

LES를 이용한 직사각형 개수로 난류흐름의 조직구조 분석

반재웅* · 최성욱**

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

Analysis of Coherent Structure of Turbulent Flows in the Rectangular Open-Channel Using LES

ABSTRACT

This study presented numerical simulations of smooth-bed flows in the rectangular open-channel using the source code by OpenFOAM. For the analysis of the turbulent flow, Large Eddy Simulations were carried out and the dynamic sub-grid scale model proposed by Germano et al. (1991) is used to model the residual stress term. In order to analyze the coherent structure, the uw quadrant method proposed by Lu and Willmarth (1973) is used and the contribution rate and the fraction time of the instantaneous Reynolds stress are obtained in the Reynolds stress. The results by the present study are analyzed and compared with data from previous laboratory studies and direct numerical simulations. It is found that the contribution rate of the ejection events is larger than that of sweep events over the buffer layer in the open-channel flow over the smooth bed, however, the frequency of the sweep event is higher than that of the ejection events.

Key words : Turbulence, Coherent structure, Bursting phenomena, uw quadrant threshold, Large eddy simulation, OpenFOAM

초 록

본 연구에서는 OpenFOAM에서 제공하는 소스코드를 이용하여 매끄러운 하상의 직사각형 개수로 흐름에 대해 수치모의를 수행하였다. 난류 해석을 위해 LES를 수행하였는데, 비등방성 잔여 응력항을 모델링하기 위해서 Germano et al. (1991)이 제시한 Dynamic Subgrid-scale 모형을 이용하였다. 조직구조를 분석하기 위하여 Lu and Willmarth (1973)가 제시한 uw 사분면기법을 이용하여 순간레이놀즈 응력이 레이놀즈 응력에 미치는 영향을 기여율과 시간비로 나누어 분석하였다. LES 모의 결과를 토대로 기존 실험 및 DNS 모의 결과와 비교하고 분석하였다. 매끈한 하상을 가진 개수로 흐름에서 완충층 이후의 구간에서 분출현상이 쓸기현상에 비해 레이놀즈 응력의 양의 생성에 기여하는 바가 크지만, 분출현상에 비해 쓸기현상의 발생빈도가 큰 것으로 확인되었다.

검색어 : 난류, 조직구조, Bursting 현상, uw 사분면기법, 큰 와 수치모의, OpenFOAM

1. 서론

Kline et al. (1967)은 수소기포 가시화실험(hydrogen-bubble visualization)을 이용해 저층(sublayer)에서 상대적으로 유속이 빠른 고속영역(high-velocity streaks)과 유속이 느린 저속영역(low-velocity streaks)으로 구분이 되는 것을 확인하고, 저속영역에서 상승(lift-up), 진동(oscillation), 분출현상(ejection)의 일련의 과정을 밝혀냈다. Corino and Brodkey (1969)는 Kline et al. (1967)과 동일한 현상을 확인하고, 추가로 고속영역에서 하강류가 나타나는 현상과 쓸기현상(sweep)을 밝혀냈다. Kline et al. (1967)과 Corino and

* 연세대학교 대학원 토목환경공학과 석박사통합과정 (Yonsei University · blue8803@yonsei.ac.kr)

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

Received March 31, 2014/ revised May 5, 2014/ accepted June 30, 2014

Brodkey (1969)가 밝혀낸 상승, 진동, 분출, 쓸기의 일련의 과정을 Bursting 현상(Bursting phenomena)이라고 한다.

난류의 Bursting 현상은 하상 토립자나 부유사의 농도와 같은 스칼라량의 이송과 밀접한 관계가 있는 것으로 밝혀지고 있다. Niño and Garcia (1996)은 유사의 거동은 Bursting 현상과 관련이 있는 것으로 밝혔고, Gyr and Schmid (1997)은 벽 근처의 유사의 거동이 저속 영역에서 상승과 분출현상에 의해 영향을 받는다고 보았다.

과거의 조직구조의 분석은 주로 실험적 연구에 의해 수행되어 왔다. 최근에서야 수치모의를 기반으로 한 조직구조 연구가 활발히 진행되기 시작하였다. 난류를 모의하는 방법으로는 크게 DNS (Direct Numerical Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모형, 그리고 LES (Large Eddy Simulation)가 있다. 작은 규모의 와(渦)는 무작위성을 지닌 아주 미세한 구조의 등방성 난류로 구성되어 있다. 하지만, 큰 규모의 와(渦)는 평균흐름과의 상호작용에 의해 조직적으로 변하는 구조를 가지고 있다. RANS의 경우 모든 크기의 규모의 와를 대표하는 크기를 활용해서 시간 평균된 Navier-Stokes 방정식을 해석하기 때문에, 변동성분에 의한 조직적 변동 구조를 지닌 난류를 해석하기엔 적합하지 않다. LES 또는 DNS는 큰 규모의 와(渦)에 대해서 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석하기 때문에 조직구조를 분석하는데 적합한 도구이다. 하지만, 큰 레이놀즈 수를 가진 흐름에서 계산비용을 고려하게 된다면 DNS보다 LES 모형이 더 적합하다고 판단된다.

최근에 Nezu and Sanjou (2008)은 침수식생 개수로 흐름에서 실험 결과를 토대로 uw사분면 기법을 적용하였고, 추가로 LES 모형을 이용해서 식생의 캐노피에서 발달하는 큰 규모의 와(渦) 조직에 대해서 예측하였다. Okamoto and Nezu (2010)는 침수식생 개수로 흐름에서 실험과 LES 모형을 이용해 식생의 캐노피에서 발생하는 조직구조에 대한 비교·분석 연구를 수행하였다. 이러한 LES 모형을 활용한 조직구조에 대한 연구가 활발한 상황인데, 국내에서는 LES를 이용한 흐름 모의 및 추가적인 조직구조에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 LES 모형을 이용하여 매끈한 하상의 직사각형 개수로 흐름을 모의하고, Bursting 현상을 분석하고자 한다. Bursting 현상의 구조를 규명하기 위한 기법으로는 대표적으로 Blackwelder and Kaplan (1976)에 의해 제안된 VITA (Variable Interval Time Average) 기법과 Lu and Willmarth (1973)에 의해 제안된 uw 사분면 기법(uw quadrant threshold)이 있다. 본 연구에서는 Bursting 현상을 분석하기 위해서 uw 사분면 기법을 이용하고자 한다. 매끈한 하상에서 LES모형을 이용한 조직구조의 분석은 향후 다방면의 흐름에서의 조직구조 연구에 기반이 될 수 있을 것이다.

2. 지배방정식

2.1 유동모형

LES의 지배방정식은 연속 방정식과 운동량 방정식을 공간 필터에 적용하여 여과(spatial averaging)시켜 얻을 수 있다. 여과된 연속방정식과 운동량방정식은 각각 다음과 같다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2}$$

여기서 u_i 는 x_i 방향으로의 순간속도(instantaneous velocity), $\overline{u_i}$ 는 x_i 방향으로의 여과 속도(filtered velocity), \overline{p} 는 여과된 압력(filtered pressure), ρ 는 물의 밀도, ν 는 물의 동점성 계수이다. Eq. (2)의 좌측 두 번째 항을 잔여 응력항(subgrid-scale stress) τ_{ij}^{SGS} 으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \tag{3}$$

Eq. (3)을 Eq. (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 LES의 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} \tag{4}$$

2.2 Subgrid-scale 모형

지배방정식의 완결 문제(closure problem)을 해결하기 위해 여과 과정에서 발생한 비등방성 잔여 응력항에 대한 모델링이 필요하다. 잔여 응력항은 다음과 같이 등방성 요소와 비등방성 요소로 나뉘게 된다.

$$\tau_{ij}^{SGS} = \tau_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{kk}^{SGS} \delta_{ij} \tag{5}$$

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다. 비등방성 잔여 응력항 τ_{ij} 를 와점성 개념(eddy-viscosity concept)에 의해 나타내면 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \tag{6}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

여기서 \bar{S}_{ij} 는 여과 속도에 대한 변형률, ν_t 는 잔여유속의 난류 점성계수이다. 혼합거리 모형을 사용하여 잔여유속의 난류 점성계수를 정의하면 다음과 같다.

$$\nu_t = \rho C \Delta^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (8)$$

$$|\bar{S}_{ij}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2} \quad (9)$$

여기서 Δ 는 필터의 크기 $(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$, 그리고 C 는 Smagorinsky 상수이다. 대표적인 Smagorinsky 상수 결정 모형은 Smagorinsky (1963)가 제안한 Smagorinsky 모형이 있고, Germano et al. (1991)와 Lilly (1992)가 제안한 dynamic sub-grid 모형이 있다. Smagorinsky 모형의 경우 전단흐름(shear flows)에서 Smagorinsky 상수는 범위로 제시되어 있고, 벽 근처에서는 추가적으로 감쇄함수(damping function)를 적용하는 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 2차 여과과정을 통해 자동적으로 Smagorinsky 상수를 결정하는 다음의 dynamic sub-grid 모형을 사용하였다.

$$C \Delta^2 = \frac{1}{2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} M_{ij}} \quad (10)$$

$$L_{ij} = \widetilde{\widetilde{u_i u_j}} - \widetilde{u_i} \widetilde{u_j} \quad (11)$$

$$M_{ij} = \frac{\widetilde{\Delta^2}}{\Delta^2} |\widetilde{\widetilde{S_{ij}}}| - |\widetilde{S_{ij}}| \widetilde{S_{ij}} \quad (12)$$

여기서 $\widetilde{\Delta^2}$ 는 테스트 필터이고, $\widetilde{(\quad)}$ 는 테스트 필터에 적용하여 여과시킨 항이다.

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. OpenFOAM은 영국의 Imperial College에서 2004년에 공개 코드로 발표 되었으며, 이후 꾸준히 업데이트가 진행해 왔다. OpenFOAM의 장점은 C 언어를 이용하여 어떤 기능이든 추가할 수 있는 우수한 접근성을 지니고 있기 때문에

연구개발의 확장성을 보장한다. OpenFOAM에서 제공하는 해석 코드는 직교좌표계에서 유한체적법을 이용하고, 지배방정식을 이산화하기 위하여 Harlow and Weich (1965)가 제안한 엇갈린 격자체계(staggered Cartesian grid)를 이용한다. 차분 기법으로는 입력항과 확산항에 대해 중앙 차분법을 사용하였고, 시간항에 대해 후방 차분법을 사용하였다. 유속압력 상관관계를 계산하기 위하여 Issa et al. (1986)이 제안한 PISO 알고리즘을 사용하였다.

Fig. 1은 계산영역과 경계조건을 나타낸 그림이다. 측벽과 바닥 벽의 경계조건으로는 비활동 조건(no-slip)을 이용하였고, 수면의 경계조건은 대칭 조건(symmetry condition)을 이용, 주흐름방향으로의 유입-유출부의 경계조건은 완전히 발달된 흐름으로 가정하고 주기 조건(cyclic condition)을 적용하였다. 계산영역은 $6H \times 2H \times H$ 로 각각 주흐름방향, 횡방향, 연직방향을 의미하고, 주흐름방향으로의 계산영역의 길이 $6H$ 는 모든 유속성분의 주흐름방향 상관성(streamwise correlation)이 거의 0이 되기에 충분하다. 계산영역은 $256 \times 256 \times 128$ 개의 절점으로 이산화 하였으며, 격자간 거리는 무차원 거리로 $\Delta x^+ \approx 56$, $\Delta y^+ = \Delta z^+ \approx 17$ 이다.

본 연구에서는 Tominaga et al. (1989)의 폭-수심비가 2인 매끈한 하상의 직사각형 실험수로에 수치모의를 수행하고, 수로 중앙에서 바닥면으로부터의 거리를 달리하여 유속의 시계열 자료를 추출하고 Bursting 현상을 분석하였다. Table 1은 Tominaga et al. (1989)의 실험수로의 제원이다. 평균흐름 및 난류량에 대한 분석은 Ban and Choi (2014)에 포함하였다.

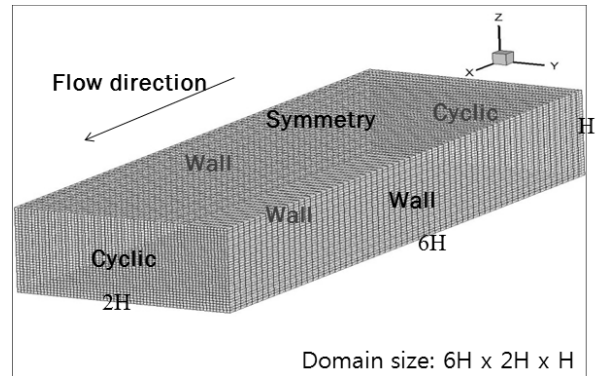


Fig. 1. Computational Domain and Boundary Conditions for LES

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

4. Bursting 현상의 분석

4.1 uw 시분면기법

uw 시분면기법은 Lu and Willmarth (1973)에 의해 제안된 기법으로, 진동속도(fluctuate velocity) u' 와 w' 를 이용하여 Bursting 현상이 레이놀즈 응력에 미치는 영향과 Bursting 현상의 주기를 파악할 수 있다. 순간 레이놀즈 응력은 각 진동속도의 부호와 임의의 배제조건(threshold level)에 의해 Fig. 2와 같이 외향상호작용(outward interaction event), 분출현상(ejection event), 내향상호작용(inward interaction event), 쓸기현상(sweep event), 배제 영역(hole)으로 총 5개의 영역으로 나누게 된다. 배제조건 H 는 임의 크기의 레이놀즈 응력을 시간 평균된 레이놀즈 응력으로 무차원화 시킨 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$H = \left| \frac{u'w'}{\langle u'w' \rangle} \right| \quad (13)$$

각 영역에 포함되는 순간 레이놀즈 응력($u'w'$)이 시간평균된 레이놀즈 응력($\langle u'w' \rangle$)에 미치는 기여율(contribution rate) RS_i 은 다음의 식으로부터 계산된다.

$$RS_i(H) = \int_{-\infty}^{-H} \varphi p_i(\varphi) d\varphi \quad i = 1, 3 \quad (14)$$

$$RS_i(H) = \int_H^{\infty} \varphi p_i(\varphi) d\varphi \quad i = 2, 4 \quad (15)$$

여기서 1사분면과 3사분면에 해당하는 RS_1 과 RS_3 은 레이놀즈 응력의 생성 중 음의 생성(negative production)에 기여하는 비율이

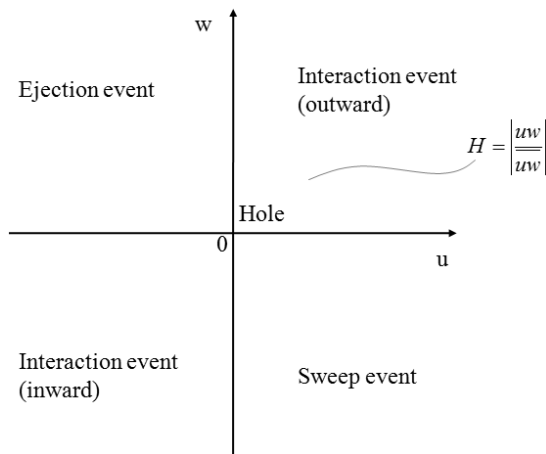


Fig. 2. Schematic Division of the Four Quadrants

고, 2사분면과 4사분면에 해당하는 RS_2 와 RS_4 는 양의 생성에(positive production)에 기여하는 비율이다. $\varphi(u'w'/\langle u'w' \rangle)$ 는 순간 레이놀즈 응력을 시간평균 된 레이놀즈 응력으로 무차원화 시킨 변수이고, $p_i(\varphi)$ 는 각 사분면에 포함되는 순간 레이놀즈 응력의 조건부 확률이다. 또한 순간 레이놀즈 응력이 레이놀즈 응력에 미치는 시간비(fraction time) TS_i 는 다음의 식으로부터 계산된다.

$$TS_i(H) = \int_{-\infty}^{-H} p_i(\varphi) d\varphi \quad i = 1, 3 \quad (16)$$

$$TS_i(H) = \int_H^{\infty} p_i(\varphi) d\varphi \quad i = 2, 4 \quad (17)$$

여기서 TS_1 과 TS_3 은 전체 현상의 측정시간 중에 레이놀즈 응력의 양의 생성에 기여하는 현상의 시간비를 의미하고, TS_2 와 TS_4 는 레이놀즈 응력의 음의 생성에 기여하는 시간비를 의미한다.

4.2 Bursting 현상이 레이놀즈 응력에 미치는 영향

Fig. 3은 uw 시분면 기법을 바닥과 가까운 지점($z = 0.008H$)과 수심의 중앙($z = 0.44H$)과 그리고 수면에 근접한 지점($z = 0.88H$)에서의 진동속도 u' 와 w' 에 적용한 결과이다. Figs. 3(a) and 3(b)를 살펴보면 2사분면과 4사분면에 해당하는 분출현상과 쓸기현상 지배적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 바닥에서는 전체 발생횟수의 70% 이상이 분출과 쓸기현상인 것을 볼 수 있고, 수심의 중앙에서는 약 65% 이상이 분출과 쓸기현상인 것을 볼 수 있다. 수면에 가까워질수록 분출현상과 쓸기현상의 발생횟수가 감소하여 상호작용과 거의 비슷한 발생횟수를 나타내는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 배제조건에 따른 순간 레이놀즈 응력의 기여율을 도시한 그림이다. 적용 지점은 Fig. 3과 동일하게 바닥과 중간영역 그리고 수면에 근접한 지점으로 하였다. 그림에서 가로축은 배제조건이고, 세로축은 기여율이다. 바닥과 가까운 지점($z = 0.008H$)을 살펴보면 분출현상이 레이놀즈 응력의 생성에 가장 큰 기여를 하며 그 다음으로 쓸기현상이 크게 기여한다. 배제조건이 커지면서 급하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 약한 레이놀즈 응력의 기여율이 큰 것을 볼 수 있다. 상호작용에 의한 레이놀즈 응력의 생성음의 생성은 거의 없는 것으로 판단된다. 매끈한 하상의 경우 점성저층(viscous sublayer)에서 쓸기현상이 지배적으로 나타난다고 알려져 있다(Wallace et al., 1972), 또한, 점성저층 바로 위의 완충층(buffer layer)에서는 쓸기현상과 분출현상이 동등한 기여율을 보이며, 그 이후의 구간에서는 분출현상이 지배적으로 나타난다고 알려져 있다(Raupach and Thom, 1981). 바닥과 가까운 지점($z = 0.008H$)

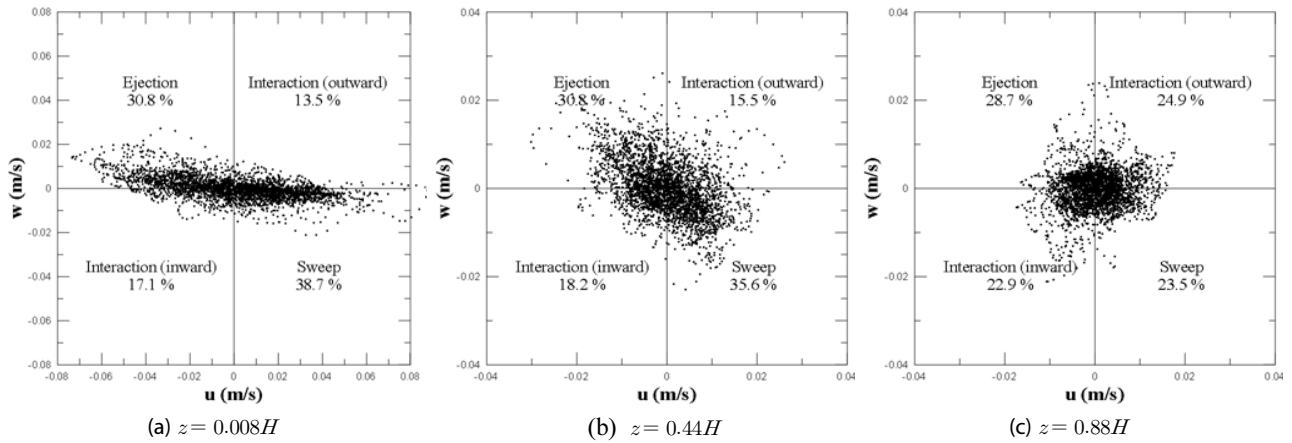


Fig. 3. Distributions of Fluctuating Velocity u and w

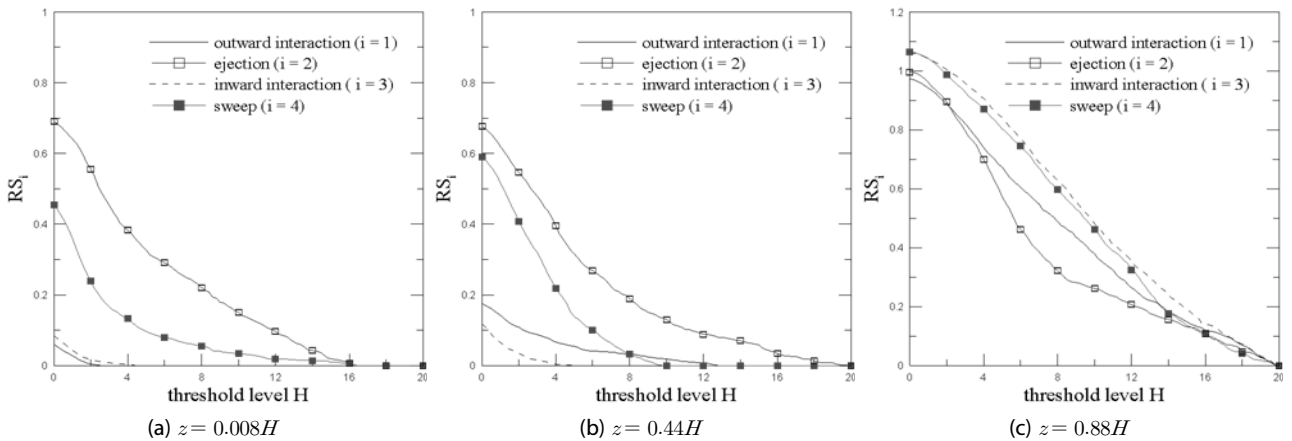


Fig. 4. Contribution Rate with Threshold Level

은 무차원 거리 $y^+ = 17.2$ 로 완충층에 해당하고, 이 구간에서 분출현상이 쓸기현상보다 더 우세하게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 수심의 중앙($z = 0.44H$) 부분의 기여율을 살펴보면 바닥과 가까운 지점과 마찬가지로 분출현상이 쓸기현상보다 크게 나타나고, 배제조건이 작은 경우의 기여율이 더 큰 것을 볼 수 있다. 상호작용의 기여율은 바닥에 비해 약간 증가하였지만 분출과 쓸기현상에 비해 거의 영향이 없는 것으로 판단된다. 마지막으로 수면에 근접한 지점($z = 0.88H$)의 기여율을 살펴보면 상호작용에 의한 영향이 크게 증가하여 분출과 쓸기현상과 비슷한 정도의 기여율을 보여주고 있다. 하지만 바닥과 수심의 중앙에 비해 큰 배제조건에서의 기여율이 큰 것으로, 큰 레이놀즈 응력의 기여율이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 배제조건 $H=0$ 일 때 수심에 따른 각 시분면의 기여율을 무차원 거리($y^+ = yu_r/\nu$)로 나타내어 도시한 것이다. 매우 작은 크기의 순간 레이놀즈 응력도 레이놀즈 응력의 생성에 영향을

미치므로, 이를 고려하기 위해서 기여율에 모든 크기의 순간 레이놀즈 응력을 반영할 필요가 있다. 기존의 실험연구(Lu and Willmarth, 1973; Brodkey, 1974; Nakagawa and Nezu, 1977)와 Kim et al. (1987)의 DNS 결과와 함께 도시하였다. Brodkey et al. (1974)와 Kim et al. (1987)의 결과 $y^+ < 12$ 인 영역에서 쓸기현상이 분출현상에 비해 크게 나타났지만, 본 연구에서는 분출현상이 쓸기현상보다 크게 나타났다. 이는 격자간 거리가 $\Delta y^+ = \Delta z^+ \approx 17$ 로 이러한 벽에서 가까운 지점의 난류구조를 밝혀내기엔 충분하지 않다고 판단된다. 완충층 이후($y^+ > 30$)에는 기존 실험 및 수치모의 결과와 잘 일치한다. Nakagawa and Nezu (1977)의 결과를 보면 수면($y^+ \approx 600$)에 근접할수록 분출과 쓸기현상의 기여율이 급증하는데, 본 연구에서의 수면의 무차원 거리 y^+ 는 약 2,200으로 수면에 근접하면서 마찬가지로 경향을 보여주는 것을 알 수 있다. Table 2는 Nezu and Nakagawa (1993)가 제시한 분출현상과 쓸기현상의 기여율과 Kim et al. (1987)의 DNS 수치모의 결과가

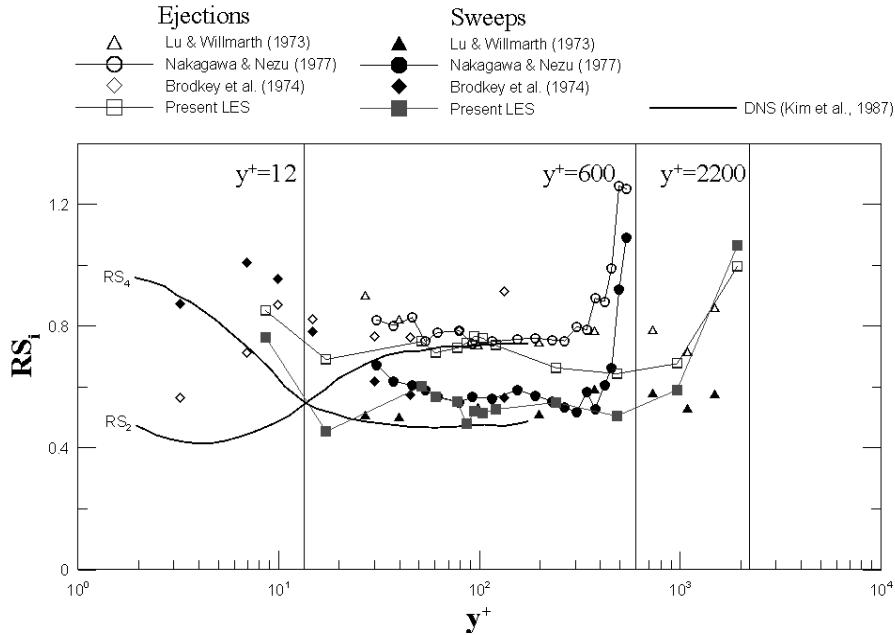


Fig. 5. Distributions of Contribution Rate RS_2 and RS_4

Table 2. Comparison of Contributions Rate RS_i

	Present LES	Nezu and Nakagawa (1993)	Kim et al. (1987)
RS_2	0.71 ± 0.039	0.77 ± 0.029	0.76
RS_4	0.55 ± 0.039	0.57 ± 0.029	0.52

다. 완충층 이후의 구간($y^+ > 30$)에서 분출현상에 의한 레이놀즈 응력의 생성은 약 71%를 차지하고 쓸기현상에 의한 레이놀즈 응력의 생성은 약 55%를 차지하는 것을 볼 수 있다. 본 연구의 결과 다소 작지만 전반적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 분출현상과 쓸기현상의 기여율의 합이 1이 넘는 것은 분출현상과 쓸기현상은 레이놀즈 응력의 양의 생성에 기여하고 상호작용은 레이놀즈 응력의 음의 생성에 기여하기 때문이다.

Fig. 6은 분출현상과 쓸기현상의 기여율의 비(RS_4/RS_2)를 거리에 따라 도시한 것이다. 매끈한 하상에서의 실험결과와 DNS 수치모의 결과를 함께 도시하였다. $y^+ < 30$ 의 구간과 $y^+ > 30$ 에서 모두 기존 실험 및 수치모의 결과와 잘 일치하는 결과를 볼 수 있다. 벽에서 가까워 질수록($y^+ < 30$) 분출현상에 비해 쓸기현상의 크기가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 또한 Nezu and Nakagawa (1993)는 $y^+ > 30$ 에서 RS_4/RS_2 를 0.74로 제시하였는데, 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 완충층 이후의 구간($y^+ > 30$)에서 분출현상과 쓸기현상의 기여율의 크기와 독립적으로 분출현상과 쓸기현상이 레이놀즈 응력의 양의 생성에 차지하는 비율은 일정하다.

Fig. 7은 배제조건 $H=0$ 일 때 수심에 따른 각 사분면의 시간비를 무차원 거리로 나타내어 도시한 것이다. Nakagawa and Nezu (1977)와 Brodkey et al. (1974)의 실험 결과와 함께 도시하였다. 바다 근처를 제외하면 수치모의 결과 기존 실험 연구의 결과와 대체로 일치하는 것을 볼 수 있다. Table 3은 Nezu and Nakagawa (1993)가 $30 < y^+ < 0.6Re_\tau$ ($Re_\tau = u_\tau H/\nu$)에서 제시한 분출현

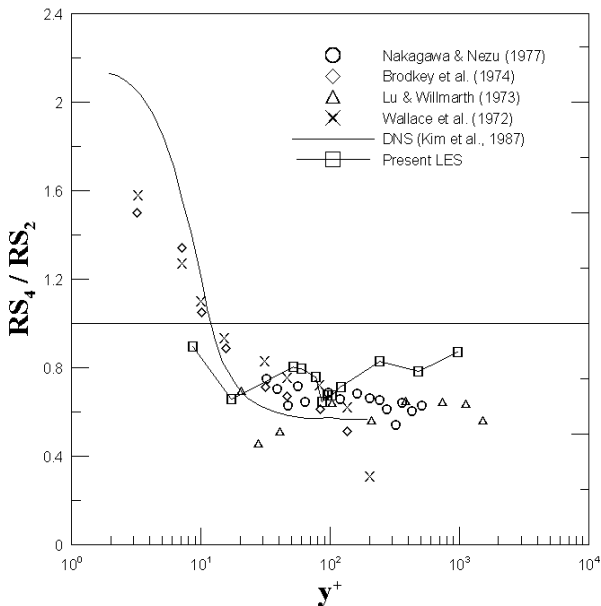
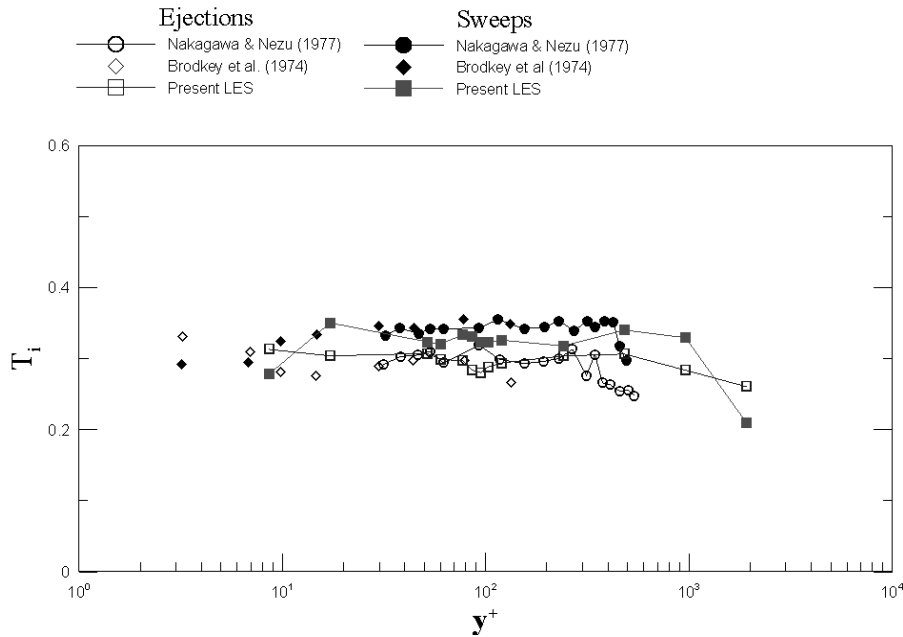


Fig. 6. Distributions of Ratio RS_4/RS_2

Fig. 7. Distributions of fraction time TS_2 and TS_4 Table 3. Comparison of Fraction Time TS_i

	Present LES	Nezu and Nakagawa (1993)
TS_2	0.29 ± 0.009	0.29 ± 0.012
TS_4	0.33 ± 0.009	0.34 ± 0.008

상과 쓸기현상의 시간비이다. 제시한 범위에서의 분출현상과 쓸기현상의 각각의 시간비는 약 0.29와 0.33으로, 본 연구에서 동일한 범위에서의 시간비를 확인해본 결과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 시간비는 전체 측정 시간중 각 현상이 차지하는 시간을 나타내는 것으로, 분출현상은 전체 시간중 29% 정도 발생하고, 쓸기현상은 33% 정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 바닥을 제외하고 전체적으로 쓸기현상의 발생시간이 더 많은 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 매끄러운 하상 개수로 흐름에서의 조직구조를 분석하기 위하여 LES 모형을 이용하여 수치 모의를 수행하였다. 조직구조의 전반적인 분석을 위하여 Bursting 현상에 초점을 두어 분석을 수행하였다. Bursting 현상을 분석은 uw 사분면 기법을 이용하여 Bursting 현상이 레이놀즈 응력에 미치는 영향을 파악하였다.

uw 사분면 기법을 진동속도에 적용한 결과 바닥에 가까운 지점에서 분출과 쓸기현상이 지배적으로 발생하는 것을 볼 수 있었고,

수면에 근접할수록 상호작용의 발생이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 분출현상과 쓸기현상은 레이놀즈 응력의 양의 생성에 기여하므로 이를 분석하기 위하여 각 현상의 기여율과 시간비를 분석하였다. 완충층 이후의 구간에서 분출현상의 기여율이 쓸기현상의 기여율에 비해 크게 발생하는 것을 볼 수 있었고, 분출현상과 쓸기현상의 기여율의 비는 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한 완충층 이후의 구간에서 분출현상의 시간비가 쓸기현상의 시간비보다 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 실험연구와 수치모의와 일치하고, Nezu and Nakagawa (1993)가 제안한 범위와도 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

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

References

- Blackwelder, R. F. and Kaplan, R. E. (1976). "On the wall structure of the turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 76, No. 1, pp. 89-112.
- Brodkey, R. S., Wallace, J. M. and Eckelmann, H. (1974). "Some properties of truncated turbulence signals in bounded shear flows."

- Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 63, No. 2, pp. 209-224.
- Corino, E. R. and Brodkey, R. S. (1969). "A visual investigation of the wall region in turbulent flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-30.
- Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H. (1991). "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model." *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, Vol. 3, No. 7, pp. 1760-1765.
- Gyr, A. and Schmid, A. (1997). "Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes." *Journal of hydraulic research*, Vol. 35, No. 4, pp. 525-544.
- Harlow, F. H. and Welch, J. E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface." *Physics of Fluids*, 8, p. 2182.
- 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.
- Kim, H. T., Kline, S. J. and Reynolds, W. C. (1971). "The production of turbulence near a smooth wall in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 50, No. 1, pp. 133-160.
- Kim, J., Moin, P. and Moser, R. (1987). "Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number." *Journal of Fluid Mechanics*, 177, pp. 133-166.
- Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Runstadler, P. W. (1967). "The structure of turbulent boundary layers." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 30, No. 4, pp. 741-773.
- Lilly, D. K. (1992). "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method." *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)*, Vol. 4, No. 3, pp. 633-635.
- Lu, S. S. and Willmarth, W. W. (1973). "Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 60, No. 3, pp. 481-511.
- Nakagawa, H. and Nezu, I. (1977). "Prediction of the contributions to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 80, No. 1, pp. 99-128.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Nezu, I. and Sanjou, M. (2008). "Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 62-90.
- Niño, Y. and Garcia, M. H. (1996). "Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: Implications for sediment transport." *Journal of Fluid Mechanics*, 326, pp. 285-319.
- Okamoto, T. A. and Nezu, I. (2010). "Large eddy simulation of 3-D flow structure and mass transport in open-channel flows with submerged vegetations." *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 185-197.
- Raupach, M. R. and Thom, A. S. (1981). "Turbulence in and above plant canopies." *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 1, pp. 97-129.
- 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.
- Wallace, J. M., Eckelmann, H. and Brodkey, R. S. (1972). "The wall region in turbulent shear flow." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, No. 1, pp. 39-48.