

# OpenFOAM을 이용한 직사각형 개수로 흐름의 LES

반재웅\* · 최성욱\*\*

Ban, Chaewoong\*, Choi, Sung-Uk\*\*

## Large Eddy Simulation of Rectangular Open-Channel Flow using OpenFOAM

### ABSTRACT

This study presents numerical simulation of turbulent flows in a rectangular open-channel that has a width-to-depth ratio of 2 using the source code provided by OpenFOAM. Large eddy simulations are carried out by solving the filtered continuity and momentum equations numerically. For the non-isotropic residual stress term, Smagorinsky's (1963) model is used. The flow in the open-channel whose width-to-depth ratio is 2, from experiment of Tominaga et al. (1989), is simulated numerically. Simulation results are compared with measured data by Tominga et al. (1989) and Nezu and Rodi (1985) and with LES data by Shi et al. (1999). Comparisons revealed that the model simulates the mean flow and turbulence statistics well. Specifically, the model reproduced the inner secondary currents located at the corner of sidewall and free surface successfully. In addition, the vortical component of turbulence intensity shows bulged contours towards the bottom edge.

**Key words :** Large eddy simulation, Turbulence, OpenFOAM, Inner secondary currents, Reynolds stress, Turbulence intensity

### 초록

본 연구에서는 OpenFOAM에서 제공하는 소스 코드를 이용하여 폭-수심비가 2인 직사각형 개수로 흐름에 대해 수치모의를 수행하였다. 여과된 연속 방정식과 운동량 방정식을 해석하기 위하여 큰 와 수치모의를 이용하였고, 비등방성 잔여 응력항을 산정하기 위하여 Smagorinsky 모형(1963)을 사용하였다. LES 모형을 Tominaga et al. (1989)의 폭-수심비가 2인 실험수로에 적용하고 평균흐름 및 난류량을 비교하였다. 추가로 Nezu and Rodi (1985)의 실험 결과와 Shi et al. (1999)의 LES 모의 결과와 함께 비교를 수행하였다. 비교 결과 평균흐름 및 난류량 모두 기존 실험 및 모의 결과를 잘 재현하는 것으로 확인되었다. 특히 이차흐름 분포도에서 측벽과 자유수면의 접합부에서 발생하는 내부이차흐름이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 수심방향 난류강도의 경우 측벽과 바닥벽에서 난류강도의 등치선도가 측벽과 바닥벽의 접합부 방향으로 편향되는 현상을 확인하였다.

**검색어 :** 큰 와 수치모의, 난류, OpenFOAM, 내부이차흐름, 레이놀즈 응력, 난류강도

## 1. 서론

직사각형 개수로 흐름은 비록 단순한 형태의 개수로 흐름이지만, 벽과 자유수면의 경계에서 난류의 비등방성에 의해 매우 복잡한 흐름을 가지게 된다. 경계면과 수직인 방향으로 난류운동에너지가 증가하고 평행인 방향으로 감소하게 되므로 경계면에서 난류의 비등방성이 증가하게 된다. 이러한 난류의 비등방성은 직선 수로에서 이차흐름의 주요 생성원인이다(Nezu and Nakagawa, 1993).

\* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석박사통합과정 ([blue8803@yonsei.ac.kr](mailto:blue8803@yonsei.ac.kr))

\*\* 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 공과대학 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Yonsei University · [schoi@yonsei.ac.kr](mailto:schoi@yonsei.ac.kr))

Received January 9, 2014/ revised February 17, 2014/ accepted March 13, 2014

기존 실험 연구들을 살펴보면 협곡수로의 경우 크게 바다부근에서 발생하는 바닥 이차흐름(bottom secondary currents)과 자유수면 근처에서 발생하는 자유수면 이차흐름(free surface secondary currents)이 존재한다고 알려져 있다(Nezu and Rodi, 1985; Tominaga et al., 1989). 또한, 최근 연구에 의하면 측벽과 자유수면의 접합부에서 또 다른 작은 와가 존재한다고 밝혀졌다(Grega et al., 1995; Hsu et al., 2000). 이와 같은 작은 이차흐름은 내부이차흐름(inner secondary currents)이라 한다. 내부이차흐름의 크기는 주흐름방향 평균유속의 약 1%이고 그 외의 크기는  $y^+ = z^+ = 100$ 로 알려져 있다(Grega et al., 1995). 그리고 Kang and Choi (2006)와 Jung and Choi (2010)은 각각 RSM (Reynolds Stress Model)과 DNS (Direct Numerical Simulation)를 이용하여 내부이차흐름의 존재를 확인하고 이에 대해 분석하였다.

이러한 개수로 흐름에서 발생하는 이차흐름을 모의하기 위해서는 난류의 비등방성을 모의 할 수 있는 모형이 필요하다. 난류를 모의하는 방법은 크게 DNS, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), 그리고 LES (Large Eddy Simulation)로 나눌 수 있다. DNS는 Kolmogorov scale의 와를 포함한 모든 크기의 와를 모델링 없이 직접 수치 모의하는 기법으로 매우 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 레이놀즈 수의 증가에 따른 계산비용이 매우 크기 때문에 실제 흐름에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. RANS 모형은 Navier-Stokes 방정식을 시간 평균하여 평균흐름만을 모의하는 기법이다. 시간 평균하였기 때문에 변동성분에 대한 모의는 불가능하지만 계산비용에 있어 제한적이지 않다. DNS와 RANS의 중간역할인 LES는 큰 와에 대해서 직접 수치 모의를 하고, 작은 와에 대해서는 모델링을 통해 수치 모의한다. 이 중에 난류의 비등방성을 모의할 수 있는 모형으로는 DNS와 LES 그리고 RANS의 ASM (Algebraic Stress Model)과 RSM 등이 있다. LES 모형은 DNS에 비해 경제적이지만 격자의 구성에 따라 상당히 정확하게 모의한다. 난류구조와 시간변량을 가지는 유동성분을 더 정확히 모의하기 위하여 LES모형을 개수로 흐름에 적용한 연구들은 많이 진행되어왔다. Shi et al. (1999)는 LES를 이용하여 직사각형 개수로 흐름을 수치모의 하였고, LES 모형의 적용성을 검토하였다. Cater et al. (2008)과 Xie et al. (2012)는 LES모형을 이용하여 복단면 개수로 흐름에서 평균흐름과 난류량을 모의하고 횡방향으로의 운동량 전이에 관하여 분석을 수행하였다. Kara et al. (2012)는 복단면 개수로 흐름에서 주수로와 홍수터 수심비가 평균흐름과 난류량에 미치는 영향을 연구하였다. Jie and Neary (2008)는 침수식생이 있는 복단면 개수로 흐름을 LES 모형을 이용하여 모의하고, 침수식생이 난류흐름에 미치는 영향을 분석하였다. 국내에서는 Yang and Choi (2002)는 LES 모형을 이용하여 교각주의 3차원 수치모의를 수행하고 국부세굴(local scour)에 대해 분석하

였다. 그리고 국외에서는 개수로 흐름에 LES 모형을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있는 반면, 국내에서는 이와 관련된 연구가 거의 없는 상황이다. LES는 기존의 난류 모형과는 다르게 시간변량의 유동해석을 통해 난류의 통계적 특성을 구할 수 있는 이점이 있다. 이는 난류의 메커니즘을 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 OpenFOAM에서 제공하는 LES 모형을 개수로 흐름에 적용하여 평균흐름 및 난류량을 계산하였다. LES 모형은 Tominaga et al. (1989)의 폭수심비가 2인 매끈한 하상의 직사각형 개수로 흐름에 적용하였고, 평균흐름 및 난류량을 비교하고 모형을 검증하였다. 또한, 폭-수심비가 2이고 레이놀즈 수가 97,000으로 비슷한 흐름 조건의 Nezu and Rodi (1985)의 실험 결과와 Shi et al. (1999)의 LES 수치모의 결과와도 함께 비교하고 모의 결과를 분석하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 유동모형

LES의 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식을 공간 필터에 여과시켜 얻을 수 있는데, 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{U_i U_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\nu$ 는 물의 동점성 계수,  $\bar{p}$ 는 공간 여과된 수평 압력항,  $\bar{u}$ 는 여과 속도(filtered velocity), 그리고  $U$ 는 순간속도이다. Eq. (2)의 좌측 두 번째 항을 여과 속도와 잔여 속도(residual velocity)  $u'$ 으로 나누어 표시하면 다음과 같다.

$$\overline{U_i U_j} = \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} + \overline{u'_i \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u'_j} + \overline{u'_i u'_j} \quad (3)$$

Eq. (3)의 우측 오른쪽 3개 항은 여과(spatial averaging)과정에서 발생하는 잔여 응력항(residual stress)이다. 잔여 응력항을  $\tau_{ij}^R$ 이라고 정의하면 Eq. (3)의 좌측 두 번째 항을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{U_i U_j}) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\bar{u}_i \bar{u}_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^R) \quad (4)$$

Eq. (4)의 잔여 응력항을 비등방성 잔여 응력항  $\tau_{ij}^r$ 을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_r \delta_{ij} \quad (5)$$

여기서  $k_r$ 는 잔여 운동에너지,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다. Eq. (2)에 Eqs. (4) and (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같은 LES의 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_j} \quad (6)$$

### 2.2 Subgrid-scale 모형

지배방정식의 완결 문제를 해결하기 위해 여과 과정에서 발생한 비등방성 잔여 응력항에 대한 모델링이 필요하다. 비등방성 잔여 응력항을 산정하기 위한 방법 중 Smagorinsky (1963)가 제안한 모형은 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_r \bar{S}_{ij} \quad (7)$$

여기서  $\bar{S}_{ij}$ 는 여과 속도에 대한 변형률,  $\nu_r$ 는 잔여유속의 난류 점성계수이다. 잔여유속의 난류 점성계수를 정의하기 위해 혼합거리 모형을 사용하면 난류 점성계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\nu_r = l_s^2 \bar{S} \quad (8)$$

$$l_s = C_S (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (9)$$

$$\bar{S} = (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

여기서  $l_s$ 는 Smagorinsky 특성 길이,  $\bar{S}$ 는 여과된 특성 변형률,  $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 는 각 방향의 필터의 크기, 그리고  $C_S$ 는 Smagorinsky 상수로 일반적으로 전단흐름의 경우 0.065-0.1 사이의 값을 사용한다. 본 연구에서는 Smagorinsky 상수로 0.1을 사용하였다.

### 2.3 특성 길이

본 연구에서 사용된 격자의 구성은 점성저층(viscous sublayer)과 완충구간(buffer layer)을 계산하기에 충분하지 않다. 이를 보완하

기 위하여 van Driest (1956)가 제안한 감쇠함수(damping function)를 사용하였다.

$$l_S = C_S (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} f(z^+) \quad (12)$$

$$f(z^+) = 1 - e^{-z^+/A^+} \quad (13)$$

여기서  $z^+$ 는 벽면으로부터 수직방향으로의 무차원 거리로  $z^+ = \frac{zu_*}{\nu}$ 이고,  $u_*$ 는 전단속도,  $A^+$ 는 경험상수로 25이다.

### 3. 수치해석 방법 및 적용

본 연구에서는 여과된 연속 방정식과 운동량 방정식을 계산하기 위해서 OpenFOAM에서 제공하는 LES 소스코드를 이용하였다. OpenFOAM은 소스 코드가 공개된 전산유체역학 해석을 위한 소프트웨어 패키지이다. OpenFOAM에서 제공하는 해석코드는 직교좌표계에서 유한체적법을 이용하고, 지배방정식을 이산화하기 위하여 직교좌표계에서 Harlow and Welch (1965)가 제안한 엇갈린 격자체계를 이용하였다. 차분 기법으로는 압력과 확산항에 대해 중앙 차분법을 사용하고, 시간항에 대해 후방 차분법을 사용하였다. 유속 압력 상관관계를 계산하기 위하여 Issa et al. (1986)이 제안한 PISO 알고리즘을 사용하였다. Fig. 1은 경계조건과 계산영역에 대한 모식도이다. 유입-유출부의 경계조건으로는 흐름이 완전히 발달되었다는 가정 하에 주기적 조건을 적용하였다. 측벽과 바닥벽에서는 비활동 조건(no-slip)을 이용하였고, 자유수면 경계 조건은 대칭 조건(symmetry condition)으로 하였다. 계산영역은 주흐름방향에서 6H로 모든 유속성분의 주흐름방향 상관성(streamwise correlation)이 거의 0이 되는데 충분하다. 또한 횡방향으로의 계산 영역을 2H로 설정하여 폭-수심비가 2가 되도록 하였다. 총 계산 영역은 6H×2H×H으로 각각 주흐름방향, 횡방향, 연직방향을 의미

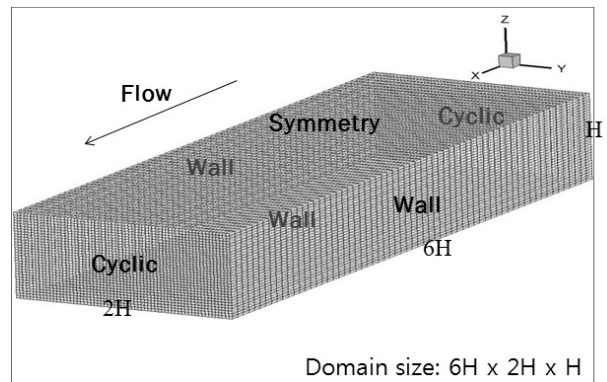


Fig. 1. Computational Setup and Boundary Conditions for LES

한다. 이 계산영역은  $128 \times 128 \times 64$  개의 절점으로 이산화 하였으며, 격자간 거리는 무차원 거리로  $\Delta x^+ = 112$ ,  $\Delta y^+ = 37$ ,  $\Delta z^+ = 37$ 이다. 이는 기존의 Shi et al. (1999)에 비해 조밀한 격자구성으로 더 정확한 모의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 매끄러운 하상의 직사각형 개수로에서 평균 흐름과 난류량을 수치 모의하기 위하여 Tominaga et al. (1989)의 폭-수심비가 2인 매끈한 하상의 직사각형 실험수로에 적용하였다. Table 1은 Tominaga et al. (1989)에서 사용한 실험수로의 제원이다. 수치모의 결과는 Tominaga et al. (1989)와 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와 비교하고 모형을 검증하였다. Shi et al. (1999)의 기존 LES 모형의 수치모의 결과와도 비교하였다. 모의 조건 및 비교 대상은 73,000-97,000의 다소 큰 레이놀즈 수를

Table 1. Experimental Conditions of Open-Channel Flow with Smooth Bed (Tominaga et al., 1989)

$H$ (m)	$B$ (m)	$B/H$	$U_{mean}$ (m/s)	$U_{max}$ (m/s)	$Re$ ( $\times 10^4$ )	$Fr$
0.2	0.4	2	0.192	0.244	7.31	0.18

가진 흐름이다, 따라서 레이놀즈 수의 차이는 흐름 구조에 있어 큰 영향이 없기 때문에 비교가 타당하다고 판단된다.

#### 4. 수치모의 결과

Fig. 2는 주흐름방향으로의 평균유속 분포도이다. 그림에서 평균유속 분포는 단면 최대 유속으로 무차원화 되었다. 그림에 따르면 본 연구에서 사용한 LES 모형의 결과는 기존의 실험 및 수치모의 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 특히, 최대유속의 발생이 자유수면 아래에 위치하는 최대유속점 침강현상(velocity dip)을 매우 잘 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과 약  $z = 0.7H$ 에서 유속의 최대점이 발생하여 Nezu and Rodi (1985)의 실험 결과  $z = 0.63H$ , Tominaga et al. (1989)의 실험 결과  $z = 0.7H$  그리고 기존 LES 모의 결과  $z = 0.7H$ 로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 이차흐름의 벡터도이다. 본 연구의 LES 모형은 자유수면에 형성되는 이차흐름과 바닥에서 형성되는 이차흐름 모두 잘 모의하는 것을 볼 수 있으며, Nezu and Rodi (1985)의 실험 결과와

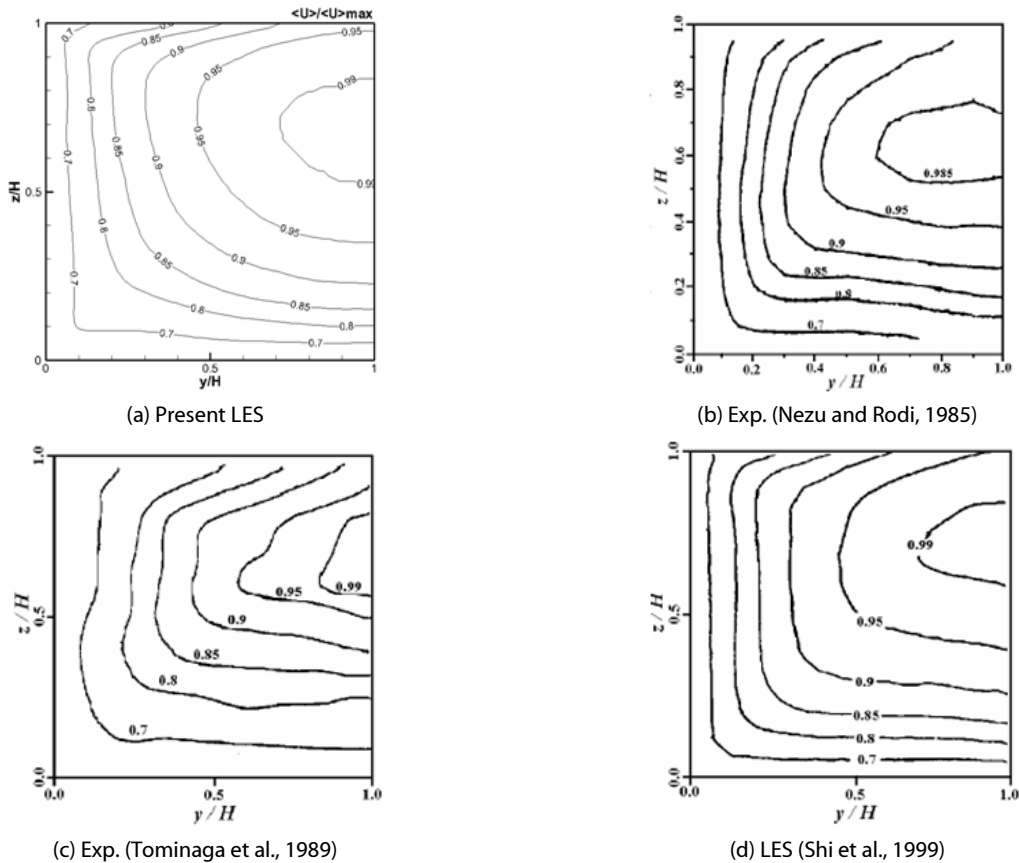
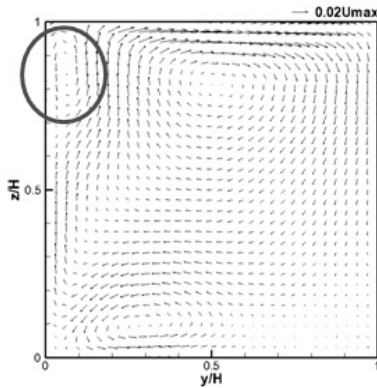


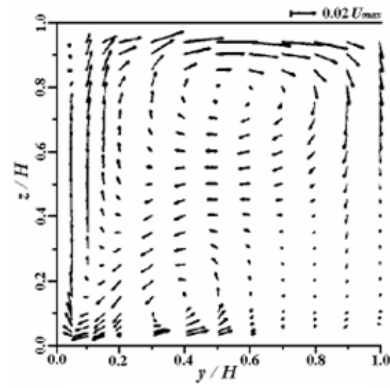
Fig. 2. Streamwise Mean Velocity  $\langle U \rangle / \langle U \rangle_{max}$

Shi et al. (1999)의 결과와도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 계산된 이차흐름의 최대 크기는 주흐름방향 최대유속의 약 2%로 계산되었으며, 이는 Nezu and Rodi (1985)와 Tominaga et al. (1989)의 결과와 일치한다. 또한 측벽과 자유수면의 접합부에서 작은 크기의 내부이차흐름을 볼 수 있다. 이 내부이차흐름은 주흐름방향 최대유속의 1% 정도의 크기로 산정되었고, 약  $y^+ = z^+ = 100$  정도의

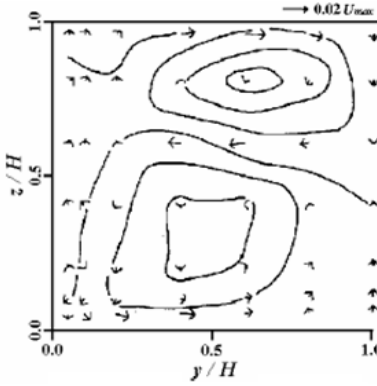
와의 크기를 가지는 것으로 확인되었다. 이는 협폭수로에서 나타나는 이차류의 특성이며, 기존의 Grega et al. (1995)에서 제시한 내용에 부합하는 결과이다. 그러나 그림에서 기존의 실험 및 수치모의 결과에서는 이러한 내부이차흐름이 존재하지 않는데 레이놀즈수가 큰 흐름인데 비해 격자수가 충분하지 않아 이러한 현상을 볼 수 없는 것으로 판단된다. 마찬가지로 Hsu et al. (2000)은



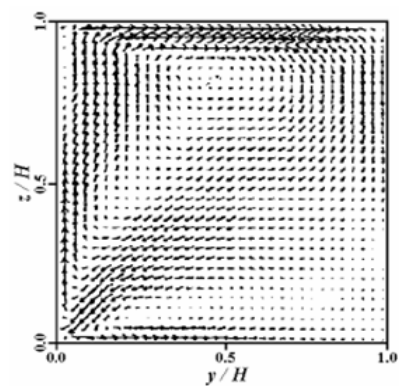
(a) Present LES



(b) Exp. (Nezu and Rodi, 1985)

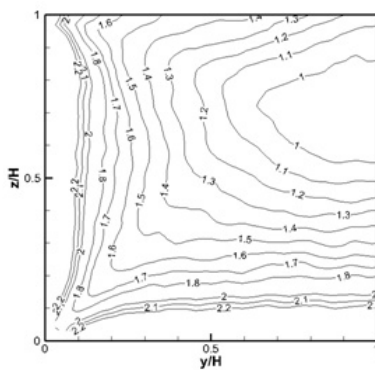


(c) Exp. (Tominaga et al., 1989)

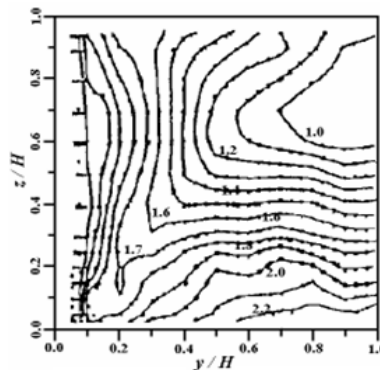


(d) LES (Shi et al., 1999)

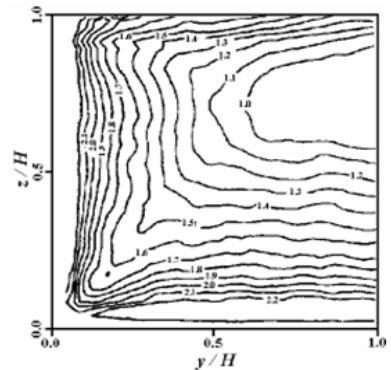
Fig. 3. Secondary Currents Vectors



(a) Present LES



(b) Exp. (Nezu and Rodi, 1985)



(c) LES (Shi et al., 1999)

Fig. 4. Turbulence Intensity  $\langle u' \rangle / u_\tau$

기존의 실내 실험의 결과와 수치 모의의 결과에서 내부이차흐름이 관찰되지 않은 이유로 낮은 해상도(resolution)를 언급하였다.

Fig. 4는 주흐름방향 난류강도의 분포도이다. 그림에서 주흐름 방향 난류강도는 전단속도로 무차원화 되었다. 수치모의 결과는 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와 Shi et al. (1999)의 모의 결과와 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 난류강도의 분포를 살펴보면 바닥벽과 측벽 그리고 자유수면에서 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 벽과 자유수면의 경계에서 난류운동에너지의 재분배 현상을 나타낸다. 또한 주흐름방향 난류강도는 약  $z = 0.7H$ 인 지점에서 극부적인 최소값을 가지는데, Nezu and Nakagawa (1993)는 이를 최대유속점 침강 현상에 의한 것으로 설명하고 있다.

Fig. 5는 수심방향 난류강도의 분포도이다. Fig. 4와 마찬가지로 전단속도로 무차원화 되었으며, 수치모의 결과는 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와 Shi et al. (1999)의 모의 결과와 매우 비슷한 것을 볼 수 있다. 그림에서 자유수면으로 갈수록 감소하고 측벽으로 향할수록 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한, 측벽과 바닥벽의

접합부에서 난류강도의 분포가 접합부 방향으로 편향되는 것을 볼 수 있다. 그러나 Shi et al (1999)의 모의 결과에서는 이러한 현상이 뚜렷하지 않은 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 레이놀즈 응력의 분포도이다. 레이놀즈 응력은 전단속도로 무차원화 되었다. 수치모의 결과 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와 Shi et al. (1999)의 모의 결과와 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 바닥에서 큰 값을 가지고 점점 감소하다가 0이 되고 자유수면 아래에서는 음의 값을 가진다. 이러한 분포를 난류와점성 개념과 연관지으면 레이놀즈 응력과 주흐름방향 유속의 속도경사와의 관계를 생각해 볼 수 있다. 즉, 레이놀즈 응력은 속도경사와 비례하게 되는데, 바닥부근에서는 z-방향으로 유속이 급격히 증가하다가 최대유속점이 발생하는 지점에서 속도경사가 음의 부호로 바뀌고 다시 자유수면에 가까워지면서 유속이 감소하는 것을 볼 수 있다.

Nezu and Nakagawa (1993)은 이차흐름의 생성의 원인을 난류의 비등방성의 분포( $\partial^2(\langle w'^2 \rangle - \langle v'^2 \rangle) / \partial y \partial z$ )로 설명하고 있다. 개수로흐름에서 벽과 자유수면과 같은 경계면에 수직인 방향으로

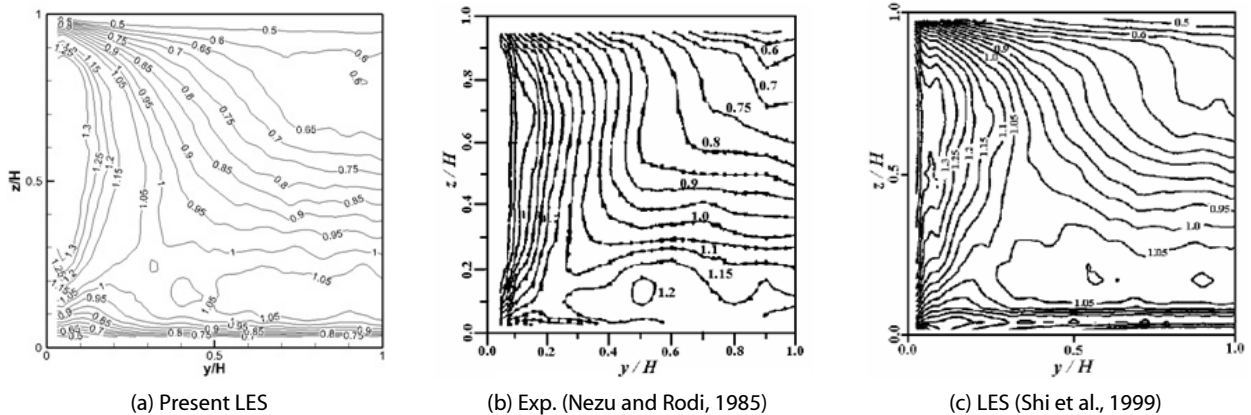


Fig. 5. Turbulence Intensity  $\langle w' \rangle / u_\tau$

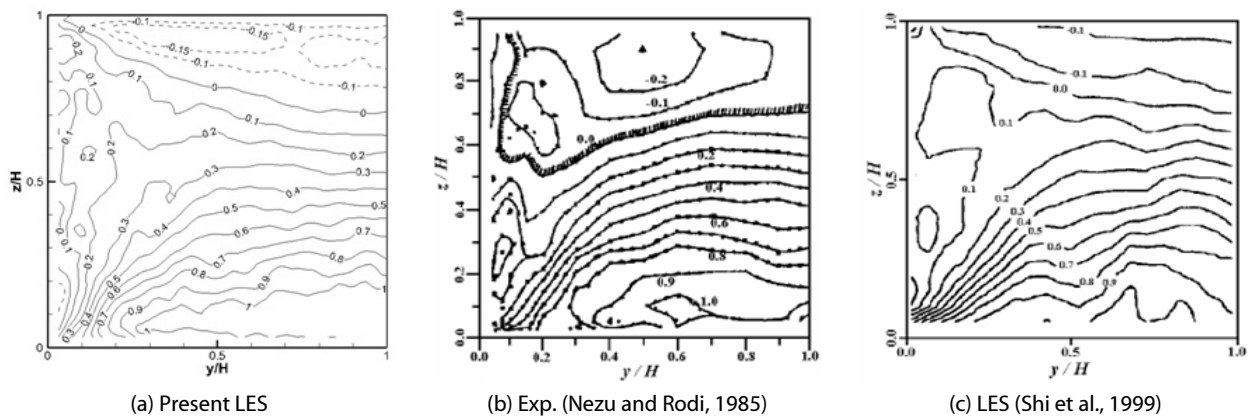


Fig. 6. Reynolds Shear Stress  $-\langle u'w' \rangle / u_\tau^2$

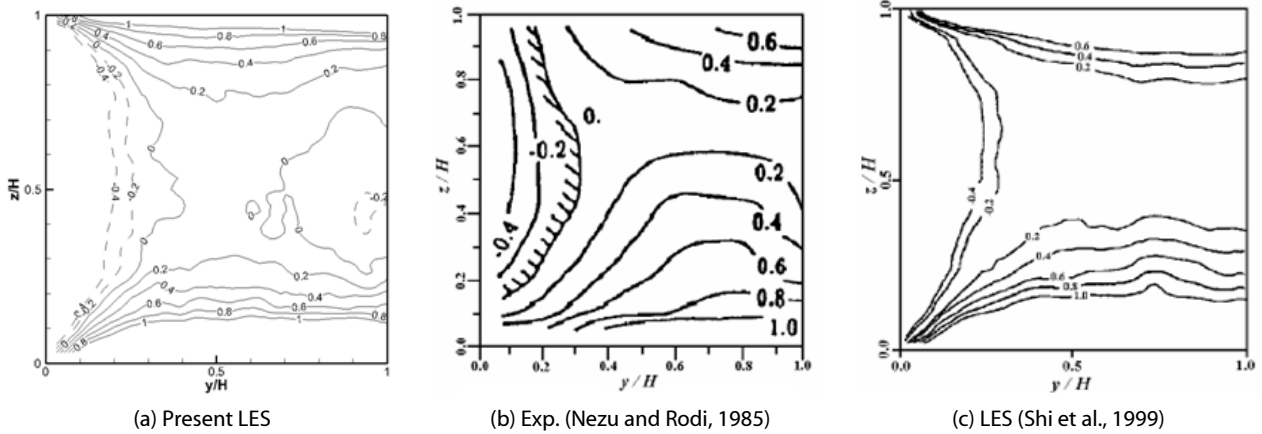


Fig. 7. Anisotropy of Turbulence  $(\langle v'^2 \rangle - \langle w'^2 \rangle) / U_{\max}^2 \times 10^3$

난류운동에너지가 감소하고, 평행한 방향으로 난류운동에너지가 증가한다. 이로 인해 증가한 비등방성은 이차흐름의 생성에 기여한다. Fig. 7은 난류 비등방성의 분포도이다. 그림에서 수치모의 결과 벽과 자유수면의 영향으로 경계면에서 비등방성이 증가하고 수로 중앙으로 갈수록 비등방성이 줄어 0에 가까워지는 경향을 보인다. 이는 Nezu and Rodi (1985)의 실험결과와 Shi et al. (1999)의 모의 결과와 대체로 비슷한 경향을 보인다. 그러나 수로중앙에서는 실험 결과에 비해 다소 작게 모의하였고, 수로 벽면에서는 다소 크게 모의하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 LES 모형을 이용하여 매끈한 하상의 직사각형 개수로 흐름을 수치 모의하였다. LES 모형에 의한 수치모의 결과를 Shi et al. (1999)의 LES 수치모의 결과와 Nezu and Rodi (1985)와 Tominaga et al. (1989)의 실험 결과와 비교하여 평균흐름과 난류량을 분석하였다. 주 흐름방향의 평균 유속 분포에 대해 기존 실험 및 모의 결과와 유사한 최대유속 침강점을 보였고, 이차흐름 역시 기존 실험 및 모의결과와 비슷한 양상을 보였다. 그러나 더 조밀한 격자점을 사용하였기 때문에 기존 연구에서 나타나지 않은 내부이차흐름을 확인하였다. 주흐름방향 난류강도의 경우 대체로 기존 실험 결과와 수치모의 결과와 일치하였다. 또한, 최대유속점 침강점과 비슷한 위치에서 주흐름방향 난류강도의 최소값을 보여주었다. 수심방향 난류강도 역시 기존 실험 결과와 수치모의 결과와 비슷한 양상을 보였으며, 측벽과 바닥벽의 접합부에서 난류강도의 분포가 편향되는 것을 잘 예측하였다. 레이놀즈 응력의 경우 기존 실험 및 수치모의 결과와 비슷한 결과를 보여주었고, 주흐름방향 유속의 변화를 분명히 반영하였다. 난류의 비등방성의 경우 정량적으로는

잘 예측하지 못했으나 대체로 기존 실험과 모의 결과와 유사한 분포를 보여주었다. OpenFOAM에서 제공하는 LES 모형은 대체로 정확한 모의 결과를 얻을 수 있었으며, 향후 dynamic sub-grid 모형을 적용하여 다양한 흐름 및 지형조건을 분석하고 난류의 조직적인 구조에 대한 분석이 가능할 것으로 기대한다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2012R1A2A2A02047549). 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- Cater, J. E. and Williams, J. J. R. (2008). "Large eddy simulation of a long asymmetric compound channel." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 4, pp. 445-453.
- Cui, J. and Neary, V. S. (2008). "LES study of turbulent flows with submerged vegetation." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 3, pp. 307-316.
- Grega, L. M., Wei, T., Leighton, R. I. and Neves, J. C. (1995). "Turbulent mixed-boundary flow in a corner formed by a solid wall and a free surface." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 294, pp. 17-46.
- Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface." *Physics of Fluids*, Vol. 8, p. 2182.
- Hsu, T. Y., Grega, L. M., Leighton, R. I. and Wei, T. (2000). "Turbulent kinetic energy transport in a corner formed by a solid wall and a free surface." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 410, pp. 343-366.
- Issa, R. I., Gosman, A. D. and Watkins, A. P. (1986). "The

- computation of compressible and incompressible recirculating flows.” *Journal of Computational Physics*, Vol. 62, No. 1, pp. 62-82.
- Joung, Y. and Choi, S. U. (2010). “Direct numerical simulation of low Reynolds number flows in an open-channel with sidewalls.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 62, No. 8, pp. 854-874.
- Kang, H. and Choi, S. U. (2006). “Reynolds stress modelling of rectangular open-channel flow.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 51, No. 11, pp. 1319-1334.
- Kara, S., Stoeeser T. and Sturm T. W. (2012). “Turbulence statistics in compound channels with deep and shallow overbank flows.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 5, pp. 482-493.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Nezu, I. and Rodi, W. (1985). “Experimental study on secondary currents in open channel flow.” *21<sup>st</sup> IAHR Congress*, Melbourne, Australia, Vol. 2, pp. 19-23.
- Patankar, S. V. and Spalding, D. B. (1972). “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, No. 10, pp. 1787-1806.
- Shi, J., Thomas, T. G. and Williams, J. J. R. (1999). “Large-eddy simulation of flow in a rectangular open channel.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 3, pp. 345-361.
- Smagorinsky, J. (1963). “General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment.” *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. (1989). “Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 149-173.
- Van Driest, E. R. (1956). “On the turbulent flow near a wall.” *Journal of Aeronautical Science*, Vol. 23, pp. 1007-1011.
- Xie, Z., Lin, B. and Falconer, R. A. (2012). “Large-eddy simulation of the turbulent structure in compound open-channel flows.” *Advances in Water Resources*, Vol. 53, pp. 66-75.
- Yang, W. and Choi, S. U. (2002). “Three-dimensional numerical simulation of local scour around the bridge pier using large eddy simulation.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 4-B, pp. 437-446 (in Korean).