

# DNS 자료를 이용한 개수로에서 이차흐름의 생성메커니즘 분석

## Analysis of Generating Mechanism of Secondary Flows in Turbulent Open-Channel Flows using DNS Data

정영훈\* · 최성욱\*\*

Joung, Younghoon · Choi, Sung-Uk

### Abstract

Using DNS data for turbulent flows in an open-channel with sidewalls, the mechanisms by which secondary flows are generated and by which Reynolds shear stresses are created, are demonstrated. Near the sidewall, secondary flows invading towards the sidewall are observed in the regions of both lower and upper corners, while secondary flows ejecting from the sidewall towards the center of the channel are created elsewhere. The distributions of Reynolds shear stresses near the sidewall are analyzed, connecting their productions with coherent structures. A quadrant analysis shows that sweeps are dominant in two corner regions where secondary flows invading towards the sidewall are generated, but that ejections are dominant in the region where secondary flows ejecting towards the center of the channel are created. Also, conditional quadrant analyses reveal that the productions of Reynolds shear stresses and the patterns of secondary flows are determined by the directional tendencies of coherent structures.

**Keywords** : direct numerical simulation (DNS), open-channel flow, secondary flows, Reynolds shear stresses, coherent structures

### 요 지

측벽이 존재하는 개수로 난류흐름에 대한 DNS 자료를 사용하여 레이놀즈 전단응력 및 이차흐름의 생성메커니즘을 규명하였다. 측벽 부근에서 이차흐름의 양상을 보면, 상부 및 하부 모서리 부근에서는 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 형성된 반면, 그 외의 영역에서는 수로 중앙을 향해 분출하는 이차흐름이 형성된 것으로 나타났다. 측벽 부근에서 레이놀즈 전단응력의 분포를 산정하였으며, 고유구조와 연계하여 분석하였다. 사분면 해석에서 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 생성된 영역에서는 쓸기현상이 지배적인 반면, 측벽으로부터 분출되는 이차흐름이 형성된 영역에서는 분출현상이 지배적인 것으로 나타났다. 또한 조건부 사분면 해석을 통해 레이놀즈 전단응력의 생성 및 이차흐름의 양상이 지배적인 고유구조의 방향성에 의해 결정된다는 것을 확인하였다.

**핵심용어** : 직접수치모의(DNS), 개수로 흐름, 이차흐름, 레이놀즈 전단응력, 고유구조

### 1. 서 론

Prandtl이 분류한 이차흐름 중 두 번째로 분류된 이차흐름은 난류의 비등방성에 의해 생성되는 흐름으로서 “Prandtl's secondary flows of second kind” 불린다. 체적평균된 주흐름방향 유속 ( $U_B$ )의 약 2-5%로서 상대적으로 작은 크기를 갖는 이차흐름은 평균흐름, 난류구조 및 비활성 스칼라의 수송 등에 큰 영향을 주기 때문에(Demuren, 1991), 공학적으로 중요하게 여겨지고 있다. 이러한 이차흐름은 모든 난류흐름에서 생성되는 것은 아니다. 즉, 벽이나 자유수면의 존재에 의한 비균일한 방향(inhomogeneous direction)이 두 방향 존재하는 난류흐름에서만 이차흐름이 생성된다. 이러한

난류흐름의 대표적인 예로는 구형 관수로 흐름, 측벽이 존재하는 개수로 흐름, 복단면 개수로 흐름 등이 있다. 현재까지도 이차흐름의 정량적 및 정성적 특성을 밝히기 위해 위에 소개된 난류흐름에 대한 실험 및 수치해석 연구가 수행되어 오고 있다.

이와 더불어 이차흐름이 생성되는 원인을 규명하기 위한 심층적인 연구도 수행되었다. 이차흐름의 생성 메커니즘에 대한 설명은 주로 주흐름방향 평균渦度( $\Omega_x$ ) 방정식(streamwise mean vorticity equation)의 각 항에 대한 收支 분석(budget analysis)을 통해 이루어졌다(Gessner, 1973; Nezu와 Nakagawa, 1984; Demuren과 Rodi, 1984; Gavrilakis, 1992, Broglia 등, 2003). 구체적으로, 이 분석은  $\Omega_x$  방정식

\*정희원 · 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail: truss96@yonsei.ac.kr)  
\*\*정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 부교수(E-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

을 구성하고 있는 이송항(convective term), 비등방향(anisotropy term), 전단응력항(shear stress term), 점성확산항(viscous diffusion term) 등 네 항에 대한 收支분석을 통해, 이차흐름과 연관된  $\Omega$ 의 생성에 중요한 영향을 주는 인자를 선별하는 방법이다.  $\Omega$  방정식은 평균흐름장 및 레이놀즈 응력의 공간미분항으로 구성되어 있기 때문에, RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 모형에 의한 수치해석 연구를 통해서도 분석이 가능하여 빈번히 사용되고 있다. 그러나 이 분석방법은 이차흐름의 생성에 관한 세부적인 현상을 설명할 수 없기 때문에 한계점을 지니고 있다.

한편, Navier-Stokes 방정식을 난류모형에 의존하지 않고 직접 해석하는 직접수치모의(DNS: direct numerical simulation)는 흐름 내에 존재하는 모든 거동을 해석할 수 있기 때문에 난류구조나 벽 영향에 대한 해석에 있어 가장 정확한 수치해석기법이다(Launder, 1990). DNS는 계산비용이 매우 크기 때문에 낮은 레이놀즈 수를 갖는 흐름에 적용할 수 있지만, 평균흐름 및 난류통계량은 레이놀즈 수의 영향이 크지 않을 뿐만 아니라(Pope, 2000), 이차흐름의 생성 메커니즘은 레이놀즈 수와 관계없이 유사하다고 알려져 있다(Gavrilakis, 1992). 따라서 낮은 레이놀즈 수를 갖는 난류흐름에 대한 DNS 연구가 최근 활발히 이루어지고 있다.

3차원 순간유속 및 압력장의 DNS 자료를 토대로 이차흐름의 생성되는 원인을 고유구조(coherent structures)와 연계하여 규명하고자 한 연구의 시초는 Huser와 Biringen(1993)의 연구이다. Huser와 Biringen(1993)은 구형 관수로 흐름에 대한 DNS를 수행하였으며, DNS 자료를 이용한 사분면 해석(quadrant analysis)을 통해 고유구조에 대한 특성을 조사하였다. 이들은 벽 근처에서 발생하는 고유구조의 발생빈도나 강도가 모서리로부터의 거리에 따라 변화한다는 것을 확인하였으며, 이러한 현상이 모서리를 향하는 이차흐름을 생성시킨다는 것을 밝혔다. 최근 Joung 등(2006)은 구형 관수로 흐름에 대한 DNS를 수행하였다. Joung 등(2006)은 구형 관수로 흐름에서 생성되는 이차흐름의 양상을 보다 명확히 조사하기 위해, DNS 자료를 이용하여 조건부 사분면 해석(conditional quadrant analysis)을 수행하였으며, 이차흐름의 양상이 고유구조의 방향성에 의해 결정된다는 것을 밝혔다.

정영훈과 최성욱(2005)은 저 레이놀즈 수를 갖는 사각형 개수로 난류흐름에 대한 DNS를 수행한 바 있다. 이들은 평균흐름 및 난류구조 등의 난류통계량을 계산하여 기존의 수치해석결과 및 실험자료와 비교하였으며, 레이놀즈 응력의 분포를 세부적으로 논의하였다. 본 연구에서는 정영훈과 최성욱(2005)에 의한 DNS 자료를 이용하여 개수로 난류흐름에서 레이놀즈 전단응력의 생성메커니즘 및 이차흐름의 양상을 규명하고자 한다. 이를 위해 조건부 사분면 해석을 수행하여, 측벽 부근에서 지배적인 고유구조 방향성을 레이놀즈 전단응력 및 이차흐름의 생성과 연계하여 조사하였다.

## 2. 수치해석방법 및 적용

정영훈과 최성욱(2005)은 사각형 개수로 흐름에 대한 DNS를 수행하기 위해 Joung 등(2006)이 개발한 구형 관수

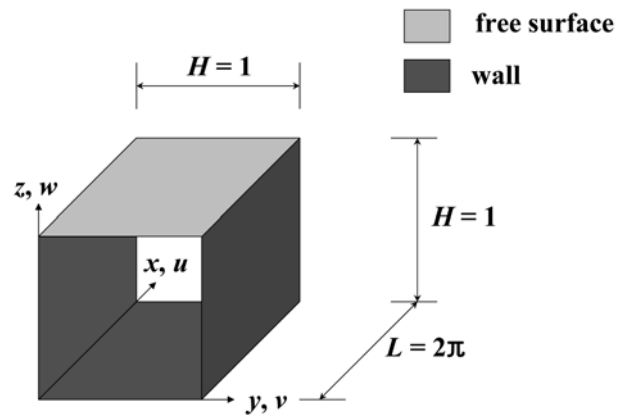


그림 1. 사각형 개수로 흐름의 개략도

표 1. DNS의 격자특성 및 흐름조건

$Re_B$	$Re_\tau$	격자수 ( $x, y, z$ )	격자간격 (벽단위)		
			$\Delta x^+$	$\Delta y^+$ (min-max)	$\Delta z^+$ (min-max)
4,160	292	64×96×96	28.67	0.91-5.10	0.91-5.10

로 흐름에 대한 DNS solver를 수정하였다. 수정된 DNS solver의 계산절차는 Joung 등(2006)의 구형 관수로 흐름에 대한 DNS solver와 동일하므로, 본 논문에서 세부적인 수치해석방법은 생략하겠다. 정영훈과 최성욱(2005)은 그림 1과 같은 개수로 난류흐름에 대한 DNS를 수행하였다. 또한 표 1에는 DNS에 사용된 격자특성 및 흐름조건이 나타나 있다.

## 3. 난류통계량

그림 2는 시간평균된 유속장을 보여준다. 그림에는 주흐름 방향 평균유속( $U$ )의 등속선과 이차흐름( $V, W$ )의 벡터도가 함께 도시되었으며, 모든 유속성분은  $U_B$ 로 무차원되었다. 벡터도에서 바닥, 측벽 및 자유수면 부근에 이차흐름이 형성된 것을 볼 수 있다. 특히, 상부모서리 부근에 측벽을 향하는 내측이차흐름(inner secondary flows)이 형성된 것을 볼 수 있다. 이차흐름의 최대크기는  $U_B$ 의 약 3%이며, 자유수면 부

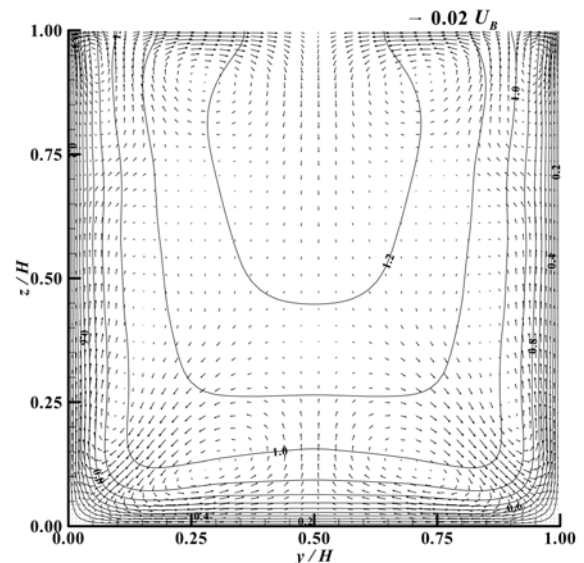


그림 2. 시간평균된 유속장

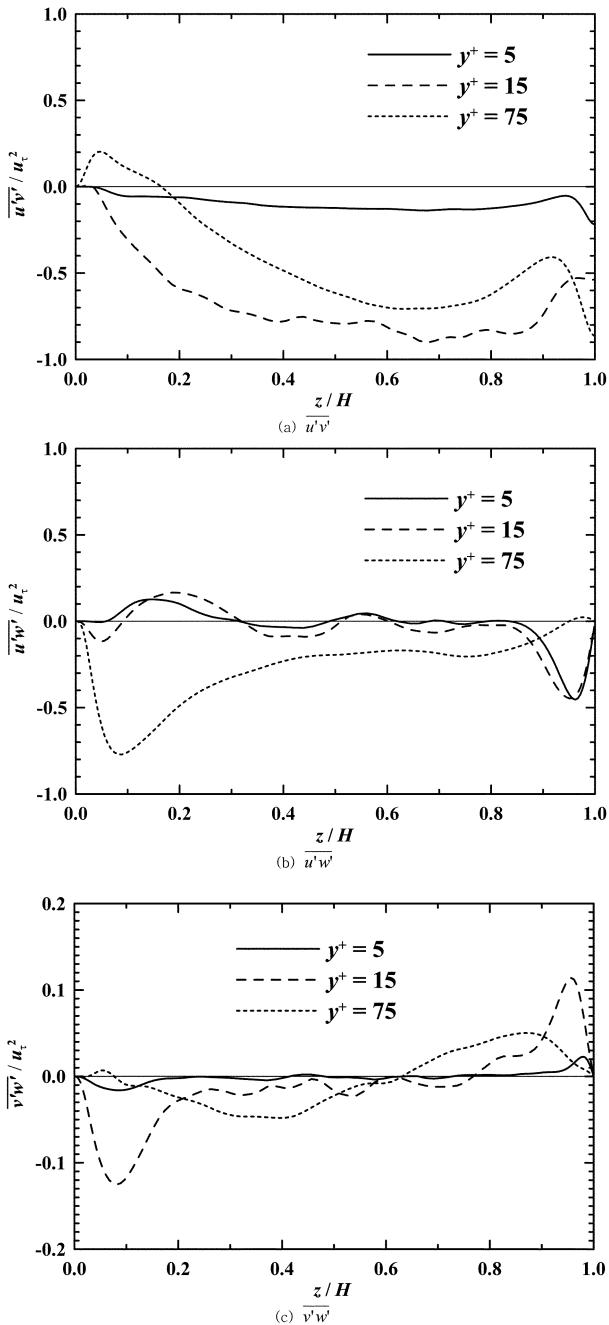


그림 3. 레이놀즈 전단응력의 분포

근에서 발생하는 외측이차흐름(outer secondary flows)에서 최대값을 갖는 것으로 나타났다. 측벽부근의 유동장을 볼 때, 상부 및 하부 모서리 부근에서는 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 형성된 반면, 그 외의 영역에서는 수로 중앙을 향해 분출하는 이차흐름이 형성된 것을 볼 수 있다. 이와 같은 이차흐름이 형성되는 메커니즘은 사분면 해석을 통해 규명될 것이다.

정영훈과 최성욱(2005)은 DNS 자료를 이용하여 레이놀즈 응력의 모든 성분을 산정한 바 있다. 이차흐름의 생성 메커니즘은 고유구조(coherent structures)와 레이놀즈 전단응력의 생성을 연계시킴으로써 규명될 수 있다(Huser와 Birngen, 1993). 따라서 본 연구에서는 측벽 부근에서 레이놀즈 전단응력의 분포를 고유구조와 연계하여 분석하고자 한다. 그림 3은  $y/H = 0.016, 0.055, 0.250$  ( $y^+ \approx 5, 15, 75$ )인 영역에서  $u_*^2$ 으로 무차원된 레이놀즈 전단응력 세 성분의  $z$ -방향

분포를 나타낸 것이다.

그림 3(a)에서  $\overline{u'v'}$ 의 분포를 보면,  $y^+ \approx 5$ 의 경우 측벽에 매우 근접한 영역이므로 횡방향 유속성분이 작아 레이놀즈 응력이 작은 값을 가진다.  $y^+ \approx 15$ 의 경우 전체 영역에 걸쳐 음의 값을 갖는데, 이는 쓸기현상(sweeps;  $u' > 0, v' < 0$ )이나 분출현상(ejections;  $u' < 0, v' > 0$ )의 고유구조가 지배적으로 발생되기 때문이다.  $y^+ \approx 75$ 에서의 분포는  $y^+ \approx 15$ 인 경우와 달리 바닥 근처에서 양의 값을 가지는데, 이는 바닥에서 생성되는 쓸기현상 및 분출현상의 영향이  $y^+ \approx 15$ 인 경우에 비해 더 크기 때문이다.

그림 3(b)에서  $\overline{u'w'}$ 의 분포는  $\overline{u'v'}$ 과는 달리  $y^+ \approx 5$ 에서 분포가  $y^+ \approx 15$ 와 유사하게 뚜렷한 분포를 보이고 있다. 이는  $\overline{u'w'}$ 에 횡방향 유속성분이 포함되어 있지 않기 때문이다.  $y^+ \approx 75$ 의 경우 바닥 근처에서 최소값을 가지는 것은  $\overline{u'v'}$ 의 분포에서 나타난 결과와 연관되어 있다. 즉, 바닥에서도 쓸기현상( $u' > 0, w' < 0$ ) 및 분출현상( $u' < 0, w' > 0$ )의 고유구조가 지배적으로 생성되어, 이 영향이  $\overline{u'w'}$ 의 분포에 반영된 것이다. 하부 모서리 부근에서  $\overline{u'w'}$ 의 분포는 Huser와 Birngen(1993)과 Joung 등(2006)의 구형 관수로 흐름에서의 분포와 유사하다. 그림 3(c)에서  $\overline{v'w'}$ 의 분포를 보면,  $y^+ \approx 5$ 의 경우  $\overline{u'w'}$ 의 분포와 마찬가지로 매우 작은 값을 가진다.  $y^+ \approx 15, 75$ 의 경우 수로 상하부에서 각각 국부적 최대값, 최소값을 가지며 대칭적인 분포를 보인다.

#### 4. 사분면 해석

그림 4는 임의의 시간 및 단면에서의 순간유속장을 나타낸 것이다. 그림에서 주흐름방향 순간유속( $u$ )의 등속선도와  $y, z$ 방향의 순간유속성분( $v, w$ )의 벡터도를 함께 도시하였다. 모든 유속성분은  $U_B$ 로 무차원되었다. 등속선도에서 붉은 영역은 **고운동량유체**(high-momentum-fluid)를 갖는 흐름을 의미하며, 푸른 영역은 **저운동량유체**(low-momentum-fluid)를 갖는 흐름을 나타낸다. 등속선도를 보면, 측벽 및 바닥 부근에서 버섯 모양의 고유구조가 발달되어 있다. 특히, 좌측벽의 상부 영역에 명확한 구조가 관찰된다. 이 구조를 벡터도와 함께 고려하면, 측벽으로부터 수로 중앙을 향해 분출되는

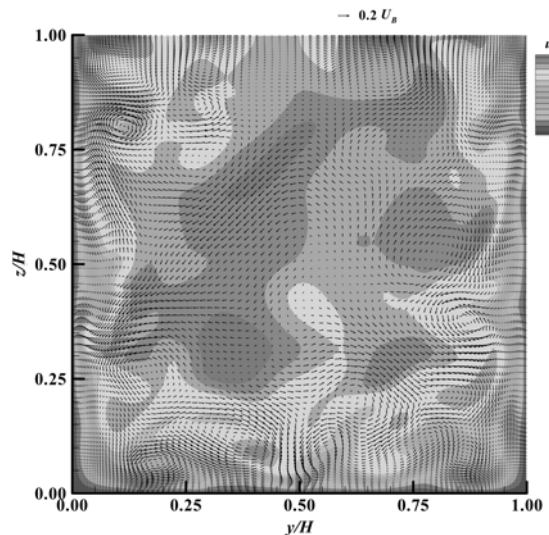


그림 4. 순간유속장

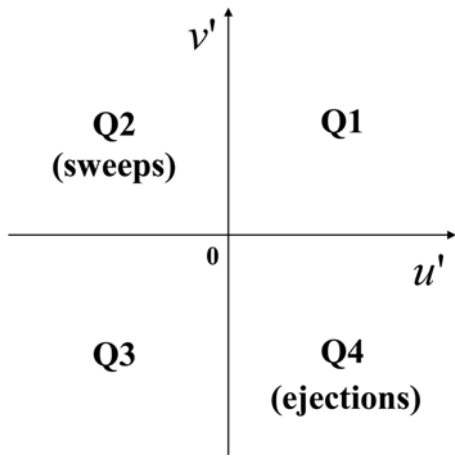


그림 5. 사분면 해석에서 진동속도장의 분류

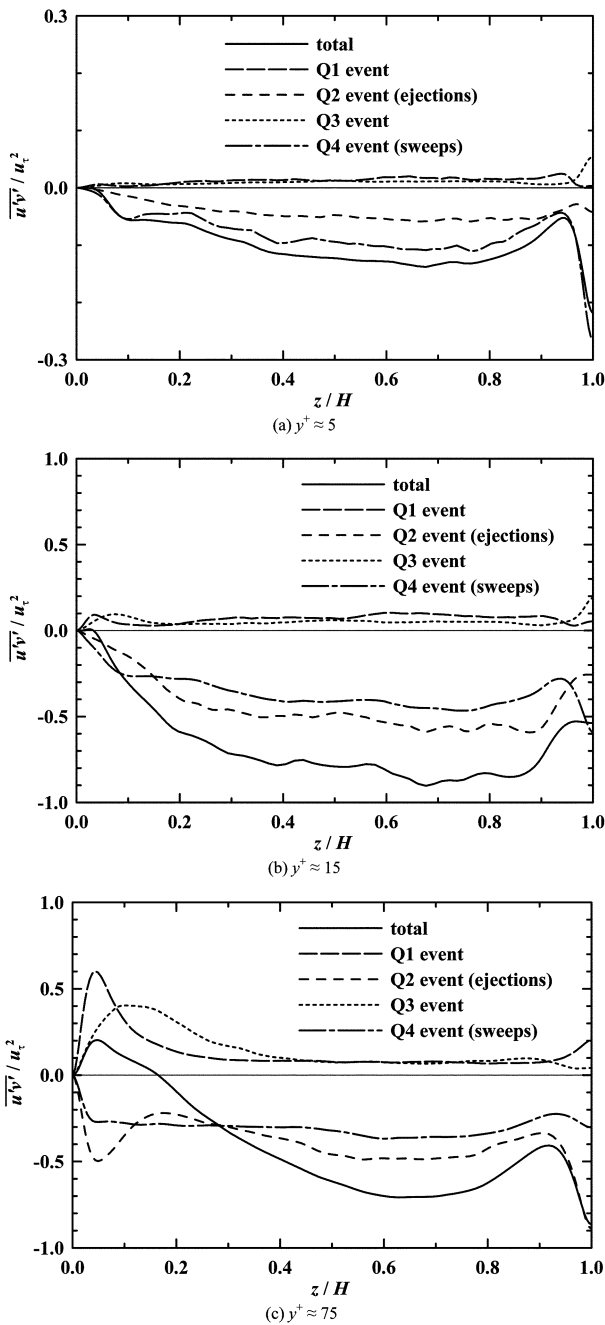


그림 6. 각 고유구조에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성(사분면 해석)

분출현상과 수로 중앙으로부터 측벽을 향해 침투되는 쓸기 현상으로 구성되는 것을 볼 수 있다. Huser와 Biringen

(1993)은 이러한 버섯 모양의 고유구조가 이차흐름의 생성과 연관되어 있다는 것을 밝힌 바 있다.

그림 5는 사분면 해석을 위해 분류된 진동속도성분의 범주를 나타낸 것이다. 수로의 좌측벽에서 분출현상(Q2 event)은 음의  $u'$ 과 양의  $v'$ 과 연관된 고유구조로서 측벽 부근의 저운동량유체가 수로의 중앙을 향해 분출되는 구조이다. 이와 반대로, 쓸기현상(Q4 event)은 양의  $u'$ 과 음의  $v'$ 인 현상이므로 수로 중앙의 고운동량유체가 측벽을 향해 침투되는 구조이다.

그림 6은  $y/H=0.016, 0.055, 0.250(y^+ \approx 5, 15, 75)$ 에서 각 고유구조에 의한 레이놀즈 전단응력( $\overline{u'v'}$ )의 생성을 나타낸 것이다. 앞에서 논의되었듯이,  $\overline{u'v'}$ 은  $y^+ \approx 75$ 의 바닥 근처를 제외한 측벽 대부분의 영역에서 음의 값을 가진다. 이는 그림에서 볼 수 있듯이 쓸기현상과 분출현상에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성이 다른 고유구조에 의한 것보다 크기 때문이다.  $y^+ \approx 15$ 인 경우 바닥 부근( $z/H < 0.15$ )에서는 쓸기현상이 지배적이다. 이는 수로의 하부 모서리 부근에서 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 생성된 것과 연관되어 있다. 또한 자유수면 부근( $z/H > 0.95$ )에서도 쓸기현상이 지배적인데, 이 영역은 측벽을 향하는 내측이차흐름의 상부 부분과 일치한다. 이 외의 영역에서는 분출현상에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성이 지배적인 것으로 나타났다.  $y^+ \approx 5$ 인 경우 전 영역에서 쓸기현상이 지배적으로 발생된 것으로 나타났으나, 값이 상대적으로 매우 작아 이차흐름과 연계시키기 어렵다. 앞에서 언급하였듯이,  $y^+ \approx 75$ 인 경우 바닥 근처의 분포에서는 바닥에서 생성되는 고유구조가 영향을 받기 때문에 본 연구에서 구체적으로 논의하지 않는다. 수로 상부영역에서는  $y^+ \approx 15$ 와 달리 대부분의 영역에서 분출현상이 지배적인 것으로 나타났다. 이는 수로 상부영역에서 벽으로부터 분출되는 이차흐름인 외측이차흐름의 생성을 야기한다. 이 결과를 통해 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 생성된 영역에서는 쓸기현상이 지배적인 반면, 측벽으로부터 분출되는 이차흐름이 형성된 영역에서는 분출현상이 지배적인 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 레이놀즈 전단응력( $\overline{u'v'}$ )의 생성과 지배적인 고유구조의 방향성과의 연계성을 보다 명확히 조사하기 위해, 조건부 사분면 해석을 수행하였다. 이는 그림 7에 도시되어 있듯이, 지배적인 고유구조인 쓸기현상과 분출현상의 방향성(상향 또는 하향)을 추가적으로 고려하여 사분면 해석

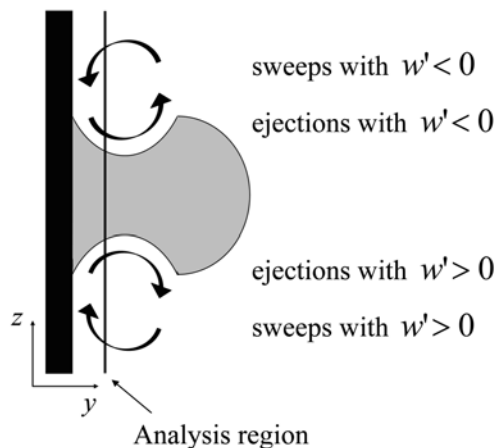
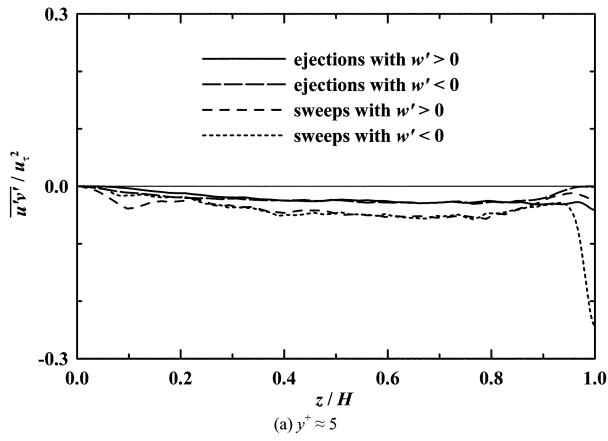
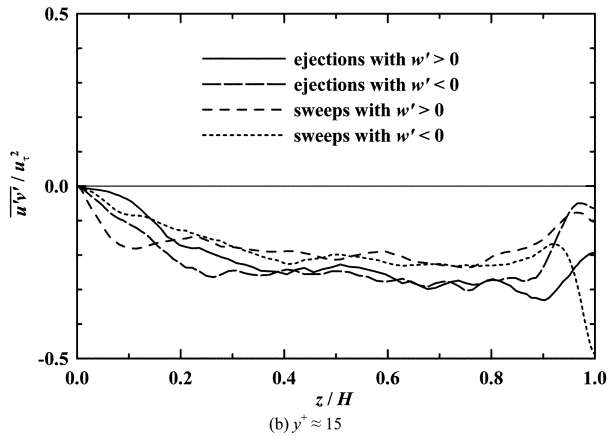


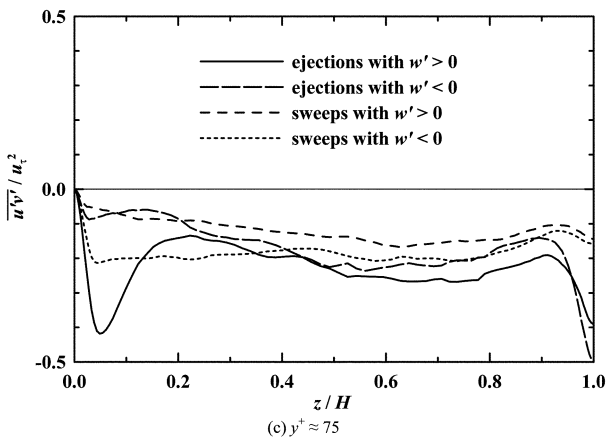
그림 7. 조건부 사분면 해석에서 방향성에 따른 고유구조의 분류



(a)  $y^+ \approx 5$



(b)  $y^+ \approx 15$

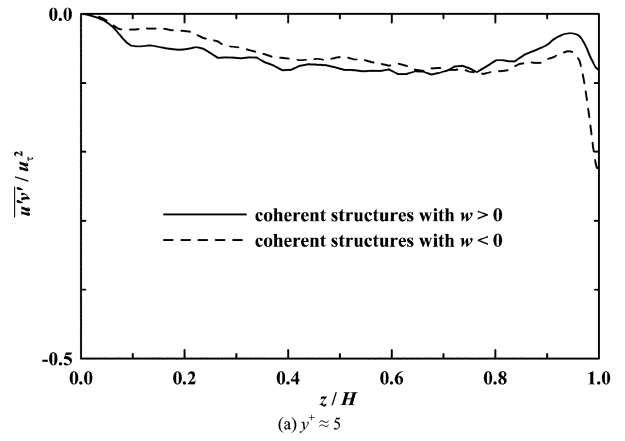


(c)  $y^+ \approx 75$

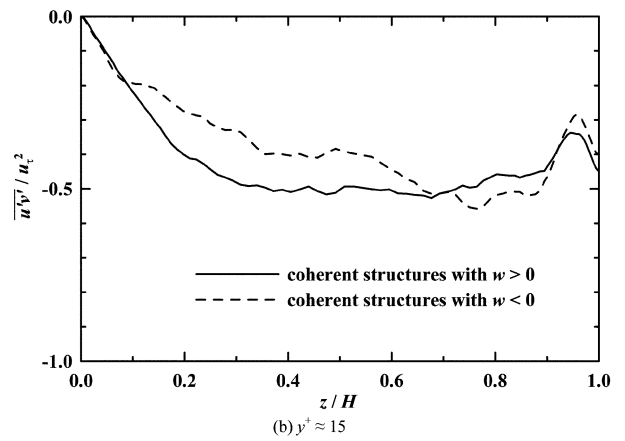
그림 8. 지배적인 고유구조에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성(조건부 사분면 해석 I)

을 수행하는 것이다.

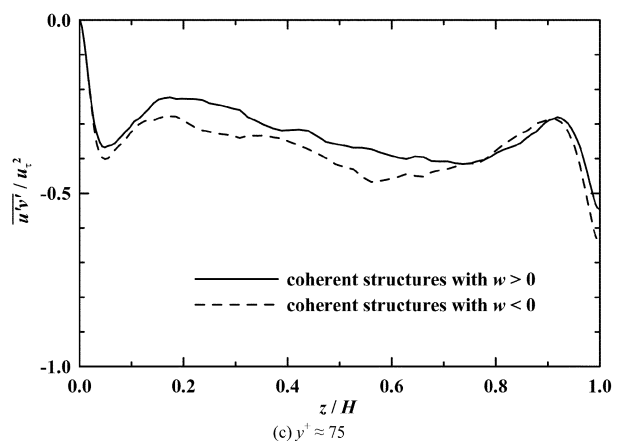
그림 8에는  $y/H=0.016, 0.055, 0.250$  ( $y^+ \approx 5, 15, 75$ )에서 특정한 방향성을 지니는 고유구조에 따른  $\overline{u'v'}$ 의 생성을 도시한 것이다. 그림 8(a)의  $y^+ \approx 5$ 에서는 그림 6과 마찬가지로 값이 매우 작아 분포양상이 명확히 나타나지 않는다. 그림 8(b)의  $y^+ \approx 15$ 에서는 수로 하부의  $z/H < 0.15$ 와  $0.15 < z/H < 0.35$ 에서 각각 상향 쓸기현상과 하향 분출현상이 지배적인 것으로 나타났다. 또한  $z/H < 0.35$ 에서 상향 쓸기현상과 하향 분출현상에 의한  $\overline{u'v'}$  생성의 합이 다른 경우에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 수로 하부영역( $z/H < 0.35$ )에서 음의  $\overline{u'w'}$  그리고 양의  $\overline{v'w'}$  생성을 야기한다. 수로 상부의  $0.8 < z/H < 0.95$ 와  $z/H > 0.95$ 에서 각각 상향 분출현상과 하향 쓸기현상이 지배적인 것으로 나타났으며, 이는 이 영역에서 양의  $\overline{u'w'}$  그리고 음의  $\overline{v'w'}$  생성을 초래한다. 이 외



(a)  $y^+ \approx 5$



(b)  $y^+ \approx 15$



(c)  $y^+ \approx 75$

그림 9. 지배적인 고유구조에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성(조건부 사분면 해석 II)

의 영역에서는 특정한 방향성을 갖는 지배적인 고유구조가 뚜렷이 나타나지 않는다. 이 영역은 앞에서 논의된  $\overline{u'w'}$ 과  $\overline{v'w'}$ 이 비교적 작은 절대값을 가지는 영역과 일치한다. 그림 8(c)의  $y^+ \approx 75$ 에서 바닥 근처는 위에서 언급하였듯이 본 연구에서 다루지 않을 것이다. 수로 상부영역에서  $y^+ \approx 15$ 인 경우와 마찬가지로 상향 분출현상 및 하향 쓸기현상이 다른 고유구조에 비해 지배적이므로, 양의  $\overline{u'w'}$  그리고 음의  $\overline{v'w'}$ 을 생성한다. 위의 결과를 통해 레이놀즈 전단응력의 생성이 지배적인 고유구조의 방향성에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

위의 조건부 사분면 해석에서 지배적인 고유구조의 방향성이 그림 2의 이차흐름의 방향과 부분적으로 일치하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 쓸기현상이 지배적인 상부 및 하부 모서리 부근에서는 쓸기현상의 방향성이 이차흐름의 방향과 일

치하지만, 분출현상의 경우는 반대인 것으로 나타났다. 이러한 불일치를 야기한 원인은 고유구조의 방향성(상향 또는 하향)을 표현함에 있어 진동속도 성분인  $w$ 의 부호를 사용하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 표현은 고유구조의 방향성과 레이놀즈 전단응력의 생성을 연계하는 데에 있어 유용하다. 그러나  $w$  부호의 사용은 평균유속성분을 고려하지 않기 때문에,  $w$ 의 부호를 사용한 조건부 사분면 해석의 결과가 이차흐름의 양상과 일치하지 않을 수도 있다.

따라서 고유구조의 방향성과 이차흐름 양상의 연계성을 명확히 분석하기 위해 또 다른 조건부 사분면 해석을 수행하였다. 즉, 고유구조의 방향성을 표현함에 있어  $w'$  대신  $w$ 의 부호를 고려하여, 쓸기현상과 분출현상에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성을 조사하였다. 그림 9는 상향 쓸기현상과 상향 분출현상에 의한  $\overline{u'v'}$  생성의 합 그리고 하향 고유구조들에 의한 것을 나타낸 것이다.

그림 9(b)의  $y^+ \approx 15$ 에서는  $z/H < 0.08$ 에서 하향 고유구조들에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성이 상향 고유구조들에 의한 생성과 거의 같다. 이는 그림 2에서 나타나듯이 이 영역에서 특정한 방향성이 없는 이차흐름의 생성을 야기한다.  $0.08 < z/H < 0.7$ 에서는 상향 고유구조들에 의한  $\overline{u'v'}$ 의 생성이 하향 고유구조들에 의한 생성보다 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 이 영역에서 상향 이차흐름의 생성을 초래한다. 또한  $0.7 < z/H < 0.9$ 과  $z/H > 0.9$ 에서는 각각 하향 그리고 상향 고유구조가 지배적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이들 영역에서도 지배적인 고유구조의 방향성과 이차흐름의 양상이 서로 일치하는 것을 알 수 있다.  $y^+ \approx 75$ 의 경우 수로 중앙 대부분의 영역에서 하향 고유구조가 지배적인 것으로 나타났는데, 이 영역은 하향 이차흐름이 형성된 영역으로서 방향성이 서로 일치한다. 반면 그림 9(c)의  $z/H > 0.7$ 에서는 상향 및 하향 고유구조가 거의 동일하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 2를 보면  $z/H > 0.7$ 의 영역은 외측이차흐름이 형성된 영역으로  $y^+ \approx 75$ 는渦의 중심과 가까운 위치로서, 이차흐름의 연직방향흐름이 매우 약하다. 이는 고유구조의 방향성과 일치하는 결과이다. 따라서 위의 결과를 통해 지배적인 고유구조의 방향성이 이차흐름의 양상을 결정짓는다는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 측벽이 존재하는 개수로 난류흐름에서 레이놀즈 전단응력 및 이차흐름의 생성메커니즘을 규명하였다. 이를 위해 정영훈과 최성욱(2005)이 측벽을 갖는 개수로 난류흐름에서 수행한 DNS 자료를 사용하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

평균유속장에서 바닥, 측벽 및 자유수면 부근에 이차흐름이 형성되었다. 특히, 측벽 부근에 형성된 이차흐름을 보면, 상부 및 하부 모서리 부근에서 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 형성된 반면, 그 외의 영역에서는 측벽으로부터 수로 중앙을 향해 분출되는 이차흐름이 형성된 것으로 나타났다. 측벽 부근에서 레이놀즈 전단응력의 분포를 산정하였으며,

고유구조와 연계하여 분석하였다.  $\overline{u'v'}$ 은 측벽 부근의 전체 영역에서 음의 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한  $\overline{u'w'}$ 와  $\overline{v'w'}$ 의 분포에서는 바닥 부근을 제외하고 서로 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다.

사분면 해석을 수행하여 측벽을 향해 침투되는 이차흐름이 생성된 영역에서는 쓸기현상이 지배적인 반면, 측벽으로부터 분출되는 이차흐름이 형성된 영역에서는 분출현상이 지배적인 것을 확인할 수 있었다. 그리고 두 다른 조건부 사분면 해석을 통해 지배적인 고유구조의 방향성이 레이놀즈 전단응력의 생성 및 이차흐름의 양상을 결정짓는다는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 제1저자의 연세대학교 토목·환경공학과 박사학위 논문 중의 일부로서 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 일부 연구비지원(과제번호: 2-3-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 정영훈, 최성욱(2005) 사각형 개수로 난류흐름의 직접수치모의, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권 제2-B호, pp. 115-122.
- Brogli, 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.
- Demuren, A.O. (1991) Calculation of turbulence-driven secondary motion in ducts with arbitrary cross-section, *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 531-537.
- Demuren, A.O. and Rodi, W. (1984) Calculation of turbulence-driven secondary motion in non-circular ducts, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 140, pp. 189-222.
- Gavrilakis, S. (1992) Numerical simulation of low-Reynolds-number turbulent flow through a straight square duct, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 244, pp. 101-129.
- Gessner, F.B. (1973) The origin of secondary flow in turbulent flow along a corner, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 58, pp. 1-25.
- Huser, A. and Birnigen, S. (1993) Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 257, pp. 65-95.
- Joung, Y., Choi, S.-U., and Choi, J.-I. (2006) Direct numerical simulation of turbulent flow in a square duct: an analysis of secondary flows, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, accepted.
- Lauder, 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.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1984) Cellular secondary currents in straight conduit, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 2, pp. 173-193.
- Pope, S.B. (2000) *Turbulent flows*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

(접수일:2005.4.12/심사일:2005.8.10/심사완료일:2005.10.31)