원형단면 실린더를 지나는 유동에 대한 자유류 난류강도의 영향

황종연*·양경수† ·이승수**·이준식***·이상산****
(2004년 3월 11일 접수, 2004년 5월 28일 심사완료)

Effects of Freestream Turbulence Intensity on the Flow Past a Circular Cylinder

Jong-Yeon Hwang, Kyung-Soo Yang, Sungsu Lee, Joon Sik Lee and Sangsan Lee

Key Words: Freestream Turbulence(자유류 난류), Isotropic Turbulence(등방성 난류), Turbulence Intensity(난류강도), Immersed Boundary Method(가상경계방법)

Abstract

In this study, the effects of freestream turbulence intensity on laminar-turbulent transition of separated shear layers in the wake of a circular cylinder are investigated using an immersed boundary method and LES. It is shown that the present numerical results without freestream turbulence for *Re*=3,900 based on bulk mean velocity and the cylinder diameter are in good agreement with other authors' experimental observations and numerical results, verifying our numerical methodology. Then a 'prescribed power spectrum' method is imposed to generate isotropic turbulence at the inlet of the computational domain at each time step. The principal effects of freestream turbulence intensity on flow statistics are investigated for *Re*=3,900. Statistical study reveals that the Reynolds stresses in the near-wake region gradually increase, and transition occurs further upstream, as the turbulence intensity increases. On the other hand, the bubble size behind the cylinder decreases as the turbulence intensity increases, which indicates that the freestream turbulence helps mean velocity be quickly recovered.

1. 서 론

원형단면 실린더 주위의 유동은 후류에서 주기적인 Karman 와흘림이 형성되고 실린더 주위에서는 벽전단층과 자유전단층의 유동특성들이 혼재되어 있어서 학문적으로 뿐만 아니라 공학적인 응용 측면으로도 매우 중요하게 연구되어왔다. 특히 입구평균속도와 실린더 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수(*Re*)의 아임계(subcritical) 영역, $300 \leq Re \leq 2\times10^5$ 에서는 실린더의 전체 표면에서 층류유동이 형성되지만 박리된 자유전단층에서는 난류로의 천이가 일어나는 유동특성 때문에 난류발생 메카니즘 규명을 위한 연구로서도 매우 중요하게 인식되어왔다. Bloor[1]는 열선(hot-wire) 풍속계를 이용한 실험으로 $Re \geq 1{,}200$에서 규칙적인 싸인파가 실린더 후류 부근에서 발견된다고 보고하였다. Matsumura & Antonia[2]는 *Re*=5,830일 때 실린더 후류 (실린더 지름의 10 ~ 40 부근)에서의 유동과 열전달 특성에 대해 실험을 수행하였다.

한편 receptivity란 자유류 난류와 같은 외부적으로 가해진 교란이 전단층으로 들어와 불안정한 파동을 일으키는 과정을 말하며, 이는 유동불안정성 및 천이과정의 연구에 중요한 부분을 차지하고 있다. 지금까지의 receptivity에 관한 연구는 대부분 단순한 형태의 자유류 교란에 의한 경계

* 회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학부
E-mail : ksyang@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7322 FAX : (032)863-3997
** 회원, 충북대학교 구조시스템공학과
*** 회원, 서울대학교 기계항공공학부
****회원, KISTI 수퍼컴퓨팅 센터

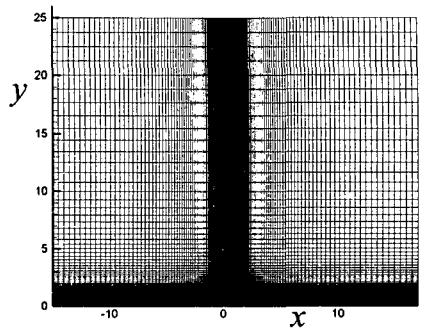
층의 반응에 국한되어 왔지만, 경계층 및 경계층의 박리에 의한 박리전단층의 receptivity를 동시에 다룬 연구는 저자가 아는 한 전무한 실정이다. 본 연구에서는 원형단면 실린더 주위의 경계층 및 경계층의 박리에 의한 박리전단층에 대하여 자유류 난류강도의 변화에 따른 영향을 대와동모사(Large Eddy Simulation, LES)기법을 사용하여 고찰하였다. 이는 항공기 날개 선단 주위의 유동이나 터빈 블레이드 선단 주위의 유동을 간략화 한 모델유동으로 간주될 수 있다. 이와 같은 뭉툭한 물체주위의 유동에서는 후류(wake)의 유동상태에 따라 물체 뒷면에서의 압력이 결정되고 이는 곧 물체가 받는 저항(drag)이 결정됨을 의미한다. 따라서 경계층 및 경계층의 박리에 의해 형성되는 박리전단층의 천이과정을 정확히 이해하는 것이 매우 중요하며, 특히 이에 큰 영향을 주는 것으로 알려진 자유류 난류에 관한 심도있는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 자유류 난류를 입구 경계조건으로 손쉽게 구현하기 위하여 최근 각광받고 있는 가상경계방법(immersed boundary method, IBM)을 이용한 직교좌표계의 LES 코드를 작성하여 사용하였다. 완성된 코드의 검증을 위하여 Re=3,900에 대해서 LES를 수행하여 기존의 실험 및 계산결과와 비교하였다. 또한 '현실적'인 난류유동을 '경제적'으로 생성하여 유동장 입구에서의 경계조건으로 사용하기 위하여 'Prescribed power spectrum'을 사용하여 입구유동의 난류를 구현하는 방식을 채택하였다.

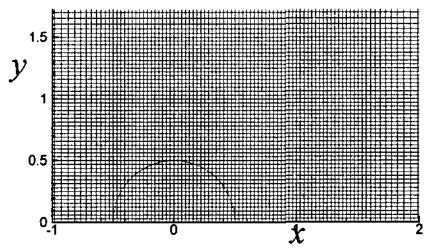
2. 연구방법

2.1 지배방정식과 수치해석법

본 연구에서 도입한 가상경계방법의 개념은 유동장내에 존재하는 물체의 표면에서의 점착 조건을 운동량 방정식의 생성항으로 forcing 하는 방법이다. 이는 지배방정식에 forcing을 가하여 유동장내의 물체를 구현하는 방법을 개발한 Peskin[3]에 의해 시작되었다. 이를 모멘텀 forcing 이라고 부른다. 그러나 직교좌표계에서 생성되는 격자와 고체면은 반드시 일치하지는 않으므로 고체면을 forcing 할 때 내삽이 불가피하다. 즉 고체면에서의 점착 조건과 그 주위의 속도를 내삽하여 고체내부에 새로운 모멘텀이 첨가되는 것이다. 가상



(a) Total view



(b) Magnified view

Fig. 1 Computational domain and grid system

경계법을 이용하면 유동장 내의 고체를 마치 유체처럼 해석하게 된다. 최근 Kim 등[4]은 mass source라는 개념을 도입한 가상경계법을 개발하였다. 질량 source는 모멘텀 forcing이 주어지는 지점에서 질량보존을 만족하여 물리적으로 비현실적인 현상을 해소시켜줌과 동시에 수치적 정확도를 높여 주게된다. 가상경계법에 대한자세한 개념과 설명은 Kim 등의 논문[4]을 참조하기 바란다.

가상경계법이 적용되는 비압축성 3차원 연속방정식(Continuity Equation)과 Navier-Stokes 방정식은 아래의 식 (1)과 식 (2)와 같으며 이는 LES를 위해서 여과(filtering) 과정을 거친 것이다.

$$\frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_j} - \overline{q} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i}\,\overline{u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} + \overline{f_i} \tag{2}$$

여기서 x_i는 직교좌표계를 u_i는 각각의 속도성분을 나타내며, P는 압력과, 교차항과 아격자 스케일 레이놀즈응력의 수축의 합, q는 질량 source를 f_i는 모멘텀 forcing을 각각 나타낸다. 모든 변수들은 실린더 직경(d)과 입구속도(U_∞)와 밀도(ρ)로 무차원화 되었다. 여과과정에서 생성된 응력항 $\tau_{i,j}$를 해결하기 위하여 동아격자모델(dynamic subgrid-scale model, DSGSM)을 사용하였다.[5] Re는 레이놀즈 수로 d와 U_∞를 기준으로 정의되었다. 위의 지배방정식들은 유한체적법을 이용하여 차분되었다. 공간에서의 차분은 2차의 정확도를 가지며, 시간에서의 적분은 혼합적인 형태로서 대류항은 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법으로 명시적 적분하였고, 점성항들은 Crank-Nicolson 방법으로 묵시적으로 적분이 수행되었다. 연속방정식과 모멘텀 방정식을 분리하기 위해서는 Fractional Step 기법이 사용되었으며 사용된 수치해석 알고리즘과 DSGSM에 대한 자세한 사항은 Yang and Ferziger[5]의 논문을 참조하기 바란다.

2.2 경계조건 및 유동 파라메터

실린더 표면에서는 점착 조건을 사용하였고 계산영역의 위아래 경계면에서는 다음과 같은 미끄럼 조건을 사용하였다.

$$v=0,\quad \frac{\partial u}{\partial y}=\frac{\partial w}{\partial y}=0 \tag{3}$$

여기서 u, v, w는 주유동방향(x), 수직방향(y) 및 횡방향(z)의 속도성분을 각각 의미한다. 출구면에서는 대류조건을 사용하였으며 입구면에서는 균일한 속도(U_∞)가 주어졌고 횡방향으로는 주기조건이 사용되었다. 비교되는 물리량들로는 실린더 표면에서의 평균 항력계수(C_D), Strauhal수(St), 박리각(θ_s), 후류에서의 버블길이(B_s), 후류 여러 지점에서의 평균속도, 레이놀즈 전단응력들로 설정하였다. 계산영역의 크기는 실린더를 중심으로 입구의 x 좌표를 -15 d, 출구의 x 좌표를 17 d로 설정하였으며 위아래 경계의 y좌표는 ±25 d로 결정하였다. 한편 횡방향 영역의 크기는 Kravchenko 등[6]의 연구를 토대로 $\pi d/2$로 설정하였다. 사용된 격자수는 실험 및 다른 계산결과와의 엄밀한 비교를 통하여 결정하였으며 x방향, y방향, z방향으로 각각 192, 192, 32개를 사용하였다. Fig. 1(a)는 본 연구에 사용된 격자계와 계산 영역을 보여주고 있으며 격자계가 실린더를 중심으로 상하대칭이므로 실린더 윗부분만 나타내었다. Fig. 1(b)는 실린더 근처에서 확대한 것이다.

완전한 수렴해와 통계처리를 위한 시간 전진은 약 25번의 와흘림 동안 진행되었고 계산 시간은 KISTI의 SMP 수퍼 컴퓨터로 약 250시간이 소요되었다. 계산절차는 우선적으로 2D 계산을 수행한 후 와흘림이 진행 되었을 때 그 유동장을 횡방향으로 확장하여 초기유동장으로 사용하였다. 그리고 횡방향의 불안정성이 발달하는데 소요되는 과정을 by-pass 하기 위해 random noise를 전체 초기 유동장에 가하여 3D 계산을 수행하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 코드의 검증

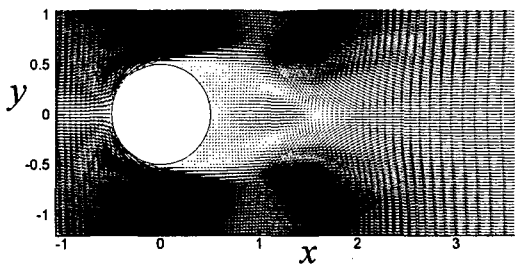
Table 1은 여러 가지 실험[7-11]및 다른 수치해석 결과[12,13]와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 본 연구에서 사용된 격자수가 Choi et al.[13]의 LES에서 사용된 격자수의 약 20%정도에 불과한 점을 감안할 때 비교적 잘 일치하고 있다. Table 2는 앞으로 제시될 그림들에 표시된 실험결과 및 계산결과들의 목록을 나타낸다. Fig. 2는 시간 및 횡방향으로 평균된 유동장을 보여준다. C_L기준으로 약 20주기동안에 해당하는 샘플링 개수를 사용하였다. 앞으로 제시되는 모든 결과들은 이러한 방법으로 통계처리한 것이며 유동 변수 위

Table 1 Wall statistics

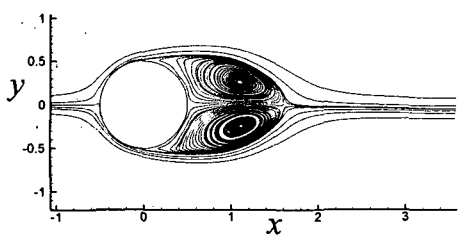
	Present	LES [13]	LES [12]	Experiments
C_D	1.07	1.05	1.0	-0.98±0.05 [9]
St	0.214	0.211	0.207	0.215±0.005 [11]
θ_s	84°	87°	85.8°	85°±2° [10]
B_s	1.12	1.19	1.36	1.33±0.3, [11] 1.17,[8] 1.04 [7]

Table 2 List of other simulations and experiments

Numerical simulations		Experiments	
———	current simulation	●	PIV data, Kim *et al.* [7]
-·-·-·-·-	Choi *et al.* [13]	■	Lourenco *et al.* [8]
.....	Kravchenko *et al.* [14]		
- - - - -	Beaudan *et al.* [12]		



(a) Velocity vector plot



(b) Streamlines

Fig. 2 Averaged velocity field

에 "-" 기호로표시 하였다. 실린더 후반에서 발생하는 박리 및 재순환 영역을 뚜렷이 볼 수 있으며 기존의 다른 결과[12]와 매우 흡사하다. Fig. 3은 실린더 뒤의 중앙선을 따라서 주유동방향의 속도분포를 다른 결과들과 비교해서 나타낸 것이다. PIV를 이용한 실험[7]과 고해상도로 계산을 수행한 LES 결과[13]의 중간 정도로 비교적 잘 맞고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4(a)와 4(b)는 후류의 x=1.54지점에서 중앙선에 대해 수직 방향에 따른 주유동방향의 속도($\overline{u}$)와 수직방향의 속도($\overline{v}$) 분포를 각각 나타낸

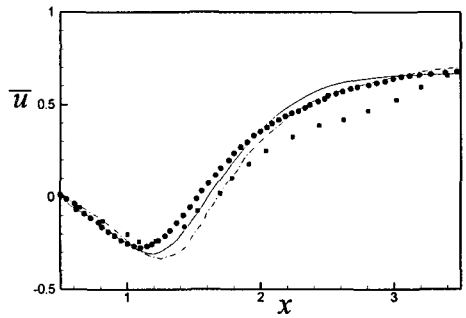


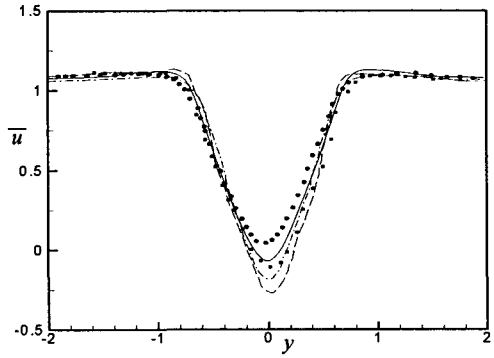
Fig. 3 Averaged streamwise velocity along the centerline

다. 이 지점은 실린더 후류에서 버블을 형성하는 재순환 영역의 안쪽에 해당한다. 대체적으로 다른 결과들과 잘 일치하고 있다. 특히 $\overline{u}$의 최소값이 PIV 결과[7]보다 더 작고 LES 결과[13]보다 더 큰 이유는 Table 1에 제시한 각각의 버블길이의 차이에 기인한다.

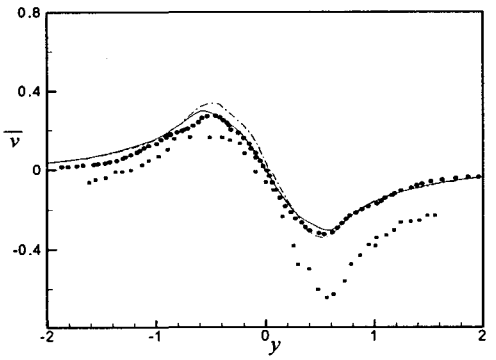
Fig. 5(a), (b), (c)는 x=1.54 지점에서 중앙선에 대해 수직 방향에 따른 주유동방향의 레이놀즈 응력($\overline{u'u'}$), 수직방향의 레이놀즈 응력($\overline{v'v'}$), 레이놀즈 전단응력($\overline{u'v'}$)을 각각 보여준다. 완전한 좌우대칭이 아닌 것은 샘플링 개수가 충분하지 못했음을 의미하지만 다른 실험결과나 LES 결과와 대체적으로 잘 일치하고 있다.

3.2 등방성 난류의 생성과 적용

본 연구의 최종 목표는 자유류의 난류강도에 따른 실린더주위 유동의 천이과정의 변화를 규명하는 것이다. 따라서 현실적으로 타당성 있는 자유



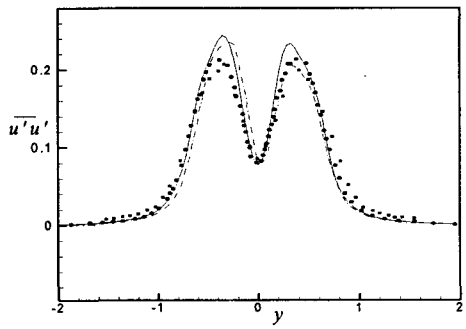
(a) Streamwise velocity



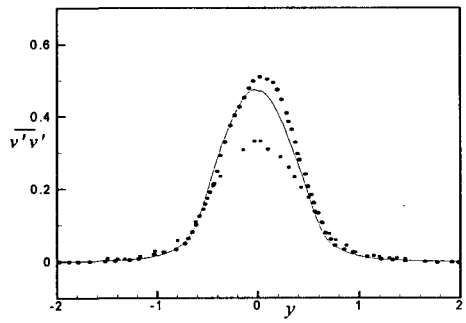
(b) Vertical velocity

Fig. 4 Averaged velocity profiles in the near wake region, x=1.54

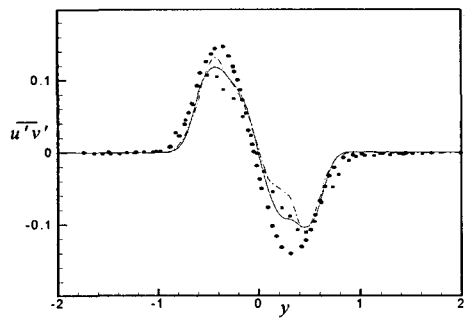
유류의 난류를 구현하는 것이 무엇보다도 중요하다. 유동방향으로 주기조건을 사용하는 temporal 수치모사의 경우 별도의 인위적인 절차를 사용하지 않더라도 유동장내의 난류가 자체적으로 생성되어 유지될 수 있다. 하지만 복잡한 형상의 경우에는 대부분 spatial 수치모사를 수행하여야 하고 따라서 이 경우에는 유동장 입구에서 상당히 '현실적'인 난류유동을 경계조건으로 주어야 한다. 본 연구에서는 'Prescribed power spectrum'을 사용하여 입구에서의 난류유동을 구현하는 방식을 채택하였다. 그 중에서도 Lee[15]의 방법을 사용하였다. 본 연구에서 작성된 코드는 직교좌표계를 사용하였기 때문에 입구면이 평면 형태이므로 생성된 자유류 난류를 적용하기가 매우 수월한 장점이 있다. 매 시간단계마다 위에서 제시된 방법으로 구현된 등방성 난류를 본 연구의 격자 시스템에 맞게 변환하여 입구면에서의 경계조건으로 적용하였다. Fig. 6은 실린더 상류의 중앙선



(a) Streamwise Reynolds normal stress



(b) Vertical Reynolds normal stress



(c) Reynolds shear stress

Fig. 5 Reynolds stress profiles in the near wake region, x=1.54

을 따른 몇몇 점에서 다음과 같이 정의된 무차원화된 난류 강도(Tu)를 나타낸 것이다.

$$Tu=\sqrt{\frac{\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}}{3}} \tag{4}$$

여기서 윗첨자(')는 각 속도의 변동량을 의미하고 윗선(-) 표시는 평균을 의미하며 이를 위해 각 지점에서 약 120,000개의 샘플링 개수를 사용하였다. 그림에서 보듯이 입구에서 하류로 이동할 수

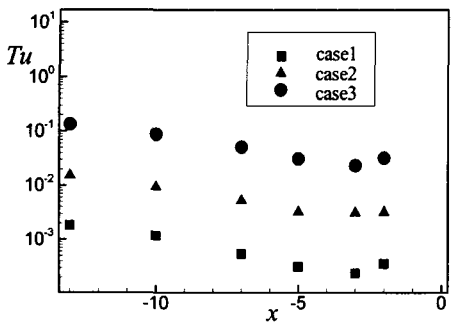


Fig. 6 Turbulence intensity along upstream centerline of the cylinder

록 난류강도가 현저히 작아짐을 확인할 수 있다. 이는 생성된 자유류 난류로의 에너지 공급이 없기 때문에 난류가 소멸되고 있기 때문이다. 실린더 근방에서 다시 난류강도가 커지는 이유는 실린더의 존재로 인하여 에너지가 공급되기 때문이라고 판단된다. 본 연구에서는 자유류 난류강도의 효과에 대하여 살펴보기 위하여 Fig. 6에서 제시된 세 경우에 대하여 연구가 수행되었다.

3.3 난류강도에 따른 영향

본 연구에서는 Re=3,900에서 자유류 난류 강도에 따른 실린더 주위에서의 유동변화를 관찰하고자 위에서 제시된 세 경우(각각 case1, case2, case3)와 난류강도가 없는 경우(case0)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 각 case의 난류강도의 크기는 x에 따라 다르므로(Fig. 6), 예를 들어 x=-5.0인 지점에서 측정한 난류강도의 크기를 비교했을 경우 case1은 U_∞의 약 0.03%, case2는 약 0.3%, case3는 약 3%이다. Fig. 7은 실린더 뒤의 중앙선을 따라서 주유동방향의 평균속도($\overline{u}$)분포를 네 경우와 비교해서 나타낸 것이다. 난류강도가 증가할수록 $\overline{u}$이 0이 되는 지점이 점점 상류에 위치하게 된다. 즉 난류강도가 증가할수록 버블의 길이가 감소하고 있음을 확인할 수 있다. case2와 case3의 값은 큰 차이가 없으므로 난류강도가 어느 정도 이상 증가하게 되면 더 이상 버블의 길이에 대한 변화는 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 이는 앞절에서 Kim[7]등이 수행한 PIV 실험에서 버블의 길이가 다소 작게 나타난 이유를 설명

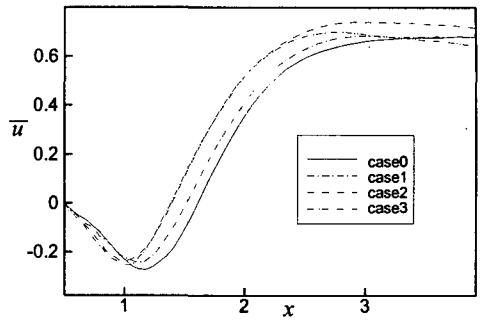


Fig. 7 Averaged streamwise velocity along the centerline

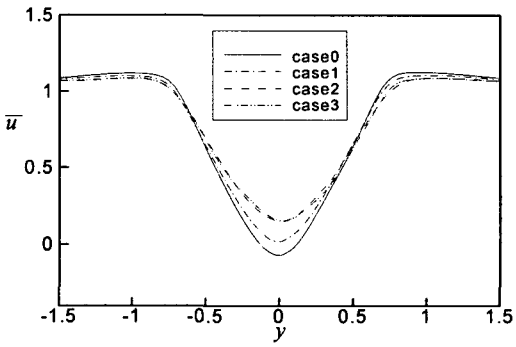


Fig. 8 Averaged streamwise velocity profiles in the near-wake region, x=1.54

하는데 도움을 주고 있다. 즉 실린더 상류에서 생성된 난류 강도는 실린더 후류에서 발생하는 와흘림과 전단 불안정성에 영향을 주고 이에 따라 모멘텀이 활발하게 되어 버블의 길이를 감소시킨 것으로 판단된다. 또한 난류강도가 증가함에 따라 박리점 이후 재순환류들은 상류로 이동한다는 결과[16]도 이와 밀접한 관련이 있다. 반면에 본 연구의 결과 난류강도는 항력의 변화와 박리각에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 즉 난류강도가 증가하여도 실린더 표면에서 형성되는 압력 분포에는 큰 영향을 미치지 않기 때문이다. Fig. 8은 후류의 x=1.54 지점에서 중앙선에 대해 수직 방향에 따른 주유동방향의 평균속도를 나타낸다. 난류강도가 증가함에 따라 최소값이 증가하고 있음이 확인되며 이는 Fig. 7에서 제시된 버블의 길이 감소와 밀접한 관련이 있다. Fig. 9는 주유동방향 레이놀즈 응력의 등고선을 보여준다. 2차원 등고선으로 확인한 결과 난

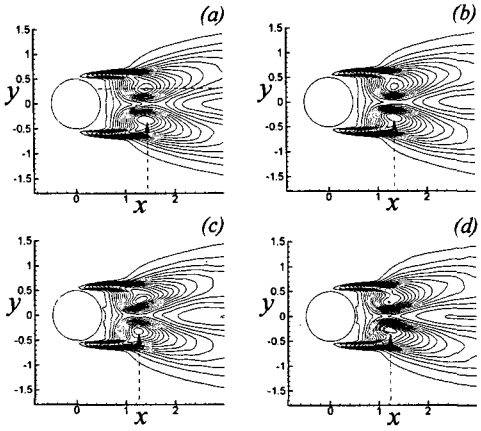


Fig. 9 Contours for streamwise Reynolds normal stress ($\overline{u'^2}$); increment 0.015. The maximum locations are indicated by ⋯→. (a) case0, (b) case1, (c) case3, (d) case4

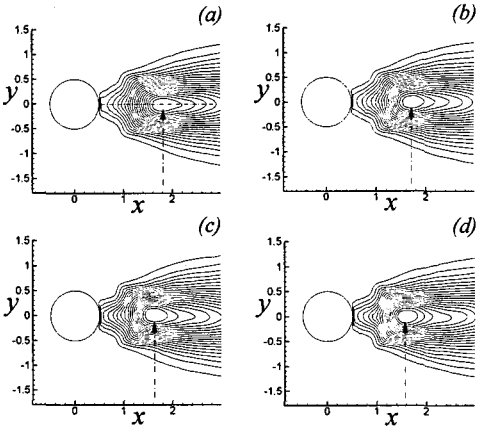


Fig. 11 Contours for vertical Reynolds normal stress ($\overline{v'^2}$); increment 0.025. The maximum locations are indicated by ⋯→. (a) case0, (b) case1, (c) case3, (d) case4

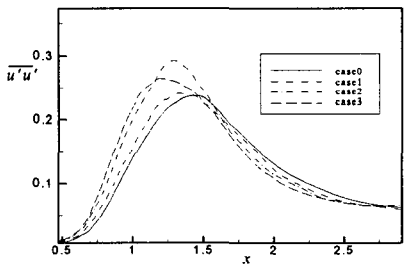


Fig. 10 Streamwise Reynolds normal stress ($\overline{u'^2}$) across maximum point

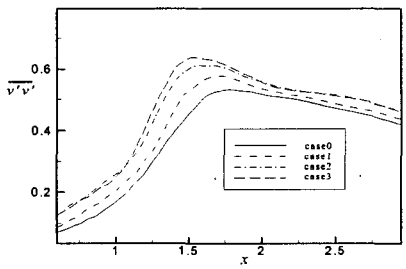


Fig. 12 Vertical Reynolds normal stress ($\overline{v'^2}$) across maximum point

류강도가 증가할수록 화살표로 표시된 레이놀즈 응력의 최대값의 위치가 실린더 쪽으로 가까워지고 있음을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 살펴보기 위하여 레이놀즈 응력의 최대값을 지나는 주유동방향으로의 라인[Fig. 9(a)에 수평선으로 표시, y=0.307]을 따라서 표현한 것이 Fig. 10이다. Fig. 10을 보면 난류강도가 증가함에 따라 주유동방향 레이놀즈 응력의 최대값이 상류로 이동하고 있음을 확실히 알 수 있으며 그 최대값의 크기 역시 대체로 증가하고 있다. 이러한 현상은 수직방향의 레이놀즈 응력의 등고선을 살펴보면 매우 유사함을 확인할 수 있다(Fig. 11). Fig. 12는 수직방향 레이놀즈 응력이 최대가 되는 지점 [Fig. 11(a)]에 수평선으로 표시, y=0)을 따라 나타낸 것이다. 난류강도가 증가함에 따라 최대값의 위치는 상류로 이동하고 있으며 그 최대값의 크기 역시 일관성 있게 증가하고 있음을 볼 수 있다. 즉 난류강도는 실린더 후류에서의 난류로의 천이를 상류쪽으로 이동시키고 있다고 생각할 수 있으며 레이놀즈 응력의 크기도 증가시킴을 알 수 있다.

4. 결 론

우선 가상경계법을 이용한 LES 코드를 작성하여 Re=3,900에 대하여 자유류 난류를 고려하지 않은 기존의 다른 실험이나 다른 LES 결과와 엄밀하게 비교하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고나서 입구면에 등방성 난류를 매 시간 스텝마다 구현하여 자유류 난류강도에 따른 유동장의 변화를 고찰하였다. 그 결과 유입되는

자유류 난류강도의 크기가 증가함에 따라 실린더 뒤에 형성되는 버블의 길이가 점차로 감소되었다. 또한 자유류 난류강도의 크기가 증가함에 따라서 후류 부근에서 관찰한 레이놀즈 응력들의 크기도 증가하였고 이의 최대값의 위치 역시 실린더 쪽으로 이동함이 확인되었다. 즉 이는 난류로의 공간적인 천이가 난류강도의 크기가 증가함에 따라 더 상류 쪽으로 앞당겨짐을 의미한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00060-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

(1) Bloor, M. S., 1964, "The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 290~304.

(2) Matsumura, M. and Antonia, R. A., 1993, "Momentum and Heat Transport in the Turbulent Intermediate Wake of a Circular Cylinder," *J. Fluid Mech.*, Vol. 250, pp. 651~668.

(3) Peskin, C. S., 1982, "The Fluid Dynamics of Heart Valve: Experimental, Theoretical, and Computational Methods," Ann. Rev. *Fluid Mech.*, Vol. 14, pp. 235~259.

(4) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Computational Physics,* Vol. 171, pp. 132~150.

(5) 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. 1406~1423.

(6) Kravchenko, A. G. and Moin. P., 2000, "Numerical Studies of Flow Over a Circular Cylinder at Re_D=3900," *Physics of Fluids,* Vol. 12, No. 2, pp. 403~417.

(7) Kim, K. C., Yoon, S. Y. and Kim, S. K., 1999, "Measurements of the Plane Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder Using a PIV Method," *Autumn Conference of the Div. of Fluid Engineering of KSME,* pp. 227~233

(8) Lourenco, L. M. and Shih, C., 1993, "Characteristics of the Plane Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," *Personal Communication.*

(9) Norberg, C., 1987, "Effects of Reynolds Number and Low-Intensity Freestream Turbulence on the Flow Around a Circular Cylinder," *Publications No. 87/2,* Dept. of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics, Chalmer Univ. of Technology, Gothernburg, Sweden.

(10) Son, J. and Hanratty, T. J., 1969, "Velocity Gradients at the Wall for Flow Around a Cylinder at Reynolds Numbers from 5×10^3 to 10^5," *J. Fluid Mech.*, Vol. 35, pp. 353~368.

(11) Cardell, G. S., 1993, "Flow Past a Circular Cylinder with a Permeable Splitter Plate," *Ph.D. Thesis,* Graduate Aeronautical Laboratories, California Institute of Technology.

(12) Beaudan, P. and Moin, P., 1994, "Numerical Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Sub-Critical Reynolds Number," *Report No. TF-62,* Thermosciences Div., Dept. of Mech. Engr., Stanford Univ.

(13) Choi, H. and You, D. H., 2000, "Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Over a Circular Cylinder," *Personal Communication.*

(14) Kravchenko, A. G. and Moin, P., 1998, "B-Spline Methods and Zonal Grids for Numerical Simulations of Turbulent Flows," *Report No. TF-73.* Dept. of Mechanical Engineering, Stanford University.

(15) Lee, S., Moin, P. and Lele, S. K., 1992, "Interaction of Isotropic Turbulence with a Shock Wave," *TF-52, Thermosciences Div.*, Dept. of Mech. Engr., Stanford Univ.

(16) Leem, Y., Sohn, D. K., Lee, J. S. and Yang, K-.S., 1998, "An Experimental Study of Flow Separation Around a Circular Cylinder with Reynolds Number and Free Stream Turbulence Intensity Variations," *Trans. of the KSME B,* Vol. 22, No. 7, pp. 889~898.