로 하여 무차원화 되었다. 지배 방정식을 이산화하기 위해서 유한체적법(finite-volume method)을 적용하였고, 비균일 엇갈린 격자계(nonuniform staggered grid)를 사용하였다. 아래 Fig. 2는 LES에 사용된 격자계를 횡방향( $z$ )의 한 단면에서 보여주고 있는데, 장애물 주위에 가장 근접한 격자간격과  $h$ 와의 비가 0.01이 되도록 하였고, 격자세분화 연구(grid-refinement study)를 수행하여 주유동 방향( $x_1$  혹은  $x$ ), 수직방향( $x_2$  혹은  $y$ ), 횡방향( $x_3$  혹은  $z$ )으로 각각  $224 \times 144 \times 64$ 의 해상도를 채택하였다.

적절한 아격자 스케일 모델의 선택은 LES의 성공적 수행에 있어 매우 중요하다. 사용된 아격자 스케일 모델에 대한 자세한 설명은 Yang & Ferziger<sup>(11)</sup>의 논문을 참조하기 바란다. 본 LES에서는 고정된 모델계수를 사용하지 않고, 모델계수를 정하는데 있어서 유동장의 시간에 따른 변화에 대한 정보가 매 순간마다 반영되는 동적인 아격자 스케일 모델을 사용하였다.<sup>(11)</sup>

2.2 경계조건 및 유동파라미터

횡방향 계산영역의 크기( $W$ )는  $h$ 와 같게 하였고 균질한 방향인 횡방향으로는 주기조건을 사용하였다.  $U_m$ 과  $h$ 를 기준으로 한  $Re = 3,000$ 으로 고정되었다. 유동장에 대한 입구조건으로는 벽면으로부터의 경계층의 두께가 평판사이 간격( $H$ )의 6%인 속도 분포를 사용하였다. 이는 Nakagawa *et al.*<sup>(9)</sup>의 실험과 동일한 입구조건을 주기 위한 것으로서, 이를 위하여 예비적으로 입구에서의 속도분포가 균일한 평판사이유동의 층류계산을 수행하여 경계층의 두께가 실험에서와 같은 조건인 지점에서의 속도 분포를 LES의 입

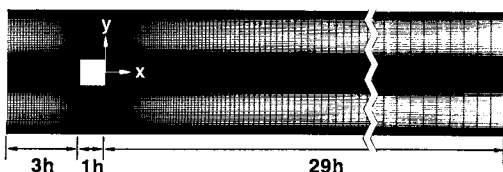


Fig. 2 Grid system

구조조건으로 사용하였다. 그리고, 난수를 발생시켜  $U_m$ 의 약 6%정도의 편차를 주었다. 출구에서는 아래 식 (3)과 같은 대류조건<sup>(4)</sup>을 적용하였다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + U_{conv} \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

여기서,  $U_{conv}$ 는 출구에서의 평균속도이고  $f$ 는 출구를 빠져나가는 물리적 변수로서 유동장에 대해서는 각 방향의 속도 성분인  $u_i$  ( $i=1, 2, 3$ )를 의미한다. 모든 고체 벽면에서는 no-slip조건을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균유동장

먼저 시간 및 횡방향으로 평균된( $\langle \rangle$ ) 주유동 방향 속도와 난류 특성치들을 Nakagawa *et al.*<sup>(9)</sup>의 실험결과와 비교하였다. 시간평균이 수행된 시간을 정량적으로 표시하기 위해 FTT(Flow-Through Time)라는 무차원화된 시간스케일을 정의하였다. 이는 전체 유동장의 길이( $L$ )를  $U_m$ 으로 나눈 시간스케일( $L/U_m$ )로서 본 연구에서는 약 6.3FTT 동안 시간평균이 이루어졌다. Fig. 3은 실린더의 후류쪽 면으로부터 유동장의 중심선을 따라 주유동 속도성분( $u_1$  혹은  $u$ )과 주유동에 대하여 수직 방향인 속도성분( $u_2$  혹은  $v$ )의 시간과 공간에 대해 평균된 값을 나타낸다. 주유동 방향의 평균 속도분포를 나타내는 Fig. 3(a)는 본 수치모사의 결과가 실험치가 존재하는 영역 전반에 걸쳐서 고르게 일치하고 있음을 보여주고

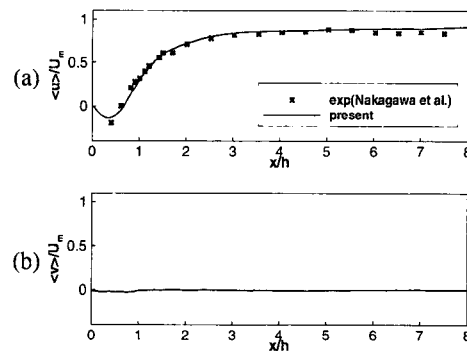


Fig. 3 Mean velocity profile along the centerline ; (a) streamwise component, (b) normal component

있다. 실린더의 후류쪽 면에 아주 근접한 영역에서의 실험치가 없어서 후류쪽 면에 생성된 재순환구역을 정량적으로 정확히 예측하고 있음을 확인할 수는 없다. 하지만, 현재의 결과만으로 볼 때, 본 수치모사는 재순환구역의 크기와 최대 역류 속도를 비교적 타당성 있게 예측하는 것으로 판단된다. Fig. 3 (b)는 주유동 방향에 수직인 방향의 속도분포를 Fig. 3 (a)에 나타난 주유동 속도의 스케일로 그린 것으로서, 유동의 기하학적인 조건이 중심선을 따라 대칭이므로 그림에서와 같이 0에 가까운 값으로 나타나는 것이 타당함을 알 수 있다. Fig. 4는 실린더 주위와 후류영역에서의 평균된 속도장의 유선을 나타낸 그림이다. 실린더의 후류쪽에서는 일반적인 실린더형 장애물의 후류부에서 쉽게 관찰될 수 있는 1쌍의 반전하는(counter-rotating) 와류를 관찰할 수 있다. 실린더의 위아래면 근처에서는 선단부 모서리 부분에서의 박리로 인하여 발달한 재순환 구역을 확인할 수 있는데, 이는 원형단면 실린더에서는 관찰될 수 없는 현상이다. 또한, 선단부에서 박리된 유동이 실린더 면에 재부착하지 않음을 관찰할 수 있다. Fig. 5-9에서는 실린더의 후류쪽 면으로부터  $x/h=1, 3.5, 6.0, 8.5$ 인 지점에서의 평균 속도, 난류 RMS 및 레이놀즈 응력의 수직방향 분포를 각각의 실험치<sup>(12)</sup>와 비교하였다. 유동장이 대칭이므로 결과는 중심축 아래부분에 대해서만 나타내었다. Fig. 5는 주유동방향의 속도분포를 나타낸 것으로서 중심선 뿐만아니라 수직인 방향으로의 속도분포가 각 지점에서 실험치와 모두 일치되는 결과를 보여주고 있다. Fig. 5 (a)에서 관찰할 수 있는 중심부에서의 낮은 유속이 하류로 가면서 곧 회복이 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 수직방향 속도분포를 나타내는데, Fig. 6 (a)는 장애물에 가장 근접한 위치에서의 수직

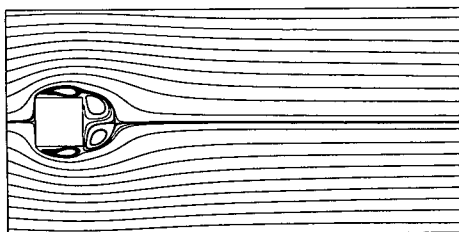


Fig. 4 Streamlines of time and space( $z$ ) averaged velocity field

방향 속도분포로서 실린더 후류에 생성된 와류쌍의 영향을 많이 받고 있음을 보여주고 있다. Fig. 6 (b), (c), (d)에서 보듯이  $x/h=3.5$ 인 지점보다 하류에는 실린더에 의한 영향이 거의 미치지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 주유동방향 속도의 섭동성분의 RMS분포를 나타내는데, 실린더에 근접한 지점에서는(Fig. 7(a)) 실험치와 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나, 하류지점들에서는(Fig. 7 (b), (c), (d)) 평판면과 중심선 사이의 영역에서 실험치보다 크게 예측하는 경향이 있음을 볼 수 있다. Fig. 8은 수직방향 속도의 섭동성분의 RMS값을 나타내고 있는데, 실린더에 근접한 지점뿐만아니라 하류지역에서도 실험치와 고르게 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 특이할 만한 점은  $x/h=1.0$ 지점에서의 수직방향 속도의 섭동성분 RMS값의 최대치가 주유동방향 속도의 섭동성분 RMS의 최대치(Fig. 7(a))보다 큰 것으로서, 이로부터 실린더의 윗면 혹은 아랫면으로부터 성장하는 와류가 서로 반대되는 영역으로 활발한 모멘텀 전달을 야기함을 알 수 있다. Fig. 9는 레이놀즈 응력의 분포를 나타낸 것으로서

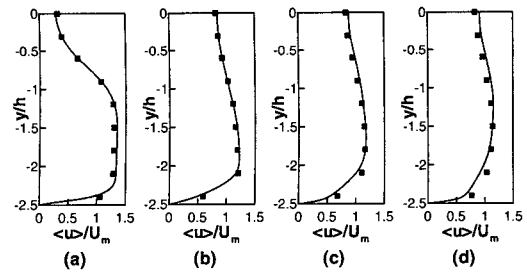


Fig. 5 Streamwise mean velocity profile(  $\bullet$  : Nakagawa et al.,<sup>(12)</sup> — : present ) ; (a)  $x/h=1.0$ , (b)  $x/h=3.5$ , (c)  $x/h=6.0$ , (d)  $x/h=8.5$

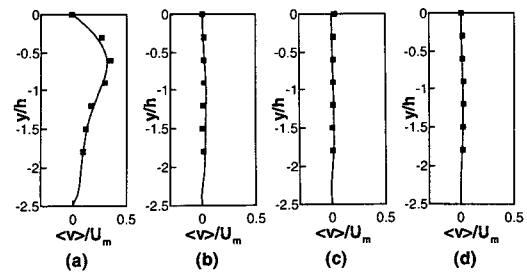


Fig. 6 Normal mean velocity profile(  $\bullet$  : Nakagawa et al.,<sup>(12)</sup> — : present ) ; (a)  $x/h=1.0$ , (b)  $x/h=3.5$ , (c)  $x/h=6.0$ , (d)  $x/h=8.5$

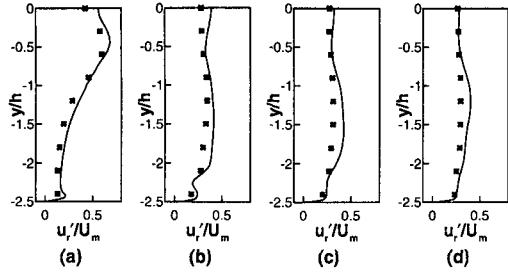


Fig. 7 RMS profile of streamwise velocity fluctuation (  $\square$  : Nakagawa *et al.*,<sup>(12)</sup> — : present) ; (a)  $x/h=1.0$ , (b)  $x/h=3.5$ , (c)  $x/h=6.0$ , (d)  $x/h=8.5$

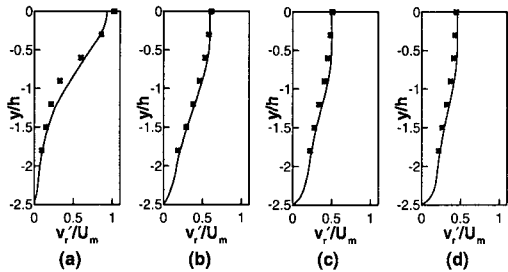


Fig. 8 RMS profile of normal velocity fluctuation (  $\square$  : Nakagawa *et al.*,<sup>(12)</sup> — : present) ; (a)  $x/h=1.0$ , (b)  $x/h=3.5$ , (c)  $x/h=6.0$ , (d)  $x/h=8.5$

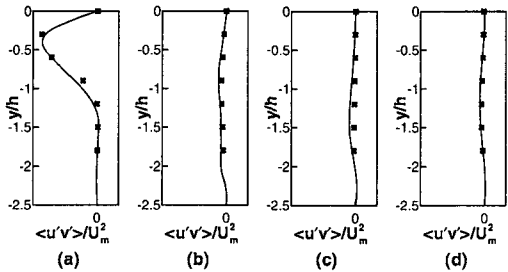


Fig. 9 Reynolds stress profile (  $\square$  : Nakagawa *et al.*,<sup>(12)</sup> — : present) ; (a)  $x/h=1.0$ , (b)  $x/h=3.5$ , (c)  $x/h=6.0$ , (d)  $x/h=8.5$

각 지점에서의 값이 실험치를 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다. 여기서도, 실린더에 아주 근접한 지역에서만 레이놀즈 응력이 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 벽면 근처에서의 레이놀즈응력은 실린더 주위에 비해 상대적으로 매우 미약함을 알 수 있다. 지금까지 설명한 난류 특성치들의 실린더 주위에서의 분포를 좀 더 명확히 알아보기 위해 난류의 각 방향 섭동성분들과 난류강도를 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 Fig.

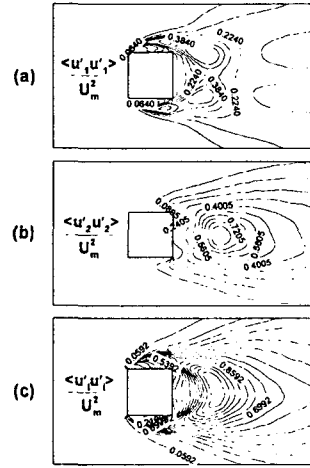


Fig. 10 Contour plots of turbulent fluctuations and turbulence intensity (increment : 0.08) ; (a) stream-wise turbulent fluctuation, (b) normal turbulent fluctuation, (c) turbulence intensity

10(a)는 주유동방향의 섭동성분을 나타내는데, 실린더의 후향 모서리의 상·하류 지점에 높은 난류영역이 비교적 좁게 중심선에 대칭으로 존재하고, 하류지점에 보다 넓은 영역에 걸쳐 생성되어 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 10(b)는 수직방향의 섭동성분을 그린 것으로서 실린더의 후류쪽 면으로부터 실린더의 길이만큼 떨어진 지점에서 최대 값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 10(c)는 각 속도 섭동성분들을 더한 난류강도를 나타낸 그림으로서 난류강도가 큰 구역은 주로 주유동 방향 속도의 섭동성분과 수직방향 속도의 섭동성분에 의해 정해지는 것을 보여주고 있고, 이 지점은 유동이 재순환하면서 크고 작은 와류들이 아래위로 번갈아 흐르는 지역으로서 실제적인 응용유동에 있어서 활발한 섞임현상을 기대할 수 있는 유동영역임을 알 수 있다. Fig. 11은 평판면에 작용하는 전단력의 주유동 방향으로의 분포를 나타낸 것으로  $x/h=-0.8$ 에서 전단력이 최대가 되는 것을 볼 수 있는데, 이 지점은 실린더의 존재로 인하여 유로가 축소되어 유동이 가속되기 시작하는 지점이다. 한편, 전단력이 최소가 되는 지점은 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 카르만 와류에 대응하여 평판면에서 박리가 일어나 새로운 와류가 발

생되는 영역과 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 유동의 박리를 일으키는 압력의 역구배 현상으로 인하여 평균된 주유동 방향 속도성분의 수직방향으로의 구배가 다른 지점들보다 작아진 것임을 예측할 수 있다. Fig. 12는 하류지역에서 주유동 방향 평균속도의 수직방향으로의 분포를 벽단위로 무차원화하여 그린 것으로서 벽법칙과 비교하였을 때, 점성층의 두께가 얇아진 것을 관찰할 수가 있다. 이는 Davenport<sup>(13)</sup>가 유로가 급팽창하는 원형 확대관 실험에서 재순환구역 내 벽면 근처에서와 재부착지점에 근접한 벽면 근처에서 측정한 주유동 방향 속도성분의 분포와 같은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고, 하류지역으로 갈수록 평형경계층의 분포로 회복되고 있는 것을 확인할 수가 있는데, 이는 유동이 재발달되고 있다는 것을 말해준다.

3.2 순간유동장

실린더 주위에서 일어나는 복잡한 유동의 시간에 따른 변화를 효과적으로 관찰하기 위하여 본 연구에서는 수동입자 수치모사를 적용하여 유동장내 일정한 위치에서 주기적으로 유동장 내에 유입(release)된 입자들을 추적하였다. Fig. 13 (a)

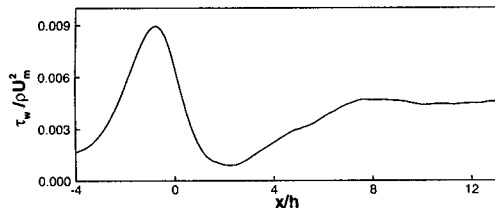


Fig. 11 Mean shear stress distribution along the plate

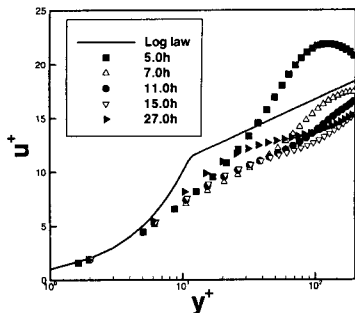


Fig. 12 Mean streamwise velocity profiles at various streamwise (x) locations downstream of rectangular cylinder in wall-unit

는 실제로 수소방울을 이용한 실험에서의 한 순간을 포착한 장면이고, Fig. 13 (b)에서는 수동입자 수치모사를 적용하여 얻은 일련의 실린더 주위 유동형상 중에서 실험과의 위상이 같은 장면을 보여주고 있다. 실린더 주위에서의 유동구조와 실린더 후류쪽 면으로부터 x/h=8정도의 지점까지는 서로 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그 이후 하류지역에서는 상류부처럼 뛰어난 일치를 보이지는 않지만, 비교적 상호 연관된 유동구조를 파악할 수 있다. 실제 수치모사를 적용하는데 있어서 하류지역에서의 격자간격이 실린더에 근접한 구역에서의 격자간격보다 상당히 성긴 점을 감안한다면 본 수치모사가 실제적인 유동장을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14는 실린더에 의해 생성된 카르만 와류의 구조가 아래 위 평판들에 의해 어떠한 영향을 받는지를 알아보기 위하여 유동장 입구면의 중심부분과 양쪽 평판면 근처 ( $\Delta y/h=0.05$ )에서 수동입자를 유입시킨 경우에 대해 수치모사를 실시한 결과를 보여주고 있다. 연속된 그림들을 보면, 우선 실린더에 의해 생성된 전형적인 카르만 와류의 구조를 관찰할 수 있다. 이러한 실린더 후류부의 유동이 상류부로 영향을 미쳐서 중심선을 따라 이동되어 온 입자들이 실린더의 상류쪽 전면부의 위아래로 번갈아 대류되는 것을 관찰할 수 있다. 한편, 실린더에서 발달하여 막 떨어진 와류가 평판으로 인해 넓은 후류를 이루지 못하고 주유동 방향으로 강제적으로 진행하게 되고, 이때 와흐림은 평판

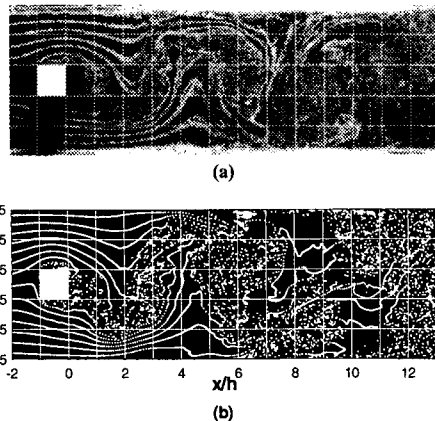


Fig. 13 Flow visualization ; (a) experiment (Nakagawa et al.<sup>(12)</sup>) using hydrogen bubbles, (b) current simulation using passive particles

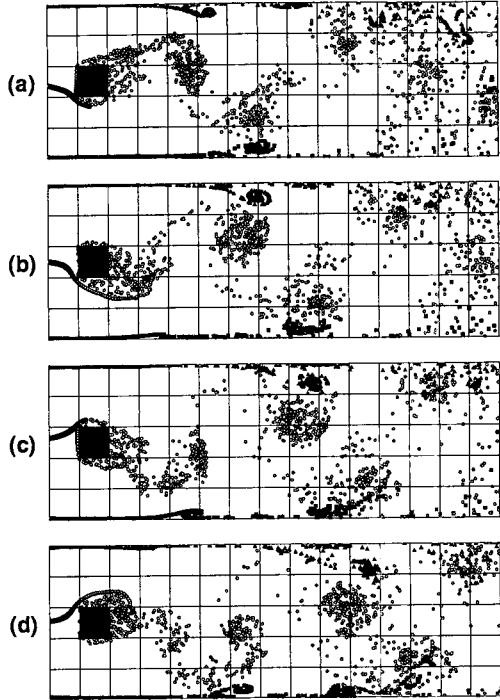


Fig. 14 Sequential plots of passive particles ; (a)  $t=T_1$ , (b)  $t=T_1+0.23 T$ , (c)  $t=T_1+0.47 T$ , (d)  $t=T_1+0.70 T$ , where  $T$  is period of vortex shedding

면에서의 no-slip을 만족하기 위해 유동의 박리를 일으켜 반대방향으로 회전하는 새로운 와류를 유도하게 되는 것을 관찰할 수 있다. 그림들에서 알 수 있듯이 이렇게 평판면으로부터 생성된 와류는 실린더에서 생성된 와류보다 규모에 있어서는 작지만, 서로 반대로 회전하는 와류쌍을 이루어 정확히 같은 속도로 하류로 이동하는 것을 볼 수 있다. 그리고, 이러한 와류쌍이 각각의 평판면을 따라 주기적으로 일어나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15는 아래 평판면에 근접한 유동장에서 박리가 일어나는 장면을 보여주고 있는데, 박리 현상이 주기적으로 일어나고 있는 것을 관찰할 수가 있다. Fig. 16은 실린더의 선단부로부터 주 유동 방향과 수직방향으로 각각  $0.1 h$ 되는 지점에서 유입된 수동입자들의 일정 시간 후의 분포를  $x-y$ 평면에서 보여주고 있는데, 그림으로부터 선단부에서의 박리로 인하여 발생한 와류가 성장하면서 후류부로 대류되는 것을 뚜렷이 관찰할 수 있다. 또한, 여기서 주목할 것은 실린더

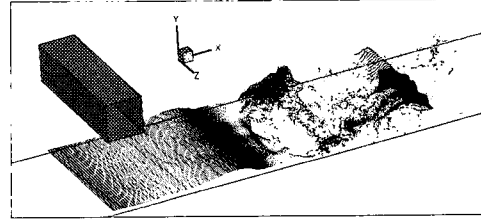


Fig. 15 Passive-particle simulation showing separation on the lower-wall

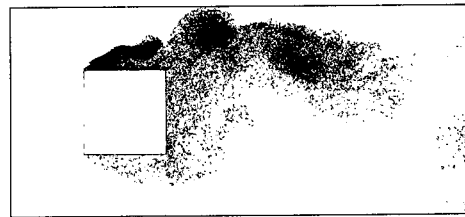


Fig. 16 Distribution of passive particles around the cylinder

의 윗면에서 유입된 수동입자들이 실린더 아랫면의 선단부까지 이동하여 분포하고 있는 것을 볼 수가 있는데, 이것은 실린더 주위에서의 유동이 아주 복잡하게 일어나는 것을 확인시켜 주고 있다. 실제적인 응용에 있어서, 열이나 물질들의 섞임현상이 활발하게 일어나도록 하는데, 이러한 실린더형의 구조물이 도움이 될 것임을 다시 한번 확인할 수가 있다. 한편, 실린더의 표면에서 계산된 양력계수의 주기와 실린더 위 유동의 평균속도와 실린더의 높이  $h$ 를 기준으로  $0.124$ 의  $St$ 를 얻을 수 있었고 이는 Nakagawa *et al.*<sup>(9)</sup>이 얻은  $0.13$ 에 가까운 값을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 평행한 두 평판사이에 단면이 정방형인 실린더가 존재하는 유동형상에 대하여 LES를 적용하여 유동장의 구조와 특성을 해석하였다. 수치모사의 결과로 얻은 시간평균된 유동장을 실험치와 비교하여본 결과, 3차원 LES는 실제적인 유동장을 정확히 예측하고 있는 것을 알 수 있었다. 시간평균된 유동장의 유선도로부터 실린더형의 구조물 후류에서 일반적으로 발견되는 반전하는 와류쌍을 발견할 수 있었고, 실린더의 기하학적인 조건으로 인한 선단부에서의 박리

에 의해 실린더의 아래와 윗면에 형성된 재순환 구역을 관찰할 수 있었다. 실린더에 근접한 하류 지역에서는 주유동방향의 난류성분보다 수직방향의 난류성분이 더 크게 영향을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 시간에 따른 유동의 변화와 특성을 가시적으로 살펴보기 위해 수동입자 수치모사를 수행하였고, 비록 유동장의 하류부에서의 성긴 격자간격으로 인하여 해상도가 떨어지긴 하였지만, 실린더 주변과 실린더에 근접한 후류지역에서의 순간 유동장을 정확히 예측하였다. 한편, 실린더의 후류부로 대류되는 와류의 구조는 평판에 의해 그 작용폭이 제한되고, 그로 인해 야기되는 평판면 근처의 유동과 실린더에서 흘러진 와류의 상호작용을 파악하기 위해 유동장의 중심선을 따라 들어오는 유동입자와 평판면에 근접하여 유입되는 유동입자를 추적하여 동적인 구조를 보다 자세히 관찰할 수 있었다. 실린더에서 흘러진 와류는 평판쪽으로 가까이 이동을 하고, 평판에 가까이 흐르는 유동의 박리를 유도하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 현상은 두 평판면을 번갈아 연속적으로 일어나며, 1쌍의 반전하는 와류쌍을 이루어 하류로 대류되고, 마침내는 그 구조가 소멸되는 것을 확인할 수 있었다. 실린더의 선단부에서의 박리현상을 추적하기 위해 유입된 수동입자를 추적해 본 결과, 박리된 유동이 후류부로 이동하면서 와류를 생성·발달시키는 것을 확인할 수 있었고, 특히, 활발한 섞임현상에 의하여 유입된 입자가 실린더의 반대면의 박리구역으로 이동하여 분포하고 있는 것을 확인할 수가 있었다.

## 후 기

이 논문은 2001학년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.(INHA-21959)

## 참고문헌

- (1) Nakagawa, S., Senda, M., Kikkawa, S., Wakasugi, H. and Hiraide, A., 1996, "Heat Transfer in a Channel Flow with Rectangular Cylinder," *Proceedings of the 3rd KSME-JSME, Thermal Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 501~506.
- (2) Koutmos, P., Mavridis, C., and Papailiou, D., 1996, "A Study of Turbulent Diffusion Flames Formed by Planar Fuel Injection into the Wake Formation Region of a Slender Square Cylinder," *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, pp. 161~168.
- (3) Bakroziis, A. G., Papailiou, D. D., and Koutmos, P., 1999, "A Study of the Turbulent Structure of a Two-Dimensional Diffusion Flame Formed Behind a Slender Bluff-Body," *Combustion and Flame*, 119, pp. 291~306.
- (4) 김도형, 양경수, 신동신, 2000, "Planar-Jet형 연소기 내 난류유동의 LES," *대한기계학회 논문집 B권*, 제24권, 제10호, pp. 1409~1416.
- (5) Davis, R. W., and Moore, E. F., 1982, "A Numerical Study of Vortex Shedding from Rectangles," *J. Fluid Mech.*, vol. 116, pp. 475~506.
- (6) Lyn, D. A., and Rodi, W., 1994, "The Flapping Shear Layer Formed by Flow Separation from The Forward Corner of a Square Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 267, pp. 353~376.
- (7) Okajima, A., 1982, "Strouhal Numbers of Rectangular Cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, pp. 379~398.
- (8) Davis, R. W., Moore, E. F. and Purtell, L. P., 1984, "A Numerical-Experimental Study of Confined Flow Around Rectangular Cylinders," *Phys. Fluids*, 27 (1), pp. 46~59.
- (9) Nakagawa, S., Nitta, K. and Senda, M., 1999, "An Experimental Study on Unsteady Turbulent near Wake of a Rectangular Cylinder in Channel Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 27, No. 3, pp. 284~294.
- (10) 양경수, 1994, "높은 레이놀즈수에서의 난류 장애물유동의 Large-Eddy Simulation," *대한기계학회 논문집*, 제18권, 제7호, pp. 1866~1872.
- (11) Yang, K. S. and Ferziger, J. H., 1993, "Large-Eddy Simulation of Turbulent Obstacle Flow Using a Dynamic Subgrid-Scale Model," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 8, pp. 1406~1413.
- (12) Nakagawa et al., 2001, private communication
- (13) Davenport, W. J., 1985, "Separation Bubbles at High Reynolds Number : Measurement and Computation," *Ph. D. Thesis, Department of Eng.*, University of Cambridge.