표면조도가 있는 난류경계층의 직접수치모사

이 재 화[1*], 성 형 진[2]

Direct numerical simulations of the turbulent boundary layers over the rough walls

Jae Hwa Lee* and Hyung Jin Sung**

Abstract

Direct numerical simulations (DNSs) of spatially developing turbulent boundary layers (TBLs) over two-dimensional (2-D) and rod and three-dimensional (3-D) cube rough walls were performed to investigate the effects of streamwise spacing on the properties of the TBL. The 2-D and 3-D roughness were periodically arranged in the downstream direction with pitches of px/k=2, 3, 4, 6, 8 and 10 and for the cube, the spanwise spacing is fixed to pz/k=2 with staggered array, where px and pz are the streamwise and spanwise spacings of the roughness and k is the roughness height. Inspection of the Reynolds stresses showed that except for px/k=2 and 3 over the 2-D rough walls, the effects of the surface roughness extend to the outer layer over the 2-D and 3-D rough walls and the magnitude of the Reynolds shear stress in the outer layer is increased with proportion to px/k. However, such results are contrary to the trends of form drag, roughness function and roughness length against px/k, which showed the maximum values at px/k=8 and 4 over the 2-D and 3-D rough walls respectively.

Key Words : Direct numerical simulation(직접수치모사), Turbulent boundary layer(난류경계층), Surface roughness(표면조도), Turbulent structure(난류구조)

1. 서 론

표면조도가 난류유동에 어떠한 영향을 끼치며 이러한 영향이 표면조도로부터 얼마나 멀리 떨어진 영역까지 존재하는지에 대한 실험적 연구가 오래 전부터 이루어져 왔으며 이를 통해 Townsend[1]은 표면조도가 충분히 작고 Reynolds 수가 충분히 큰 유동일 경우 표면조도가 난류구조에 미치는 영향은 조도저층 (roughness sublayer)에 국한되며 표면조도로부터 멀리 떨어진 바깥영역의 경우 매끄러운 표면을 가진 난류경계층과 난류구조의 차이가 크지 않다고 주장하여 왔다. 이를 'Townsend's wall similarity' 가설이라고 하는데 Schultz 등[2]은 3차원의 불규칙한 형태를 갖는 일반적인 표면조도에 대해 이러한 가설이 성립한다는 것을 보여 주었으며 또한 표면조도의 높이에 상관없이wall-similarity가 표면조도 크기 (k)의 5배 또는 effective sand grain roughness (k_s)의 3배 내로 제한된다는 주장하였다.

반면에 2차원 막대형상의 표면조도의 경우 비슷한 크기의 3차원 불규칙한 표면조도에 비해 난류경계층의 영향이 바깥 영역으로 더 크게 전파되는 것으로 보고 되고 있다[3,4,5]. 특히, Volino 등은 이러한 현상이 차원의 변화에 의해 발생하는 것이라 주장하였다. 하지만 최근의 Lee 등[6,7]에 이루어진 직접수치모사는 이러한 결과가 차원의 차이에서 발생하는 결과가 아니라 사각형 표면과 그리고 주유동 방향의 길이 또는 각각의 영향에 의해 발생하는 결과임을 보여주었다.

따라서 본 연구에서는 표면조도 사이의 간격이 wall-similarity에 주는 영향을 살펴보고자 다양한 주 유동 방향의 길이에 대해서 연구를 진행하였다. 2차원과 3차원의 표면조도를 갖는 난류경계층을 직접수치모사하였으며 모든 표면조도의 크기는 입구 모멘텀 두께의 1.5배 (k~1.5 θ_{in})로 부과하였으며 레이놀즈 수 (Re_θ)는 300~1300까지 변화한다. 주 유동방향의 간격 (p_x/k)은 각각 표면조도 크기의 2~10배까지 변화하며, 특히 3차원 입방형 표면조도의 경우 횡 방향으로 동일한 간격 (p_z/k=2)을 유지하며 계산을 수행하였다.

2. 수치적 방법

본 연구에서 사용된 무차원화 된 3차원의 비정상 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{dt}+\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{1}{\mathrm{Re}}\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}+f_i, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0. \qquad (2)$$

여기서 x_i는 직교 좌표를 나타내고, u_i는 각각의 속도 성분들을 나타낸다. 모든 변수들은 자유흐름속도 (U_∞)와 입구에서의 운동량 두께 (θ_{in})로 무차원화 되었으며 Re는 Reynolds 수를 나타낸다. 지배방정식은 Kim 등[8] 에 의해 제시된 부분 단계법(fractional step method)을 사용하여

1 한국과학기술원 기계공학과
2 정회원, 한국과학기술원 기계공학과
* TEL : 042) 350-30671
* Corresponding author E-mail: hjsung@kaist.ac.kr

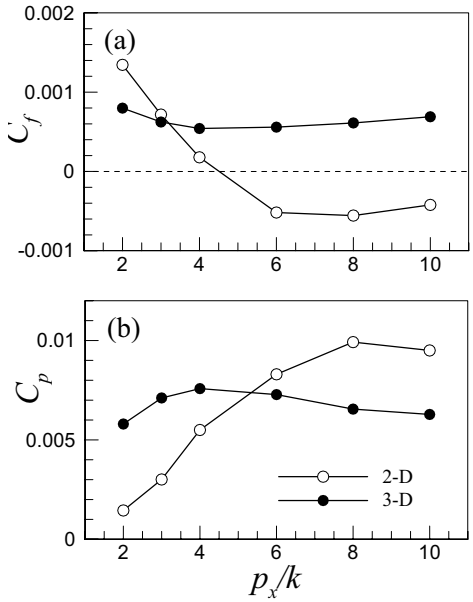

Fig. 1. Schematic diagram of computational domain and rod roughness.

속도와 압력 항으로 분리하였다. 지배방정식의 모든 항은 시간과 공간에 대해 각각 2차의 중심차분법과 Crank-Nicolson 방법을 이용하여 완전 내재적 방법으로 차분하였다. 이를 통해 얻어진 행렬 식은 계수행렬의 근사적인 LU decomposition을 통해서 속도와 압력을 분리하였으며 대류항의 내재적 처리로 인해 결합된 속도 성분들 또한 근사적 LU decomposition을 통해 각각 분리하였다. 본 연구에서는 표면조도를 모사하기 위하여 Kim 등[9] 이 제시한 가상경계기법을 이용하였다. 가상경계에서 경계조건을 만족시키기 위하여 운동량 방정식에 모멘텀 가진 f_i 항이 추가되었으며 힘이 가해 지는 점이 가상의 경계와 일치하지 않는 경우 일차와 이차의 보간법을 사용하여 가상 경계에서의 점착 조건을 만족시켰다.

3. 연구 결과

Fig. 1은 공간적으로 평균된 표면마찰항력과 압력항력을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 2차원의 표면조도가 있는 경우 벽면마찰항력은 주 유동 방향의 길이의 변화에 크게 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 최대값은 p_x/k=2에서 발생하고 주 유동방향의 길이가 증가할수록 표면조도 사이에서 발생하는 재순환유동의 세기가 강해지면서 마찰저항이 감소하고 최소값은 p_x/k=8에서 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만, 3차원의 표면조도가 있는 경우, 주 유동방향의 길이 변화에 대한 영향이 2차원의 표면조도에 비해 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있으며, 또한 마찰저항의 값은 항상 양의 값을 가진다.

Fig. 1(b)를 통해, 압력항력의 경우 2차원의 p_x/k=2를 제외하고 표면마찰항력보다 크기가 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 계산된 유동장이 완전발달된 rough regime임을 나타내며 압력항력이 전체항력의 대부분을 차지하는 것을 의미한다. 표면마찰항력과 마찬가지로, 압력저항 또한 3차원의 표면조도의 경우 주 유동방향의 간격에 크게 의존하지 않는 것을 확인할 수 있으며

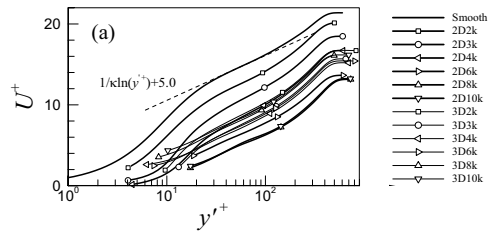

Fig. 2. Mean velocity distributions in wall units over the 2-D and 3-D rough walls.

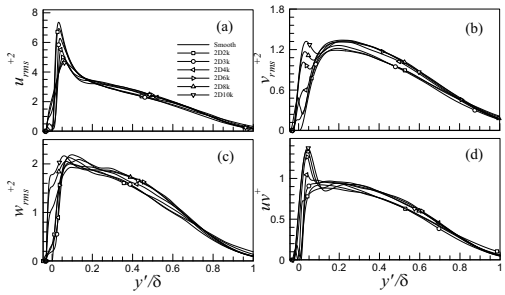

Fig. 3. Reynolds stresses against the streamwise spacing over the 2-D rough walls.

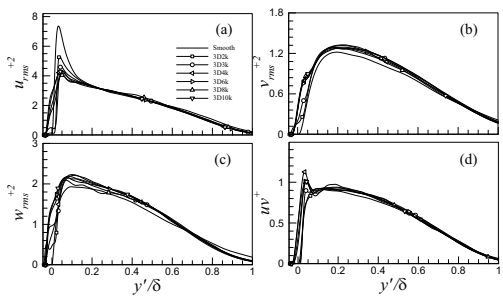

Fig. 4. Reynolds stresses against the streamwise spacing over the 3-D rough walls.

히 p_x/k=4에서의 최대치와 p_x/k=2에서의 최소치 사이에 약 30%의 차이가 발생한다. 하지만 2차원의 경우, 최대치와 최소치는 약 6배 이상 차이를 보이며 이것은 앞의 표면마찰저항과 일관되는 결과이다. 이러한 결과는 기존의 Furuay 등[10]와 Leonardi 등[11]에 의해 행해진 실험과 계산의 결과와 일치하는 결과이다.

Fig. 2(a)은 주 유동 방향의 평균 속도 분포를 나타내고 있다. 2차원 표면조도의 경우 주 유동 방향의 길이가 커짐에 따라 log law의 영역이 아랫방향으로 더 크게 이동하는 것을 확인할 수 있으며 특히 최대값은 p_x/k=8에서 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 3차원의 경우, 주 유동방향의 길이에 따라 그 크기의 변화는 크지 않으며 대부분의 표면조도가 거의 유사한 속도 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이것은 3차원의 경우 주 유동 방향의 길이가 유동장에 큰 기여를 하지 않음을 나타내며 앞에서 구한 표면마찰항력과 압력항력과 일관되는 결과이다.

Figs. 3-4은 2차원과 3차원 표면조도 위의 난류응력분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 2차원의 경우 p_x/k=2, 3에서 wall-similarity 가 성립하는 것을 확인할 수 있으며 그 밖의 p_x/k=4, 6, 8, 10에서는 바깥영역까

지 표면조도의 영향이 존재하는 것을 알 수 있다. 이것은 주 유동 방향의 길이가 짧은 경우, 유동장과 표면조도와의 상호작용이 적으며 그 결과 바깥영역에 영향을 주는 큰 스케일의 구조가 만들어지지 않는다. 3차원의 경우 주 유동 방향의 길이에 상관없이 바깥영역에서 표면조도의 영향이 존재하는 것을 확인할 수 있으며 이것은 3차원의 경우, 입 방형 표면조도 사이로 흐르는 유동장과 표면조도의 충돌로 인하여 바깥 영역으로 영향을 미칠 수 있는 큰 구조가 만들어지기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 사각형의 모서리를 가진 2차원과 3차원의 표면조도를 갖는 난류경계층을 직접수치모사하여 주 유동방향의 길이의 변화에 따른 바깥 영역의 wall-similarity의 변화를 살펴보았다. 2차원의 경우, 주 유동 방향의 길이에 따라 아래방향으로 평균속도의 이동이 확연한 차이를 보여주었으며 3차원의 경우, 주 유동방향의 길이에 대해 큰 차이를 보여주지 않았다. 또한 난류응력을 살펴봄으로써, 2차원의 p_x/k=2, 3 경우를 제외하고 2차원과 3차원의 표면조도를 가진 난류경계층의 경우, 바깥영역에서 wall-similarity가 성립하지 않음을 확인할 수 있었다. 이것은 주 유동 방향으로 일정길이 이상을 가지는 사각형 표면조도의 경우 유동장의 충돌에 의해 발생하는 큰 벽 수직방향의 난류응력으로 인하여 바깥영역으로 영향을 미칠 수 있는 새로운 유동구조가 생겨나기 때문인 것으로 판단된다.

4. 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 창의 연구사업으로부터 지원받아 수행되었습니다.

5. 참고문헌

(1) Townsend, A. A., 1976, "The structure of turbulent shear flow," Cambridge University Press

(2) Flack. K. A., Schultz, M. P. & Connelly, J. S., 2007, “Examination of a critical roughness height for outer layer similarity,” *Phys. Fluids* 19, 095104.

(3) Krogstad, P. -Å. & Antonia, R. A., 1999, “Surface roughness effects in turbulent boundary layers,” *Phys. Fluids* 27, pp.450~460.

(4) Lee, S. -H. & Sung, H. J., 2007, “Direct numerical simulation of turbulent boundary layer over a rod-roughened wall,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 584, pp. 125~146.

(5) Volino, R. J., Schultz, M. P. & Flack, K. A., 2009, “Turbulence structure in a boundary layer with two-dimensional roughness,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 635, pp.75~101.

(6) Lee, J. H., Sung, H. J. & Krogstad, P. -Å., 2011, “Direct numerical simulation of the turbulent boundary layer over a cube-roughened wall,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 669, pp. 397~431.

(7) Lee, J. H. & Sung, H. J., 2010, “Turbulent statistics of the turbulent boundary layer over a cube-roughened wall, *KSME*(*B*), Vol. 34, No. 10, pp. 917~923.

(8) Kim, K., Baek, S. -J. & Sung, H. J., 2002, “An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations,” *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 38, pp. 125-138.

(9) Kim, J., Kim, D. & Choi, H., 2001, “An immersed boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries,” *J. Computational Physics* 171, pp.132-150.

(10) Furuya, Y., Miyata, M. & Fujita, H., 1976, “Turbulent boundary layer and flow resistance on plates roughened by wires,” *Trans. ASME: J. Fluids Engng* 98, pp. 645-644.

(11) Leonardi, S., Orlandi, P., Smalley, R. J., Djenidi, L. & Antonia, R. A., 2003, “Direct numerical simulations of turbulent channel flow with transverse square bars on one wall,” *J. Fluid Mech.*, Vol. 491, pp. 229-238.