

대형 와 모사법 (LES)을 이용한 사각 실린더 주위의 난류 유동장 해석

윤현식^{†*}, 전호환^{*}, 정광효^{*}

부산대학교 첨단조선공학연구센터^{*}

Large Eddy Simulation of Turbulent Flow around a Square Cylinder

Hyun Sik Yoon^{†*}, Ho Hwan Chun^{*} and Kwang Hyo Jung^{*}

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University^{*}

Abstract

This study has investigated the turbulent flow around a square cylinder by using LES (large eddy simulation). Numerical simulations are performed for turbulent flow fields with $Re = 22,000$. The computed results are in good agreement with existing computational and experimental data. The time-averaged and phase-averaged turbulent statistics around a square cylinder are discussed. Total 20 phase bins extracted from one cycle period showed detailed wake structures of the phase-averaged flow field. The center of Karman vortex sheets did not deviated ± 0.5 from centerline of square cylinder while moving downstream.

※Keywords : Square cylinder(사각 실린더), Wake(후류), Turbulence(난류), LES(대형 와 모사법)

1. 서론

둔한 물체(bluff body)를 지나는 후류 유동과 같은 외부 유동은 학문적인 연구대상 이외에도 공학 및 산업적 측면에서 응용범위가 넓어 현재 이 분야에 대한 연구가 계속되고 있다. 특히, 사각 실린더(square cylinder)에 의한 후류 유동은 유동장이나 원주의 조건(크기) 등에 따라 유동 및

열전달의 형태가 변하는 공기역학적 분야이므로 이론 및 물리적 현상규명의 주요대상이 되어왔다. 이러한 사각 실린더에 의한 후류 유동을 제어 또는 응용할 목적으로 다양한 후류 구조와 양력 및 항력과 같은 유체역학적 특성이나 열전달 특성 등이 연구의 대상이 되고 있다. 최근 컴퓨터와 측정기술의 발달에 힘입어 수치적 해석과 실험적 해석 방법을 통한 새로운 연구결과들이 많이 도출되고 있다.

균일한 유동에서 만들어진 박리 전단층은 큰 형상의 회전류 속으로 들어가 에너지를 전파하고 소멸되어 간다. 이는 실린더에 의해 발생하는 동적

접수일: 2005년 7월 15일, 승인일: 2006년 11월 27일

†교신저자: lesmodel@pusan.ac.kr, 051-510-3685

영향에 의해 주기적 회전류 생성과 소멸에 직접적인 영향을 미친다. 일반적으로 유동의 박리가 생기는 부분에서는 재순환 영역을 동반하며 주기적인 와열은 구조물의 진동에 영향을 미치고 있어 이에 대한 깊은 이해는 난류 예측 방법의 개선과 난류 동적 특성의 이용과 제어를 위해서 반드시 필요하다. 이러한 유동장 내부의 비정상 박리 유동은 그 기본적인 유동의 형태로 인한 중요성 뿐만 아니라 무한이 많은 공학적인 적용 분야를 갖는다. 또한 사각 실린더는 각종 구조물의 일반적인 형태이며, 여기에 작용하는 유체력을 감소시키기 위한 연구는 그 응용에서 중요하다고 할 수 있다. 운동하는 유체 속에 있는 물체는 그 주위의 유체와 상호 작용으로 인하여 물체는 힘(양력과 항력)을 받는다. 이로 인한 변형과 피로에 의한 파괴에 이르게 된다. 무딘 물체의 경우 박리 흐름의 비정상적인 후류를 유발시켜 물체에 대한 제어능력이나 물체에 대한 파괴요인에 큰 영향을 미친다.

난류현상에서 응집구조(coherent structure)의 발생 및 역할에 대해, 최근 많은 부분이 규명되고 있다. 응집구조에 관한 연구는 겉으로 보기에 무질서해 보이는 유동장에서 규칙성 및 반복성을 찾아 난류현상의 조절가능성을 찾는 것이다. 응집구조에 대해 아직 일반화된 표현은 없으나 “공간적으로 위상 상관된 와도를 갖는 난류유체 질량의 연결”이라고 한 Hussain and Zaman(1980)의 정의에 의하면 난류전단유동은 응집구조(coherent structure)와 비응집 구조(incoherent structure)로 나누어 질 수 있다. 난류 후류 유동에서의 응집구조에 관한 연구를 보면 Cantwell(1983), Hussain and Zaman(1980)등의 근점후류(near wake)에서 조건부 추출 및 평균화 작업을 적용하여 응집구조의 위상관계를 강조하고 있으며, 먼 후류(far wake)에서의 응집구조에 관한 연구는 흐름의 가시화 및 속도장 측정을 통해 근점후류의 칼만 와열과는 구별되는 2 차 와열구조를 갖는 것으로 알려져 있다. 여기서, 2 차 와열구조는 실린더 근처에서 칼만 와열이 후류로 가면서 분개하여 추가적인 와열이 생성되는 것을 의미한다. 하지만 응집구조의 형성기구에 대해서는 이견들이 많은데, 특히 Budny and Karwall(1979)은 원주중심으로부터 원주직경의

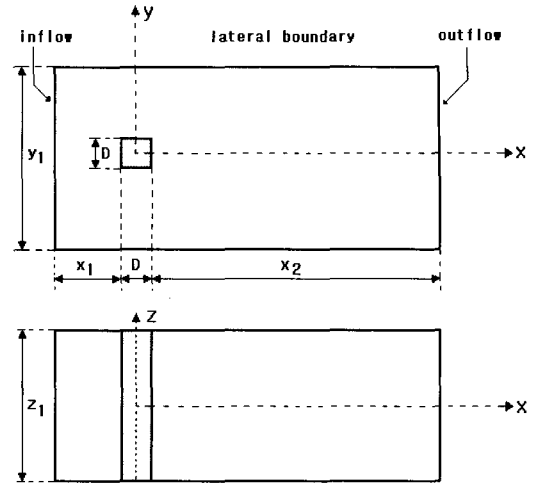


Fig. 1 Cross-sectional views of square cylinder configuration

65 배 이상의 하류영역에서는 칼만 와열에 의한 중심주파수를 찾을 수 없음을 보이고 있으며 Cimbala and Ngib (1988)은 먼 후류의 응집구조가 근점후류의 와류와는 독립적이며 평균 후류 유동의 역학적 불안정성에 의한 것으로 보고하고 있다.

최근까지의 연구분야를 살펴보면, 먼 후류에 대한 응집구조의 연구는 상대적으로 저조한 반면에 다단 터보기계, 열교환기의 관군, 복수의 구조물 등의 공학적 장치 및 구조물에서 중요한 의미를 갖는 근점 및 중간 후류영역은 여러 가지의 방법을 이용하여 많은 연구가 시도되고 있다. 사각 실린더 주위 유동의 대표적인 선행 연구들로서, Lee(1975)는 레이놀즈 수가 1.76×10^5 에서 실린더의 압력 분포를 측정하였고, Bearman and Obasaju(1982)는 레이놀즈 수가 5.8×10^3 과 3.2×10^4 에서 사각 실린더의 압력분포를 측정하였다. Lyn et al. (1995)은 레이놀즈 수가 2.1×10^4 에서 LDV 를 이용하여 유동장내의 속도 분포를 측정하였다. Bosch and Rodi(1998)는 Lyn et al. (1995)의 실험 결과를 수치해석을 통하여 난류 모델에 따른 결과와 비교하였다. 특히, Bosch and Rodi(1998)은 다양한 난류 모델을 사용하여 난류모델이 결과에 주는 차이점에 대한 논의를 하였다. 이들은 $Re = 22,000$ 에서 $k-\epsilon$ 계열의 two-equations 모델은 과도한 소산에

의해 와의 분출 주기 및 후류에서 와들이 소멸되어 실험에서 보여주는 와의 구조를 재현하지 못한다는 것을 보고하였다.

본 연구는 $Re = 22,000$ 에서 사각 실린더의 후류 영역에 초점을 맞추어 회전류의 유출을 발생과 소멸에 중점을 두고 후류 구조 및 특성 변화를 고찰하였다.

2. 수치해석방법

일정 물성치의 비압축성 유동에 대한 지배방정식으로, 아래의 격자 필터링이 되어진 운동량 보존 방정식 및 연속 방정식이 본 계산에서 사용되어졌다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

여기서 \bar{u}_i 는 격자 필터링으로 얻어진 대형 스케일의 유동을 나타낸다. 식 (2)에서 τ_{ij} 는 subgrid 스케일 유동이 대형 스케일 (resolved scale) 유동에 미치는 영향을 나타내며, 다음과 같이 표현되어진다.

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \tag{3}$$

여기서 subgrid stress scale tensor τ_{ij} 는 Germano et al. (1991)이 제안한 dynamic model을 사용하여 구한다. Dynamic Smagorinsky coefficient (Cs)을 얻기 위한 상세한 수식적 유도 과정은 및 Yoon et al. (2003) 및 Germano et al. (1991) 등의 많은 문헌을 참고할 수가 있다. Dynamic Smagorinsky coefficient Cs는 시간과 공간의 함수로 표현되어진다. Cs가 음의 값을 가질 경우는 작은 스케일에서 큰 스케일로 에너지가 전달되는 backscatter 현상으로 이해된다. 하지만, 이 음의 값은 심각한 수치적 어려움을 가져온다. 즉, 식 (2)의 우변항에 에너지 증가, 즉 entropy 증가로 인해 수치적으로 무한대로 발산하게 된다. 이는 현재까지 해결되지 않고 있는 LES의 단점이다.

Table 1 Dimensions of the calculation domain

x_1 / D	x_2 / D	y_1 / D	z_1 / D
4.5	15.0	14.0	4.0

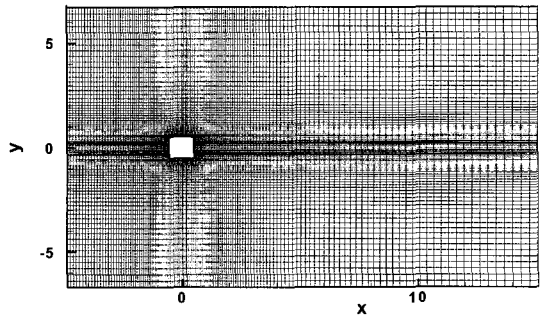
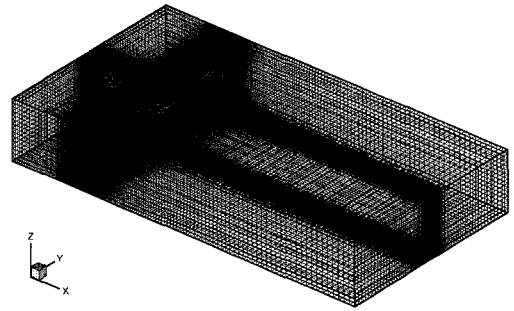


Fig. 2 Grid systems: (a) 3-D view, (b) x-y plane

따라서, 이 문제를 피하기 위해서 균질한 (homogeneous) 공간적인 방향에 대해서, 또는 짧은 시간동안 평균 조작등의 방법을 사용한다. 본 연구에서는 간단한 방법으로 계산 영역 전체 (volume)에 대해 평균화 방법을 거쳐 Cs 값을 얻었다. 따라서 본 연구에서 Cs 값은 단지 시간의 함수이다.

본 연구에서는 지배방정식은 보존형 유한체적법 (conservative finite volume formulation)으로 이산화된다. 시간차분에 대해서 time-splitting, 공간차분은 2 차 중앙 차분법을 적용하였다. 점성항에 대해서 Crank-Nicolson 방법, 비선형항에 대해서 2 차 Adams-Bathforth 방법을 사용하였다.

본 연구에 고려된 형상과 그에 상응하는 변수는

Fig. 1 과 Table 1 에 나타내었다.

경계조건들로는, 균일 입구조건, $u=1$, $v=w=0$, 측면에는 대칭조건을 부여하였다. 특히, 출구조건에 대해서 $\partial u/\partial t + C\partial u/\partial x = 0$ 의 convective 조건을 사용하였고, 여기서 convective velocity 인 C 는 출구평균속도를 사용하였다.

본 연구의 내부 격자 생성에는 대수적 방법을 사용하였고, 각 방향($x*y*z$)으로 $170*101*17$ 개의 격자를 생성하여, 따라서, 총 291,890 개의 격자를 사용하여 Fig. 2 의 격자계를 구성하였다. 본 연구에서 사용된 격자계는 Rodi et al. (1997)의 연구 결과를 기반으로 결정하였다. 이들은, 본 연구와 같은 유동, 형상 및 계산 영역 조건들에서 특히 z -방향으로 11 개에서 32 개 사이의 격자들을 사용하여 결과의 의존성에 대한 연구를 수행하여 최대 0.2%의 오차를 얻었다. 따라서, 본 연구에서 이들이 사용한 중간 격자수에 해당하는 17 개를 z -방향에 사용하였다. 본 연구에의 결과들은 이후 보여주는 실험값들과 비교해서 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간 평균 유동장

Fig. 3(a)는 후류 영역내의 (6.02, 0, 2) 지점에서 u 의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. 다른 지점에서 속도 값들의 시간에 따른 변화를 측정해도 그 값의 크기는 차이가 있으나 주기에는 변화가 없었다. 이 속도 값을 주파수 영역으로 바꿔 Strouhal number를 구하여 보면 Fig. 3(b)와 같이 $St = fD/U = 0.136$ 으로 계산되며 이 값은 Lyn et al. (1995)의 실험에서 측정한 $St = 0.132 \pm 0.0004$ 와 잘 일치하고 있다.

Fig. 4는 시간 평균된 속도장과 이에 따른 속도장의 유선을 보여준다. 시간 평균을 위해 충분히 발달한 속도장을 초기조건으로 사용하여 무차원 시간으로 총 347초의 시간 동안 평균된 결과이다. 유선의 분포는 상하부가 대칭되어 있으며 실린더의 뒷면 상하부로 주 와류가 발생되어 있고 실린더 아래와 윗면에는 작은 부 와류가 발생되어 있다.

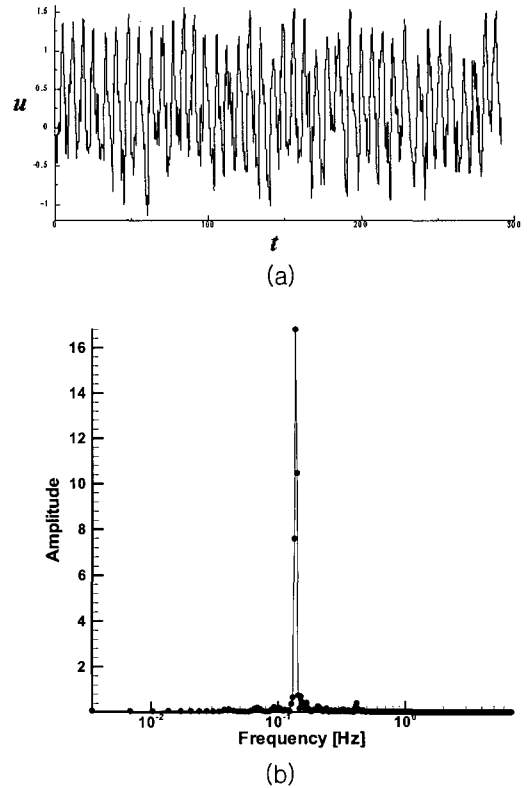


Fig. 3 (a) Time histories and (b) corresponding frequency of u at the location of (6.02, 0, 2); —, present result; •, Lyn et al. (1995)

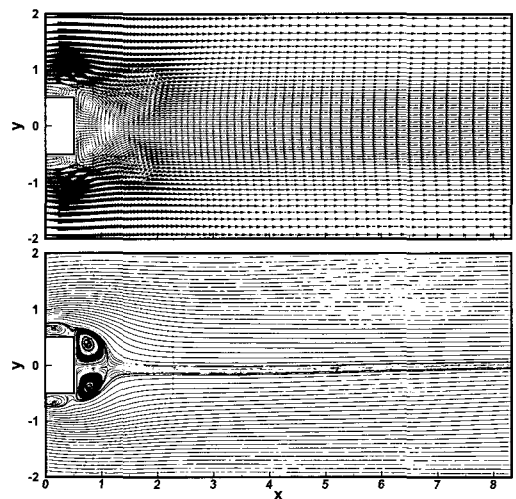


Fig. 4 Time-averaged flow fields

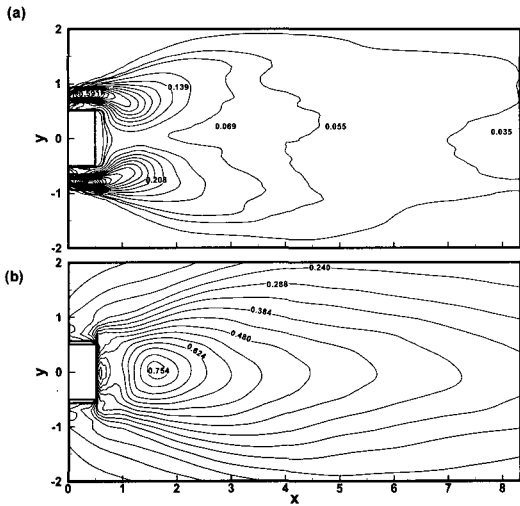


Fig. 5 Contours for (a) mean streamwise Reynolds normal stress $\overline{u'^2}$ and (b) vertical Reynolds normal stress $\overline{v'^2}$

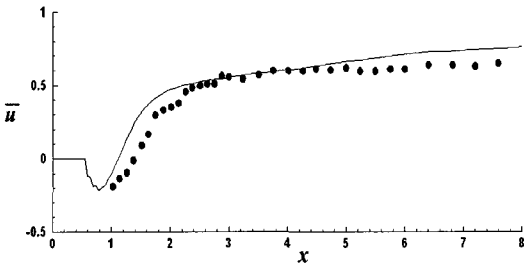


Fig. 6 Comparison of time-averaged streamwise velocities for streamwise variation: —, present result; •, Lyn et al. (1995)

Fig. 5 는 유동방향과 수직방향의 레이놀즈 응력을 나타낸다. 유동 방향의 레이놀즈 응력은 중앙을 중심으로 상하 대칭적인 값을 보이며 유동의 급격한 구배에 의해서 실린더의 상하면에서 가장 큰 값을 보이며 x 값이 중심에서 멀어질수록 점차 작은 값을 갖는다. 이것은 순간 유동장에서 급격한 구배는 평균이 되어 안정적인 값으로 나타남을 알 수 있다. 중앙의 재순환영역을 중심으로 수직 레이놀즈 응력은 가장 큰 값을 갖고 타원형의 형태로 값이 감소됨을 알 수 있다. 아울러 실린더의 바로 뒷면에서는 Fig. 4 에서 나타났듯이 유동의 와류생성

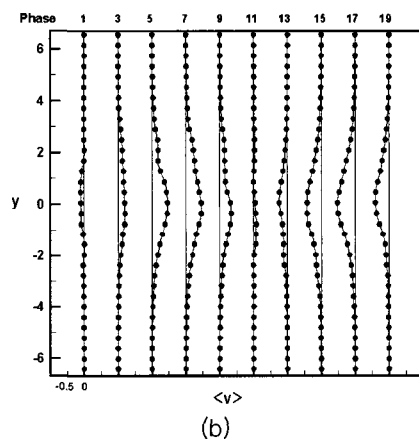
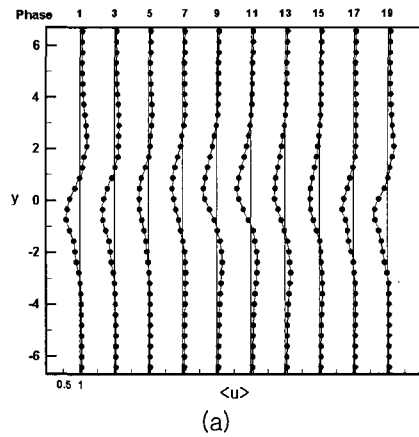


Fig. 7 Distribution of the phase-averaged velocity (a) $\langle u \rangle$ and (b) $\langle v \rangle$ across the flow cross section at $x = 4.0$; —, present result; •, Lyn et al. (1995)

에 의해서 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 6 은 y 방향 중앙선에서 유동방향 (x)으로 변화되는 시간평균된 \overline{u} 의 값을 보여준다. 여기서 기호로 표시된 값은 Lyn et al. (1995)의 실험값이고 실선은 수치 해석된 결과로서 실린더의 재순환 영역의 값과 후류 영역에서의 값이 일치함을 볼 수 있다. x 축이 8 이 넘는 영역은 실험의 측정 지점의 제한으로 직접 비교는 할 수 없지만 유동이 변화하는 구배를 고려해 보면 실린더에서 멀리 떨어진 후류 영역도 잘 묘사됨을 알 수 있다.

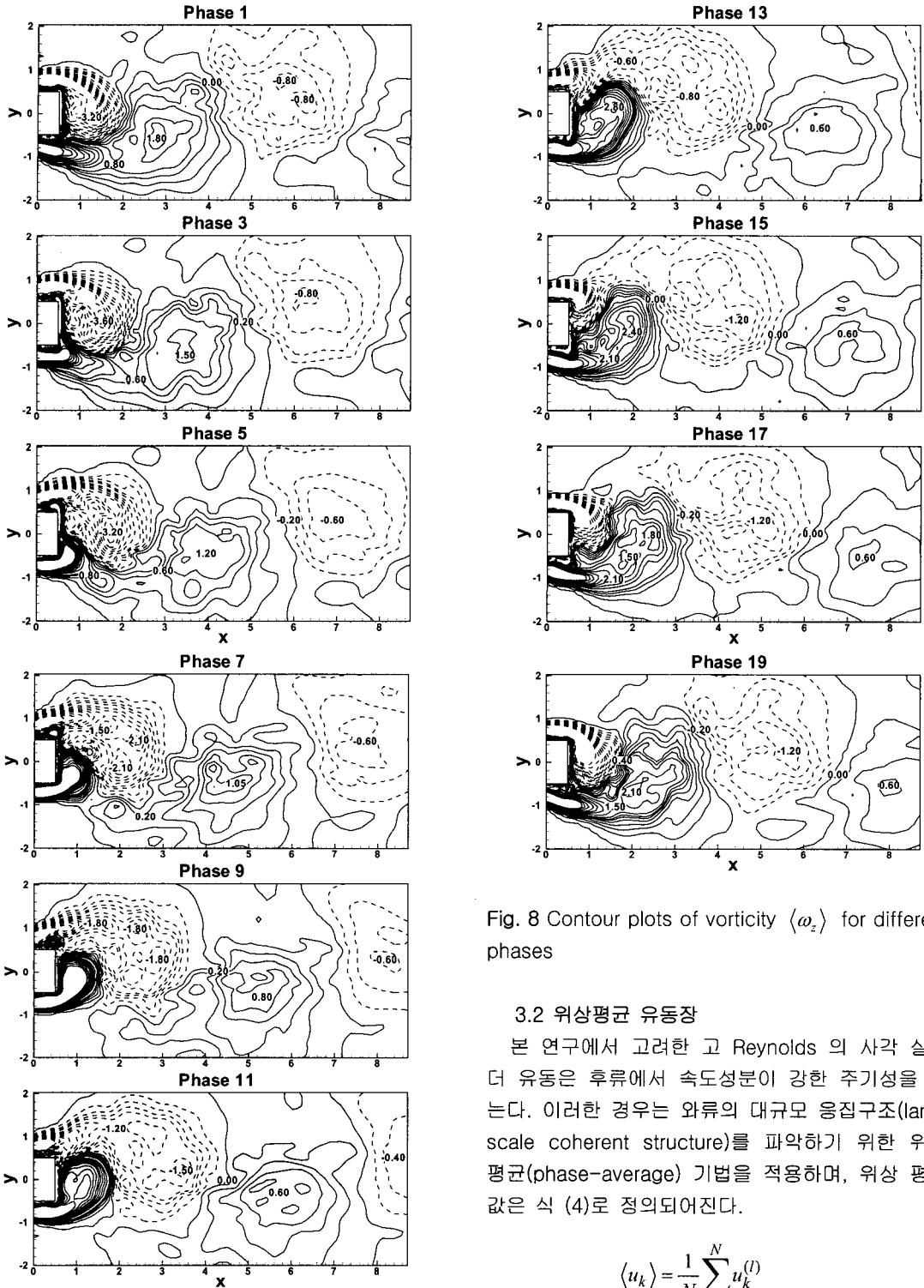


Fig. 8 Contour plots of vorticity $\langle \omega_z \rangle$ for different phases

3.2 위상평균 유동장

본 연구에서 고려한 고 Reynolds 의 사각 실린더 유동은 후류에서 속도성분이 강한 주기성을 갖는다. 이러한 경우는 와류의 대규모 응집구조(large scale coherent structure)를 파악하기 위한 위상평균(phase-average) 기법을 적용하며, 위상 평균값은 식 (4)로 정의되어진다.

$$\langle u_k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_k^{(l)} \quad (4)$$

단, $\langle \rangle$ 부호는 위상평균, $u_k^{(l)}$ 는 l 번째 순간속도장의 k 성분 속도벡터, N 은 한 위상에서 총 순간속도장의 수이다. 이러한 방법으로 구한 위상평균 정보는 응집구조의 시간과 공간상의 정보를 담고 있기 때문에 단순한 시간평균 해석보다 유동장의 특성을 보다 더 정량적이고 구조적인 방법으로 파악할 수 있다. Strouhal number, $St = 0.136$ 에 해당하는 무차원 시간 7.3 의 주기를 20 개(l)로 나누어 위상 평균을 하였다. 이때 평균에 사용한 위상의 수 N 은 40 개이다.

Fig. 7 은 위상평균에 의해 얻어진 위상평균속도 $\langle u \rangle, \langle v \rangle$ 분포를 각각의 위상에 대하여 나타낸 것이다. 계산되어진 데이터는 재순환영역의 영향을 받지 않는 $x = 4.0$ 지점에서 y 축으로 변화되어가는 값으로 $y = 0.0$ 을 중심으로 상하의 값이 위상의 변화에 따라 후류 중심선이 $+y$ 방향으로 편향되었다. 다시 $-y$ 방향으로 편향된다. 그리고 그 분포형태가 위상의 11 을 기준으로 $\pm y$ 방향으로 교대로 일어나는데 이는 와류출의 주기성에 기인한다. 하지만 이러한 와류출의 주기가 총 20 임을 고려해 보면 주기 10 을 기준으로 아주 정확한 일치해 보이지 않는데 이러한 결과는 위상평균의 회수가 무한히 많다고 가정하면 정확한 일치를 보일 것이라고 생각된다. 여기서 와류출의 속도를 측정하여 보면 와(vortex)는 x 방향으로 u_c (와류출 속도 또는 대류 속도) = 0.756 의 크기로 유동장내에 흘러 나감을 알 수 있다. $\langle v \rangle$ 의 결과는 $\langle u \rangle$ 의 결과와 같이 $\pm y$ 방향으로 교대로 일어난다. 이러한 $\langle v \rangle$ 의 결과는 $\langle u \rangle$ 의 결과보다 상하부로 교대로 방출되어 나타나는 와류출의 형태를 잘 보여준다.

각 위상에서의 와 구조를 z -방향의 와도 $\langle \omega_z \rangle$ 를 사용하여 Fig. 8 에 나타내었다. 각각의 위상에서는 centre 와 saddle 이 발달하고 유동방향으로 퍼져나가는 형상을 볼 수 있다. 여기서, centre 는 와의 중심을 saddle 은 등와선의 경계에서 변곡점을 의미한다. 실린더부근의 급격한 와도의 변화를 보이는 실린더부근을 제외한 영역에서는 와의 중심부분의 가장 큰 값들이 실린더의 상하를 대칭으로 양과 음의 값으로 발달하여 있으며 이러한 값들은 와류출이 되어 감에 따라 점차 작은 값으로 감소되어간다. 와의 saddle 은 거의 영에 가까운 값을 보이

며 실린더 후류의 급격한 와 발생이후 점차 후류로 그의 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 와의 centre 와 saddle 은 실린더 주변의 높은 값에 영향으로 후류로 발달하면서 주기성을 갖고 그 값이 한 곳에 집중되어 있는 후 확산되어 퍼져가는 양상을 띤다. 하지만 이런 분포는 사각 실린더 후류의 칼만 와열에서 보았듯이 y 방향으로 ± 0.5 를 넘지않는 범위에서 발달되어 감을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사각 실린더 주위의 난류 유동장의 특성을 연구하기 위하여 대형 와 모사법(LES)을 이용하였다. 본 계산 결과들은 전반적으로 실험값들과 매우 잘 일치하였지만 실린더와 근접한 후류 영역은 약간의 불일치를 보였다. 이는 작은 스케일의 와들이 지배적인 영역에서 본 계산에서 사용된 격자의 수들이 충분한 해상도를 주지 못하는 것으로 판단된다.

위상평균을 위해 유동장의 Strouhal 수를 기반으로 총 40 개의 주기를 이용하여 위상평균을 하였다. 이를 통해, 난류의 유동에 지배적인 영향을 주는 거대 와 성분(coherent component)의 해석에서 실린더 후류의 칼만 와열은 y 방향으로 ± 0.5 을 넘지 않는 범위에서 중심을 갖으며 평균 와의 거리는 대략 2.9 로 일정한 상태로 후류로 영향을 전파시켜나가는 것을 볼 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Bearman, P.W. and Obasaju, E.D., 1982, "An Experimental Study of Pressure Fluctuations on Fixed and Oscillating Square-Section Cylinder," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 119, pp. 297-321.
- Bosch, G. and W. Rodi, W., 1998, "Simulation

- of Vortex Shedding Past a Square Cylinder with Different Turbulence Models," *Int. J. Numer. Mech. Fluids*, pp. 601-616.
- Budny, R.S. and Karwall, J.G., 1979, "Vortex Street Evolution in the Wake of a Circular Cylinder," *Proc. 2nd Symp. On Turbulent Shear Flows*, pp. 720-725.
 - Cantwell, T., 1983, "An Experimental Study of Entrainment and Transport in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp. 321-374.
 - Cimlala, J.M. and Ngib, H.M., 1988, "Large Structure in the Far Wakes of Two Dimensional Bluff Bodies," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 190, pp. 265-298.
 - Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W.H., 1991, "A Dynamic Subgrid-scale Eddy Viscosity Model," *Phys. Fluids A* 3, 1760.
 - Hussain, A.K.M.F. and Zaman, K.B.M.Q., 1980, "Vortex Paring in a Karman Vortex Street," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 101, pp. 493-544.
 - Lee, B.E., 1975, "The Effect of Turbulence on the Surface Pressure Field of a Square Prism," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 69, pp. 263-282.
 - Lyn, D.A., Einav, S., Rodi, W. and Park, J.H., 1995, "A Laser-Doppler Velocity Study of Ensemble-Averaged Characteristics of the Turbulent near Wake of a Square Cylinder," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 304, pp. 285-319.
 - Rodi, W., Ferziger, J.H., Breuer, M. and Pourquie, M., 1997, "Status of Large Eddy Simulation: Results of a Workshop," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 119, pp. 248-262.
 - Yoon, H.S., Balachandar, S., Ha, M.Y. and Kar, K., 2003, "Large Eddy Simulation of Flow in a Stirred Tank," *ASME J. of Fluids Engineering*, Vol. 125, pp. 486-499.



< 윤 현 식 >



< 전 호 환 >



< 정 광 호 >