

저 레이놀즈 수 개수로 난류흐름의 직접수치모의: 난류의 비등방성 해석

Direct Numerical Simulation of Low-Reynolds-Number Turbulent Flows in an Open-Channel: An Analysis of Turbulence Anisotropy

정영훈*, 최성욱**, 최정일***

Younghoon Jung, Sung-Uk Choi, Jung-Il Choi

요 지

측벽이 존재하는 개수로 난류흐름에 대한 DNS 자료를 이용하여 난류의 비등방성을 해석하였다. 측벽의 2등분선(sidewall bisector)에서 난류강도의 분포를 통해 바닥과 자유수면에서의 비등방성을 분석하고, AIM을 도입하여 흐름장 전반에 걸쳐 세부적인 비등방성 해석을 수행하였다. 측벽의 2등분선에서의 난류강도의 분포를 통해 바닥과 자유수면 근처에서 난류강도가 강한 비등방성을 갖는 것을 볼 수 있었다. 또한 3개의 다른 영역에서 AIM의 도입을 통해 측벽이나 바닥근처에서는 난류의 비등방성이 구형 관수로 흐름과 유사한 것으로 나타났으나, 개수로 난류흐름의 주된 특성이 velocity-dip phenomena가 존재하는 영역에서는 구형 관수로 흐름과는 달리 천이영역이 존재한다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : DNS, 난류의 비등방성, 난류강도, AIM

1. 서론

하천흐름은 대표적인 개수로 흐름으로서, 유체역학분야에서 다루는 흐름 중 비교적 레이놀즈 수가 크다. 따라서 하천공학자들은 수치해석을 통해 개수로 난류흐름을 해석하는 데에 있어서 공학적으로 유용한 난류모형을 주로 사용해 오고 있다. 그러나 난류모형에 의한 연구는 난류흐름 내에 존재하는 다양한 물리적 현상을 설명할 수 없다는 한계를 지니고 있다. 따라서 근래에 들어 난류흐름에 대한 정확하고 다양한 정보를 줄 수 있는 DNS(Direct Numerical Simulation)나 LES(Large Eddy Simulation)에 대한 관심이 높아지고 있다.

DNS는 난류흐름 내에 존재하는 모든 거동을 해석할 수 있기 때문에 난류구조 및 벽 영향 등에 대한 해석을 위한 가장 정확한 수치해석방법으로 여겨지고 있다(Launder, 1990). DNS를 수행하기 위해서는 계산량을 레이놀즈 수의 3승과 비례하게 부여해야 하기 때문에, 현재의 계산능력으로 일반적인 하천흐름을 모의하는 것은 불가능하다. 그러나 3차원 순간유속 및 압력장을 포함하는 DNS 자료는 난류흐름에 대한 물리적 특성에 대한 실험연구를 보완할 수 있는 정보를 제공할 수 있을 뿐만 아니라(Kim 등, 1987), 난류모형의 구축에 있어서도 유용하게 사용될 수 있기 때문에

* 정회원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정 · E-mail : truss96@yonsei.ac.kr

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수 · E-mail : schoi@yonsei.ac.kr

*** 비회원 · Post Doctoral Fellow, Center for Environmental Medicine and Lung Biology, University of North Carolina at Chapel Hill · E-mail : choi.jung-il@epa.gov

그 가치가 높다.

측벽이 존재하는 개수로 흐름에 대한 LES를 수행한 연구사례(Thomas와 Williams, 1995; Shi 등, 1999; Broglia 등, 2003)가 몇몇 존재한다. Thomas와 Williams(1995)와 Shi 등(1999)은 모형의 성향이 강한 LES를 수행하였기 때문에 흐름 내에 존재하는 세부적인 사항을 설명하기에는 다소 미흡하다. 반면에 Broglia 등(2003)은 다소 조밀한 격자를 도입하였기 때문에 흐름에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있었다. Broglia 등(2003)은 bulk 레이놀즈 수가 5571, 9844, 17130인 개수로 난류흐름에 대한 LES를 수행하였다. 이들은 자유수면 부근에서 발생하는 외부이차흐름(outer secondary flows)과 내부이차흐름(inner secondary flows)의 특성과 이들이 평균흐름과 난류구조에 미치는 영향을 중점적으로 분석하였다. Joung 등(2004)은 전단레이놀즈 수가 198과 315인 개수로 난류흐름에 대한 DNS를 수행하여 내부이차흐름에 대한 레이놀즈 수의 영향을 분석하였으며, 사분면 해석(quadrant analysis)를 통해 내부이차흐름의 생성메커니즘을 밝힌 바 있다.

본 연구에서는 Joung 등(2004)에서 수행된 DNS의 자료를 이용하여 측벽이 존재하는 개수로 난류흐름에 대한 비등방성 해석을 수행하고자 한다. 측벽의 2등분선(sidewall bisector)에서 난류강도의 분포를 통해 바닥과 자유수면에서의 비등방성을 분석하고, Lumley와 Newman(1977)이 제안한 AIM(anisotropy-invariant map)을 도입하여 흐름장 전반에 걸쳐 세부적인 비등방성 해석을 수행하고자 한다.

2. 수치해석

본 연구는 Joung 등(2004)에 의해 수행된 전단레이놀즈 수가 198인 개수로 난류흐름에 대한 DNS 자료를 토대로 수행되었다. 지배방정식의 시간 및 공간차분을 위해 Kim 등(2002)이 제안한 완전음해분리기법을 사용하였다. 이 기법은 Kim과 Moin(1985)이 제시한 부분단계법을 개선한 것으로 속도계산에 있어 반복이 필요하지 않고, 정확도 및 안정성이 검증된 효율적인 기법이다.

주흐름방향(x), 횡방향(y) 그리고 수면수직방향(z)으로 각각 $2\pi H \times H \times H$ 의 길이를 갖는 개수로에 대해 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석하였다. 흐름조건은 bulk 레이놀즈 수가 2770, 전단레이놀즈 수가 198이며, 수심에 대한 폭의 비가 1이다. 그리고 도입된 격자수는 x, y, z 방향으로 각각 $64 \times 96 \times 96$ 이며, 이에 따른 격자간격은 $\Delta x^+ = 19.5, 0.62 < \Delta y^+, \Delta z^+ < 3.46$ 이다. 수면($y/H=1$)에 주어진 경계조건은 수면방향으로의 변형이 제한된 조건과 수면에서 전단응력이 존재하지 않는다는 조건을 적용하였다. 상·하류단의 경계조건으로는 주기조건을 사용하였고, 바닥 및 양 측벽에는 비활조건이 적용되었다.

3. 수치모의결과

3.1 난류강도

그림 1은 측벽의 2등분선에서 난류강도의 수직분포를 나타낸 것으로, 모의결과를 Broglia 등(2003)의 LES 자료와 비교하였다. 모의결과가 Broglia 등(2003)의 LES 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 약간의 차이는 레이놀즈 수의 차에 의한 영향으로 판단된다. u_{rms} 의 최대값은 벽단위(wall units)로 약 14인 지점에서 발생하였는데, 이 결과는 Moser 등(1999)이 수행한 평판 난류흐름에 대한 DNS 결과와 동일하다. 이를 통해 Joung 등(2004)이 수행한 DNS 결과가 난류흐름에 대한 매우 정확한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

그림에서 바닥과 자유수면 근처에서 난류강도가 강한 비등방성을 갖는 것을 볼 수 있다. 바닥 근처에서 u_{rms} 가 가장 지배적인 것을 볼 수 있으며, v_{rms} 와 w_{rms} 는 서로 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 자유수면 부근의 분포를 보면 자유수면에 가까워질수록 u_{rms} 와 v_{rms} 가 증가하는 반면, w_{rms} 는 자유수면 경계조건에 의해 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히, v_{rms} 의 증가율이 u_{rms} 의 증가율보다 약간 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 수면수직방향과 횡방향 사이의 난류 운동에너지 교환이 수면수직방향과 주흐름방향 사이의 교환보다 더 강하기 때문이다(Nagaosa, 1999).

3.2 AIM

난류의 비등방성을 상세히 분석하기 위해 Lumley와 Newman(1977)이 제안한 AIM을 도입하였다. 이 도표는 다음과 같은 레이놀즈응력의 비등방 텐서로부터 얻을 수 있다.

$$b_{ij} = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{2K} - \frac{1}{3}\delta_{ij} \quad (1)$$

여기서 $K = \overline{u_i' u_j'}/2$ 는 난류운동에너지이다. 또한 AIM에서 정의되는 3개의 상수는 다음과 같이 표현된다.

$$I = b_{ii}, \quad II = -b_{ij}b_{ji}/2, \quad III = b_{ij}b_{jk}b_{ki}/3 \quad (2)$$

그림 2에서 볼 수 있듯이 $-II$ 와 III 의 관계곡선을 통해 다양한 난류의 비등방성이 결정된다. 등방성 난류는 곡선들의 최하단 위치($-II=III=0$)에 존재하며, 최상단은 비등방성이 가장 강한 상태인 일방향영역(one-component regime)을 의미한다. 일방향영역은 난류강도의 한 성분이 나머지 두 성분에 비해 지배적인 경우 나타난다. 그리고 상부곡선($II+3III+1/9=0$)은 이방향영역(two-component regime)을 나타내며, 두 하부곡선($II^3/27+III^2/4=0$)은 비대칭영역(axisymmetric regime)을 의미한다. 그림 2는 3개의 다른 영역($y/H=0.0016, 0.142, 0.5$)에서 $-II$ 와 III 의 관계곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 3개의 화살표는 각 영역에서 z 가 증가하는 방향을 나타낸다.

$y/H=0.0016$ 의 경우, 바닥근처에서는 두 벽이 존재하기 때문에 난류상태는 일방향영역이 된다. 바닥에서 점차 멀어질수록($z/H<0.3$), 난류상태는 상부곡선을 따라 점차 이방향영역으로 이동하다가 $z/H\approx 0.3$ 을 경계로 다시 상부곡선을 따라 점차 일방향영역을 향해 이동하는 것으로 나타났다. 자유수면부근에서 일방향영역을 나타내는 것은 자유수면에 부여된 경계조건($w=0$)에 의한 결과라 판단된다. $y/H=0.142$ 의 경우, 바닥근처($z/H<0.04$)에서 난류상태는 이방향영역이다. 바닥에서 멀어질수록 점차 비대칭영역으로 바뀌었다가, 다시 자유수면 부근에서는 이방향영역이 되는 것으로 나타났다. 마지막으로, 측벽의 2등분선($y/H=0.5$)에서 바닥근처의 난류거동은 수면수직방향 성분의 급격한 감소에 의해 이방향성을 보이면서, $z^+ \approx 9$ 까지 일방향영역을 향해 이동하는 것으로 나타났다. 이는 Vazquez와 Metais(2002)에 의한 구형 관수로 흐름의 분석결과와 동일하다. 수로중앙 부근에서는 등방성 난류거동을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 velocity-dip phenomena가 발생하는 영역인 $z/H>0.8$ 에서는 난류는 특정한 영역을 벗어난 천이상태에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이는 구형 관수로 흐름이나 평판흐름에서는 나타나지 않는 현상으로서, 측벽을 갖는 개수로 흐름이 매우 복잡한 난류특성을 갖고 있음을 의미하는 결과이다.

4. 결론

본 연구에서는 Joung 등(2004)이 수행한 DNS 자료를 이용하여, 측벽을 갖는 개수로 난류흐름에 대한 난류의 비등방성 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 측벽의 2등분선에서의 난류강도의 분포를 통해, 바닥과 자유수면 근처에서 난류강도가 강한 비등방성을 갖는 것을 볼 수 있었다. 바닥근처에서는 u_{rms} 가 가장 지배적이며, v_{rms} 와 w_{rms} 는 서로 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 자유수면 부근에서는 자유수면에 가까워질수록 u_{rms} 와 v_{rms} 가 증가하는 반면, w_{rms} 는 자유수면 경계조건에 의해 급격하게 감소하는 것을 확인하였다.

(2) 3개의 다른 영역에서 AIM의 도입을 통해, 영역별 난류거동이 서로 다른 특성을 갖는 것으로 나타났다. 측벽이나 바닥근처에서는 그 특성이 구형 관수로 흐름과 유사한 것으로 나타났으나, 개수로 난류흐름의 주된 특성이 velocity-dip phenomena가 존재하는 영역에서는 구형 관수로 흐름과는 달리 천이상태가 존재한다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Brogna, R., Pascarelli, A., and Piomelli, U.(2003). Large-eddy simulation of ducts with a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 484, pp. 223-253.
2. Joung, Y., Choi, S.-U., and Choi, J.-I.(2004). Direct numerical simulation of low Reynolds number turbulent flow in an open-channel with side walls, *The 6th International Conference on Hydroscience and Engineering*, Brisbane, accepted.
3. Kim, K., Baek, S.-J., and Sung, H.J.(2002). An implicit velocity decoupling procedure for the incompressible Navier-Stokes equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 38, pp. 125-138.
4. Kim, J. and Moin, P.(1985). Application of a fractional step method to incompressible Navier-Stokes equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 59, pp. 308-323.
5. Kim, J., Moin, P., and Moser, R.(1987). Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 177, pp. 133-166.
6. Launder, B.E.(1990). Phenomenological modelling: present...and future? *Whither Turbulence?*, *Turbulence at the Crossroads*(ed. J.L. Lumley), *Lecture Notes in Physics*, 357, 439, Springer.
7. Lumley, J.L. and Newman, G.R.(1977). The return to isotropy of homogeneous turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 82, pp. 161-178.
8. Nagaosa, R.(1999). Direct numerical simulation of vortex structures and turbulent scalar transfer across a free surface in a fully developed turbulence, *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 6, pp. 1581-1595.
9. Shi, J., Thomas, T.G., and Williams, J.J.R.(1999). Large-eddy simulation in a rectangular open channel, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 37, No. 3, pp. 345-361.
10. Thomas, T.G. and Williams, J.J.R.(1995). Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound open channel, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 33, No. 1, pp. 27-41
11. Vazquez, M.S. and Metais, O.(2002). Large-eddy simulation of the turbulent flow through a heated square duct, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 453, pp. 201-238.

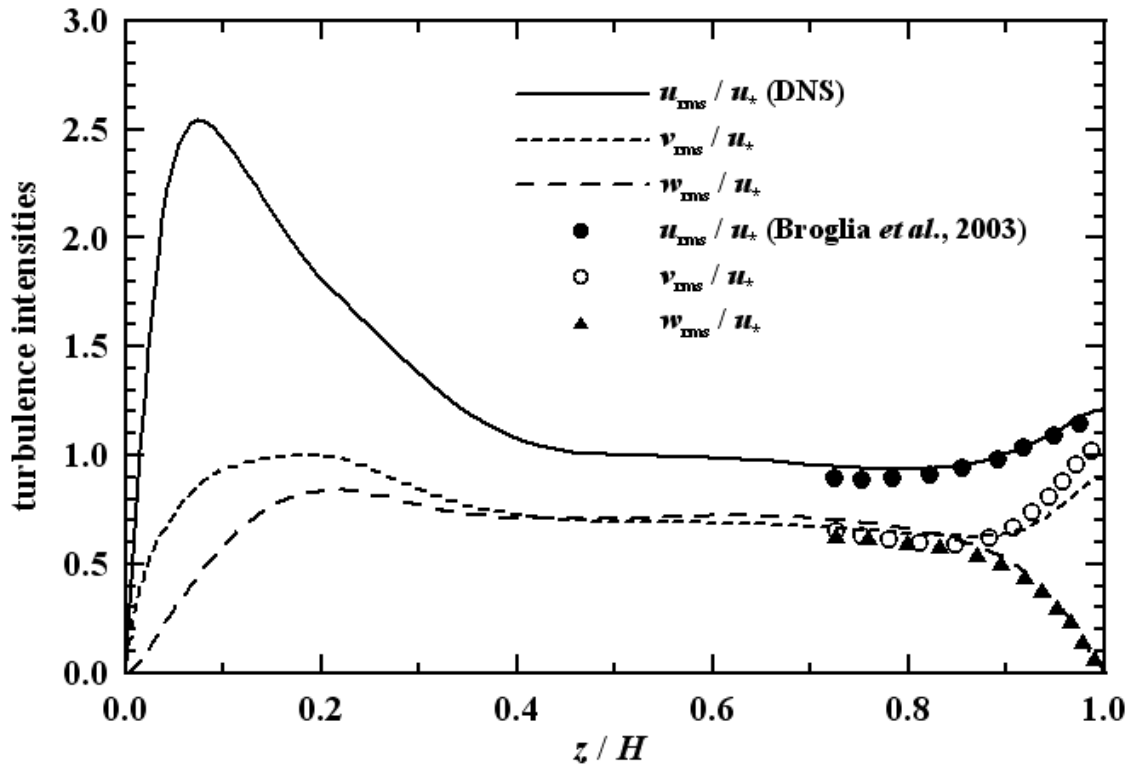


그림 1. 난류강도

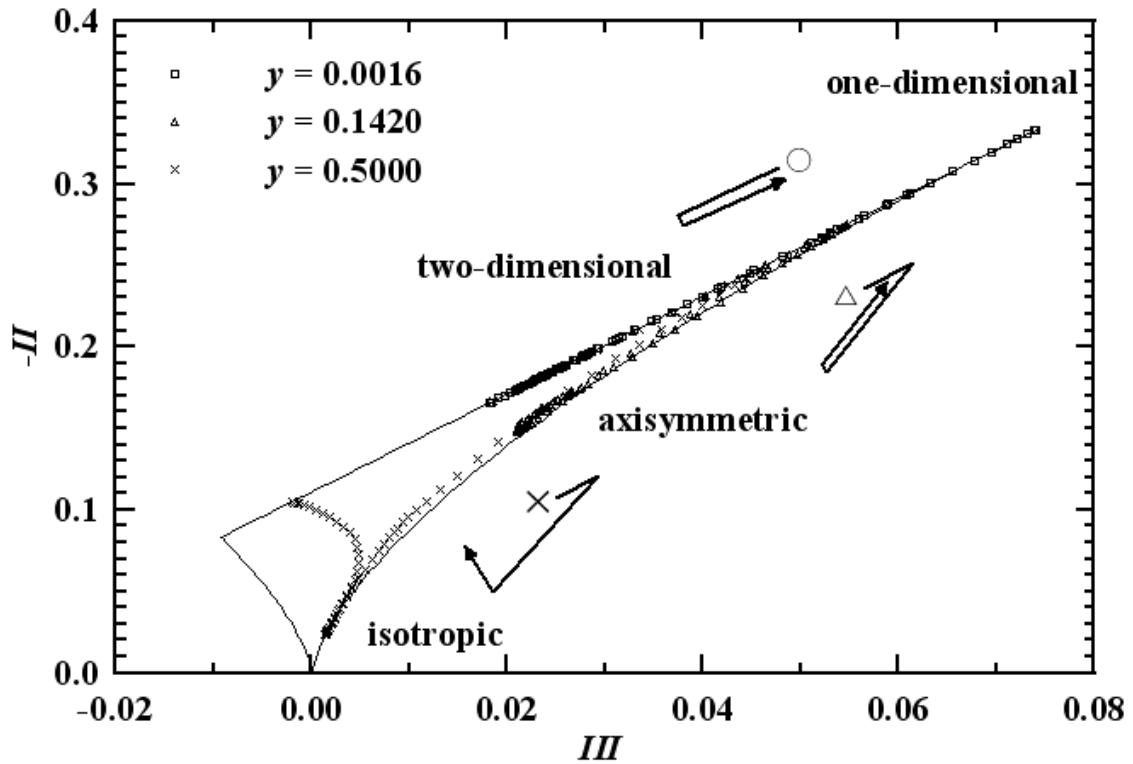


그림 2. AIM