

Solid volume fraction이 20% 인 다공성 실린더 주위의 유동 해석

장 경 식,^{*1} G. Constantinescu²

¹한서대학교 항공기계학과

²IIHR, University of Iowa

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW PAST A POROUS CYLINDER WITH 20% SOLID VOLUME FRACTION

K. Chang^{*1} and G. Constantinescu²

¹Dept. of Aeronautical & Mechanical Engineering, Hanseo Univ.

²IIHR, Univ. of Iowa

The presence of a layer of vegetation which is relevant in river engineering or coastal engineering can modify the overall flow resistance, turbulent characteristics of flow. The patch of vegetation can be modelled and studied in a simple porous cylinder by previous researchers. Fully three dimensional Large Eddy Simulation is conducted in flow past a porous cylinder with a solid volume fraction (SVF) of 20%. The porous cylinder of diameter D contains 89 smaller cylinders which diameter is $0.048D$ in a regular staggered way. Reynolds number based on porous cylinder diameter D and the bulk velocity is 10,000. The large scale shedding is qualitatively similar to the one observed in the non-porous case (SVF=100%). The difference in the dynamics of the separated shear layer and the streamwise flow penetrating through the porous cylinder are compared with those in the non-porous cylinder. In particular, the wake billows form a larger distance from the back of the porous cylinder.

Key Words : 대와류모사 (Large Eddy Simulation), 다공성 실린더 (Porous cylinder), 응집 구조(Coherent structure), 박리전단층 (Separated Shear Layer)

1. 서 론

하천공학이나 해안공학에서는 홍수 방지와 해안 보호를 위해 수중에서의 식물 군락을 이용하게 되는데 이러한 수중 식물들은 유동의 흐름을 방해하여 평균 유동 속도를 낮추고 식물들에 의해서 추가되는 압력 및 마찰 저항은 유동 속도, 난류량, 전단응력과 같은 유동장과 물질 전달 과정에 큰 영향을 미친다. 최근 들어서는 연안에 수중 식물 군락을 형성시켜 쓰나미에 의한 피해를 줄이기 위한 목적으로 이용되기도 하는데[1,2], 이들을 위해서는 식물 군락 내부 및 주위 유동에 대

하여 실험적으로 또는 전산유체역학 관점에서 심도있는 연구가 필요하다.

식물 군락을 모델링하기위해 원형에 가까운 작은 실린더들이 일정 또는 랜덤 간격을 유지하며 위치한 다공성 실린더 형상으로 간주하고 실험 또는 수치 해석을 수행하고 있다[2]. 작은 실린더들이 위치한 유동 현상은 하천의 식물 군락 주위 유동 뿐만 아니라 열교환기에서의 튜브 번들[3], 해양 복합 구조물[4], 도시내부의 고층 빌딩들[5] 주위에서도 나타나는 현상으로 실험뿐만 아니라 수치적으로 많은 연구가 이루어졌다. 하지만, 이전의 많은 수치해석 결과들은 컴퓨터 성능의 한계와 계산 시간의 부담으로 작은 실린더의 개수를 2-4개로 제한하여 유동 현상을 살펴보거나 대칭조건(symmetric condition)을 이용하여 국부 지역에서의 유동 및 열전달 현상을 해석하여 전체에 적용하였다. 이러한 경우 많은 실린더가 같이 위치하여 발생하는 내부 실린더 사이의 복잡한 유동 현상이나 각각의 실린더에 작용하는 유동에 의한 저항을 살펴

Received: June 23, 2011, Revised: September 18, 2012,

Accepted: September 19, 2012.

* Corresponding author, E-mail: kschang76@hanseo.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/ksfce.2012.17.3.087

© KSCFE 2012

보는 데는 한계가 있다. 최근 들어 컴퓨터 성능의 발달로 인해 대와류모사기법(LES)을 이용한 작은 실린더 다발 주위의 유동 해석결과가 제시되고 있다.

Stoesser et al.[6]은 대와류모사기법을 이용하여 작은 실린더 지름 기준으로 Reynolds수 1,340에 해당하는 유동에 대해 작은 실린더를 4개, 16개와 64개 변화시켜가며 (SVF=1.6%, 6.3%, 25.1%) 유동의 특성을 살펴보고 실험치[2]와 비교하여 잘 일치함을 보였다. Stoesser et al.[6]의 결과에 따르면, SVF가 증가할수록 전체 유동장에 작용하는 항력계수가 증가하며 내부 유동 구조 및 난류 구조가 단일 실린더의 경우와 큰 차이를 보이고 있다. Nicolle and Eames[7]는 2차원 직접수치모사 기법을 이용하여 작은 실린더 개수를 7개부터 133개까지 변화시켜가며 (SVF=1.6%~30%) SVF에 따른 개별 실린더들의 저항 계수 변화를 살펴보았다. SVF가 5% 이내인 경우에는 실린더들 간의 유동 간섭이 거의 없어 단일 실린더 유동과 거의 흡사한 유동 형태를 보여주지만, $5% < SVF < 15%$ 인 경우 내부 실린더들은 내부로 침투하는 홀림유동(bleeding flow)에 의해 안정된 와류 유동 현상이 보이고 다공성 실린더 외곽에 위치한 실린더들은 시간에 따른 큰 저항 변화를 보이고 있다. 하지만 Nicolle and Eames[7]의 결과는 다공성 실린더 지름을 기준으로 Reynolds 수가 2100 정도로 낮은 레이놀즈수 영역이며 2차원 직접수치모사이므로 3차원 유동 효과를 고려하지 못하고 있다.

본 연구에서는 SVF 값이 20%에 해당하는 다공성 실린더 형상에 대해 대와류모사기법(LES)을 적용하여 3차원 박리전 단층 유동 현상과 각각의 실린더들의 와류 구조를 살펴보고자 한다.

2. 수치 방법 및 계산 조건

2.1 수치 방법

지배방정식으로 비압축성 Navier-Stokes 방정식이 적용되었으며 식 (1)-(2)는 대와류모사를 위한 filtered 연속방정식과 모멘텀 방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 τ_{ij} ($= -\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u_i u_j}$)는 모델항으로 처리되는 아격자 스케일 스트레스 항이며 아격자 스케일 점성항(sub-grid scale viscosity)은 아래식과 같다.

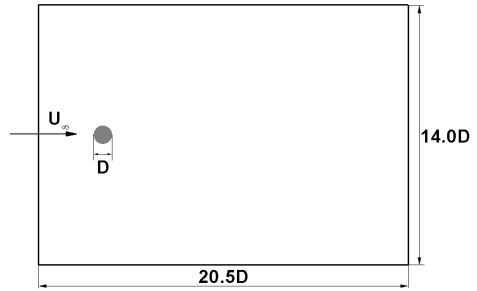


Fig. 1 Sketch of computational domain with porous and non-porous cylinder of diameter D

$$\tau_{ij} = 2\mu_t |S_{ij}| - \frac{1}{3} q^2 \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\mu_t = C_\mu \Delta^2 |S|, \text{ where } |S| = \sqrt{S_{ij} S_{ij}} \quad (4)$$

C_μ 는 Pierce and Moin[8]에 의한 제안된 Dynamic Smagorinsky 모델을 이용하여 계산하였다.

$$C_\mu = \frac{\langle L_{ij} M_{ij} \rangle}{2 \langle M_{kl} M_{kl} \rangle} \quad (5)$$

여기서 $L_{ij} = \widehat{u_i u_j} - \overline{u_i u_j}$, $M_{ij} = \widehat{\Delta^2 |S| S_{ij}} - \Delta^2 |S| S_{ij}$ 를 의미한다.

비균일 격자계에서 유한 체적법에 기반을 둔 대와류모사 코드[8]를 사용하였다. 시간과 공간에 대하여 2차의 정확도를 가지며, 중앙차분법을 이용하였다.

몽똥한 장애물(blunt obstacles)이 존재하는 유동[9]과 열린 공동(open cavity) 유동[10]등 다양한 공학적 문제에 적용하여 본 해석코드에 사용된 수치적 방법을 검증하였다. 자세한 수치 기법은 Pierce and Moin [8]에 잘 나타나 있다.

또한 입구의 층류 유동이 실린더에 의해 난류 유동으로의 천이과정을 모사하는데 있어서, Kravchenko and Moin [11]은 Dynamic Smagorinsky 모델을 이용하여 아입계 레이놀즈 수의 원형 실린더 주위 유동에서 벽에서 떨어져나오는 전단층에서의 천이 현상을 비교적 잘 예측하였으므로 본 연구에서도 Dynamic Smagorinsky 모델을 적용하였다.

2.2 계산 조건

Fig. 1은 본 계산에서 적용된 계산 영역이다. 자유류 속도(U)와 다공성 실린더의 지름(D)를 기준으로 레이놀즈수는 $Re=10,000$ 이며, 다공성 실린더 지름(D) 내부에 0.024의 반지름(r/D)을 가지는 작은 실린더들이 존재한다. 채널 벽면 유동이

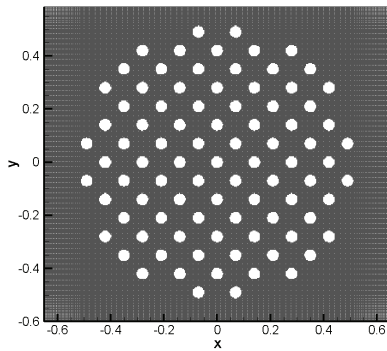


Fig. 2 Computational mesh within porous cylinders and positions of 89 small cylinders

다공성 실린더 유동에 영향을 거의 미치지 않도록 아래와 위 방향으로 7D에 해당하는 거리를 두었으며, 유동방향으로는 20.5D에 해당하는 거리를 두어 다공성 실린더 후류 유동이 출구 조건에 영향을 받지 않도록 하였다. 횡방향으로는 다공성 실린더 지름(D)과 같은 길이로 두고 주기조건을 적용하였다. 입구 조건으로는 같은 레이놀즈수에 해당하는 채널 유동에 대하여 대외류모사를 수행하여 얻은 속도 성분들을 충분한 시간동안 평균하여 평균화된 속도장을 적용하였다.

다공성 실린더 내부의 작은 실린더들은 초목 식물 군락 지역의 각각의 줄기 부분에 해당하며 원형에 가까운 형상을 가지도록 하였다. 실린더 벽과 내부 고체 영역에 대해서는 속도와 압력을 0으로 두어 blocking 처리를 하였다. Fig. 2는 반지름(r/D)이 0.024인 작은 실린더들의 배치를 나타내고 있는데, 0.14D 거리를 유지하며 엇갈림 형태로 위치시키고 SVF(Solid volume fraction) 값이 20%에 해당하도록 89개의 작은 실린더가 존재하고 있다. 여기서 SVF는 다공성 실린더 전체 부피에 대한 작은 실린더 부피합의 비를 의미한다. 예를 들어 SVF가 100%인 경우는 지름이 D인 단일 실린더를 의미한다. 본 연구에서는 SVF가 20%에 해당하는 다공성 실린더 유동을 해석하고 이를 SVF가 100%인 단일 실린더 유동과 비교하였다.

격자는 유동방향과 수직방향으로 1200, 760개의 격자점으로 구성하였으며 다공성 실린더 내부와 근처에 격자점을 조밀하게 두었다. 횡방향으로는 64개의 격자점을 두었다. 각 실린더가 위치한 영역에서는 격자 간격을 $\Delta x = \Delta y = 0.0035$ 크기를 가지도록 격자를 구성하였다. 무차원 시간 간격은 0.001 h/U 로 두어 적분을 수행하였다.

3. 계산 결과

3.1 단일 실린더 유동 해석을 통한 검증

본 절에서는 다공성 실린더 내부에 위치하는 작은 실린더

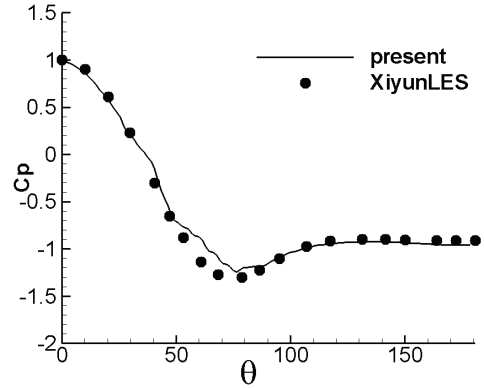


Fig. 3 Distribution of time and spanwise averaged pressure coefficient

($r/D=0.024$)가 한 개만 존재하는 단일 실린더(isolated cylinder)인 경우에 대하여 해석을 수행하여 기존의 연구 결과와 비교 검증을 수행하였다. 계산되는 격자의 일치성을 위하여 다공성 실린더의 경우와 같은 격자 간격과 적분 시간 간격을 적용하였으며 유동 조건 또한 같게 두었다. Fig. 3은 시간과 횡방향에 대한 평균 압력 계수 분포를 Xiyun and Guocan[12]의 LES 결과와 비교한 것이다(Table 1). Xiyun and Guocan[12]의 계산 결과는 실린더 지름 기준으로 레이놀즈수가 500으로써 본 연구에서의 단일 실린더 지름 기준으로 레이놀즈수가 480인 경우와 거의 일치한다. 완전한 원형을 나타내기 위해 곡선 좌표계(curvilinear coordinate system) 또는 IBM(immersed boundary method) 기법을 적용하지 않았기 때문에 부드러운 곡선을 얻을 수는 없었지만, 기존의 LES 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 평균 저항 계수값(C_d)을 1.3으로 예측하였는데 이는 Xiyun and Guocan[12]의 LES 결과 1.4와도 가까운 결과를 얻었다. 양력 계수의 무차원 진동수(Strouhal number)는 0.200로 계산되어졌으며 Xiyun and Guocan[12]의 결과에서는 0.202 값을 예측하고 있다.

3.2 다공성 실린더 내부와 근처 유동

본 절에서는 다공성 실린더 내부와 그 주위 유동에 대해서 살펴보고자 한다. Fig. 4는 다공성 실린더 주위의 박리전단층(SSL)의 구조를 Q-criterion을 이용하여 나타내었으며 등와류선도로 그 크기를 나타내었다. 앞 부분 원주 둘레 근처에 위치

Table 1 Comparisons with Xiyun and Guocan[12]'s LES in isolated cylinder case

	ReD	Cd	St
Present	480	1.3	0.200
Xiyun and Guocan[12]	500	1.4	0.202

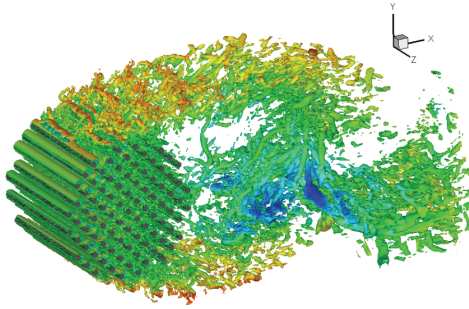


Fig. 4 Visualization of the near wake around the porous cylinder (SVF=20%) with Q-criteria

한 작은 실린더에서는 2차원 횡방향 와류 구조가 형성되고 있으며 뒷 부분으로 갈수록 이차 불안정성 (secondary instability)에 의해 와류의 늘임(stretching) 현상이 나타나면서 점점 작고 3차원 형태의 에디들로 분해되고 있다. 이는 아임계 레이놀즈 수 영역에서의 단일 실린더 유동의 난류로의 천이 현상과 비슷한 현상을 보여주고 있는데, 다공성 실린더의 경우 원주(circumference) 둘레에 위치한 실린더들의 후류(wake)에서 떨어지는 에디에 의한 영향으로 좀 더 앞부분에서 천이현상이 일어나고 있다.

단일 실린더의 경우에는 실린더 아래와 위 양쪽에서 형성되는 박리전단층에 의한 Kelvin-Helmholtz instability의 강한 성장으로 90도 근처 각도에서 와류 튜브 (vortex tube)가 떨어져 나오게 되지만, 다공성 실린더의 경우에는 좀 더 이른 지역, 약 45도 각도에서 불연속적으로 위치한 원주 둘레 근처의 작은 실린더에서 떨어지는 후류에 의해 와류 튜브가 형성되기 시작하며 90도 각도까지 원주 둘레 위치한 실린더들에게도 와류 튜브가 형성되며 떨어져 나오고 있다. 이렇게 형성된 와류 구조는 Kelvin-Helmholtz instability의 영향과 다공성 실린더 내부에서 형성된 후류가 원주 방향으로 빠져나오는 유동과 만나면서 강한 3차원 변형을 보이고 있다.

Fig. 5는 순간의 등와류선도와 시간과 횡방향에 따라 평균화된 등와류선도를 나타내고 있다. 충분히 평균화된 속도장을 얻기 위해 유동이 완전 발달 단계에 이른 후부터 전체 계산 영역의 2배에 해당하는 40h/U 동안 시간 평균을 수행하였다. 다공성 실린더 대칭축(y=0) 근처에서는 흘림유동(bleeding flow)이 유동방향으로 형성되지만 원주 바깥방향으로 갈수록 45도 정도의 각도를 형성하며 다공성 실린더를 빠져나가고 있다. 전단층 내부의 와류 강도는 다공성 실린더 내부에서 뒷부분으로 갈수록 그 크기가 급격히 감소하고 있는데 이는 다공성 실린더 입구에서 들어온 유동들이 이미 측면으로 대부분 빠져나갔기 때문이다. 각 실린더 앞부분에서 나타나는 스파이크 모양의 와도변화는 직교좌표계 기반으로 원형에 가까

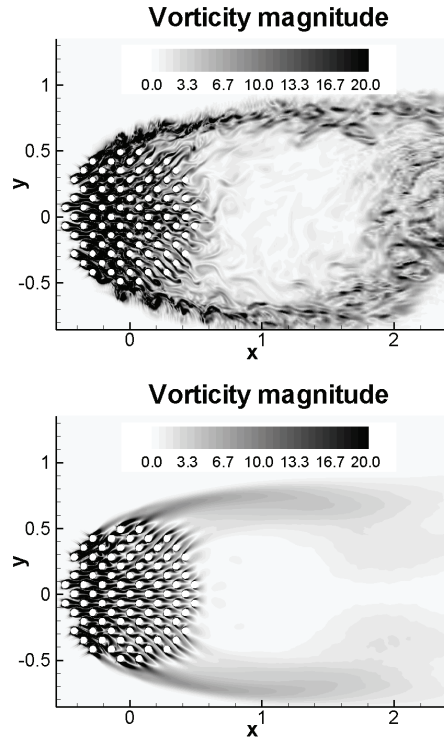


Fig. 5 Vorticity magnitude contours of the instantaneous flow (top) and of the mean flow (bottom)

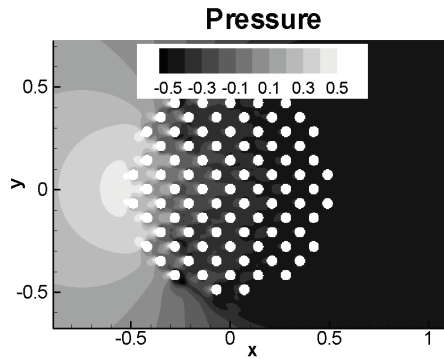


Fig. 6 Mean pressure contours

운 실린더 형상을 모델링하는 과정에서, 계단 형태의 실린더 벽면에 의해 나타낸 것으로 사료된다.

등압력선도(Fig. 6)를 살펴보면, 다공성 실린더의 상류 정체점 근처에서 압력이 증가하면서 엇갈린 분포를 가지는 2번째 열의 실린더까지 그 영향이 미치게 된다. 하지만 단일 실린더에 비해 압력의 최대값과 그 영역의 크기는 작게 예측되는데 이는 작은 실린더의 분포에 의한 유동의 감속이 덜하며

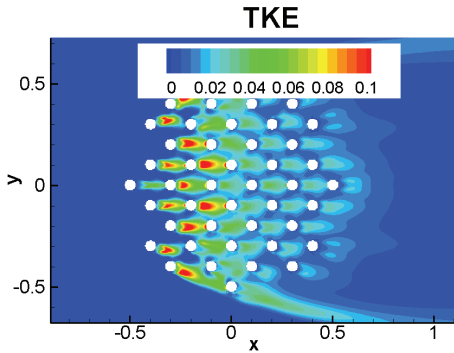


Fig. 7 Turbulent kinetic energy contours around the porous cylinder (SVF=20%)

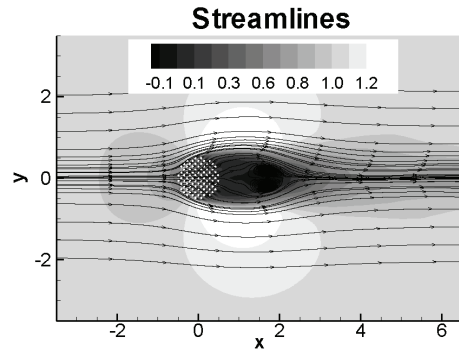


Fig. 9 Mean streamwise velocity contours and streamlines of porous cylinder

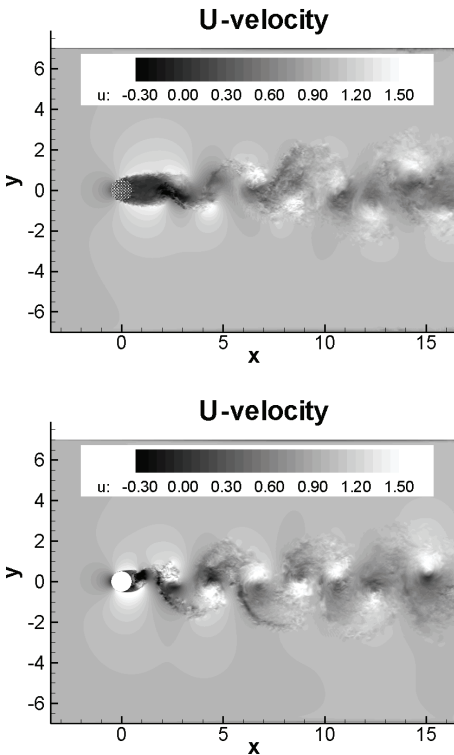


Fig. 8 Instantaneous streamwise velocity contours of porous cylinder (top) and non-porous cylinder (bottom)

일부 유동들은 다공성 실린더 내부로 흘러들어가기 때문이다.

Fig. 7은 다공성 실린더 내부와 주위의 난류운동에너지 (TKE) 분포를 보여주고 있다. 각각의 실린더 주위를 지나는 와류의 흘림과 상호 작용에 의해 난류운동에너지가 증가할 것으로 기대되지만 $x=-0.35D$ 와 $x=0.0D$ 지역을 제외하고는 큰 난류운동에너지 분포를 보이지 않고 있다. 이는 일부 흘림 유

동 (bleeding flow)이 다공성실린더의 측면으로 빠져나갔기 때문이며 나머지 매우 약한 유동이 내부 실린더를 지나며 낮은 에너지 에디가 형성되고 있다. 이는 다공성 실린더 내부의 오염 물질의 전달 과정 관점에서 매우 중요한 결과로써, 부유물들이 떠있으면서 후류로 전달되지 못하고 가라앉게 되는 결과를 가져온다.

3.3 후류(wake) 구조

본 절에서는 다공성 실린더 후류(wake) 구조를 살펴보고자 한다. Fig. 8을 통해 다공성 실린더와 단일 실린더의 유동방향 등속도(U) 선도를 나타내었다. 두 경우 모두 실린더 후류의 규칙적인 와류 흘림(vortex shedding)이 나타나고 있다. Nicolle and Eames[7]의 직접수치모사 결과에 따르면 SVF>15% 이상인 경우 다공성 실린더 후류의 von Karman vortex street은 단일 실린더의 경우와 매우 비슷한 형태로 나타나고 있다.

와류가 형성되어 떨어지는 지점을 살펴보면, 단일 실린더의 경우에는 실린더 바로 뒤에서 와류가 형성되지만, 다공성 실린더의 경우에는 다공성 실린더 지름 1D 거리 이후에서 와류가 떨어져 나간다. 이는 다공성 실린더 내부의 흘림 유동 (bleeding flow)이 유동방향과 측방향으로 다공성 실린더 원주 둘레 근처로 흘러나오기 때문인데, 유동방향 성분의 유동은 다공성 실린더 뒷 부분의 재순환(recirculation) 버블을 뒤쪽으로 밀어내는 역할을 하며 측방향 성분은 박리전단층을 바깥 쪽으로 밀어내는 역할을 한다. Nicolle and Eames[7]의 직접수치모사 결과를 살펴보면 SVF가 감소할수록, 즉 다공성 실린더내 실린더의 개수가 작을수록 후류의 와류가 떨어져나가는 지점의 거리가 점점 증가하는데 이는 본 연구 결과와 잘 일치함을 보여준다.

평균 유동방향 등속도선도(U)를 나타낸 Fig. 9는 다공성 실린더 후류의 재순환 버블이 형성되는 거리가 더 멀어졌음을

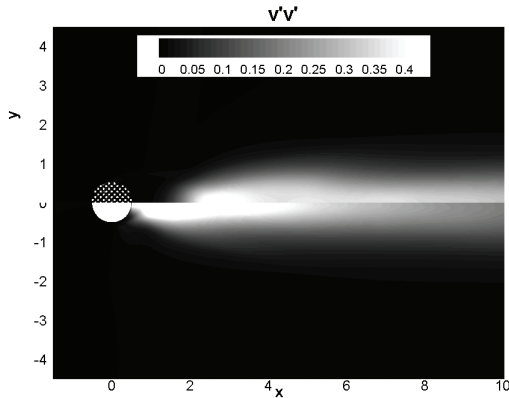


Fig. 10 Normal turbulent stress $\overline{v'v'}/U^2$ contours in the porous cylinder (top) and the non-porous cylinder (bottom)

잘 보여주고 있으며, 박리전단층 구간이 길어지면서 외부 유동을 가속시키는 구간도 커지고 있다. 실린더 후류의 $y=0$ 인 지점에서의 유동방향 속도 크기를 살펴보면 단일 실린더인 경우보다 다공성 실린더인 경우 속도가 더 크게 형성되는데 이는 다공성 실린더 내부에서 흘러나오는 유동의 모델링에 기인한다.

Fig. 10은 두 경우의 수직 방향 레이놀즈 응력(Reynolds stress) 분포를 보여주고 있는데 위의 경우가 다공성 실린더의 경우이며 아래는 단일 실린더의 결과이다. 박리전단층 사이의 수직방향의 레이놀즈 응력 크기는 단일 실린더인 경우 더 크며 실린더 뒷면에 가깝게 형성되고 있다. 하지만 유동방향으로 빨리 감소하게 된다.

4. 결 론

본 연구는 89개의 작은 실린더를 포함한 SVF가 20%인 다공성 실린더 주위 유동을 대와류모사 기법을 이용하여 해석하여 단일 실린더(SVF=100%)인 경우의 결과와 비교하였다. 같은 레이놀즈수에 대해 단일 실린더와 비슷한 박리전단층이 실린더 양 측면에서 형성되었으며 이로 인한 von Karman vortex street 또한 비슷한 형상을 보였다. 이는 Nicolle and Eames[7]의 결과와도 잘 일치함을 보였다. 하지만 박리전단층이 형성된 길이는 다공성 실린더 내부에서 흘러나오는 유동에 의해 후류 방향으로 훨씬 더 길게 나타났다. 난류운동에너지는 다공성 실린더 중심 축 기준으로 앞부분인 $-0.35D < x < 0.0D$ 구간에서만 큰 값을 보였는데 이는 다공성 실린더 내부로 흘러들어간 흡입 유동(bleeding flow)의 대부분이 측방향으로 휘어져 바깥부분으로 빠져나가기 때문이다.

참고문헌

- [1] 2004, Ghisalberti, M., Nepf, H., "The limited growth of vegetated shear layers," *Water Res.*, Vol. 40, W07502.
- [2] 2008, Liu, D., Diplas, P., Fairbanks, J.D., and Hodges, C.C., "An experimental study of flow through rigid vegetation," *J. Geophysical Research-Earth science*, DOI:10.1029/2008JF001042, Vol.113, pp.1-16.
- [3] 2004, Hassan, Y.A., and Barsamian, H.R., "Tube bundle flows with the Large Eddy Simulation technique in curvilinear coordinates," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.47, pp.3057-3071.
- [4] 2007, Takemura, T., and Tanaka, N., "Flow structures and drag characteristics of a colony type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow," *Fluid Dynamics Research*, Vol.39, pp.694-710.
- [5] 2008, Xie, Zheng-Tong, Coceal Omduth, and Castro Ian P., "Large-Eddy Simulation of Flows over Random Urban-like obstacles," *Boundary-layer meteorology*, Vol.129, pp.1-23.
- [6] 2010, Stoesser, T., Kim, S.J., and Diplas, P., "Turbulent flow through idealized emergent vegetation," *J. Hydraulic Engineering*, Vol.136, pp.1003-1017.
- [7] 2011, Nicolle, A., and Eames, I., "Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, pp.1-31.
- [8] 2001, Pierce, C.D. and Moin, P., "Progress-variable approach for large-eddy simulation of turbulent combustion," *Mech. Eng. Dept. Rep. TF-80*, Stanford University, California, USA.
- [9] 2010, Gonzalez-Juez, E., Meiburg, E., Tokyay, T., and Constantinescu, G., "Gravity current flow past a circular cylinder : Forces and wall shear stresses and implications for scour," *J. Fluid Mech.*, Vol.649, pp.69-102.
- [10] 2006, Chang, K., Constantinescu, G., and Park, S., "Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and a fully developed turbulent incoming boundary layer," *J. Fluid Mech.*, Vol.561, pp.113-145.
- [11] 2000, Kravchenko, A.G. and Moin, P., "Numerical studies of flow over a circular cylinder at $ReD=3900$," *Physics of Fluids*, Vol.12, pp.403-417.
- [12] 2002, Xiyun, L., and Guocan, L., "A Large Eddy Simulation of the near wake of a circular cylinder," *ACTA MECHANICA SINICA*, Vol.18, pp.18-30.