

# 난류 채널유동에서 생성된 거대 파열 현상에 관해서

나 양\*

(2001년 1월 12일 접수, 2001년 6월 15일 심사완료)

## Large Scale Bursting Event in a Channel Flow

Yang Na

**Key Words:** DNS(직접수치모사), Large-scale Bursting Event(거대 파열 현상), Turbulent Channel Flow(난류 채널유동)

### Abstract

A large-scale bursting event has been analyzed in a turbulent channel flow using a data obtained from a direct numerical simulation (DNS). Large-scale, plume-like structures have been frequently observed in many experimental results, but the origin of those structures is far from being fully understood. It is believed that those large scale events occur occasionally but contribute significantly to the generation of Reynolds shear stress in the outer layer. This paper attempts to give detailed examples of those large-scale motions observed in a turbulent channel flow at relatively low Reynolds numbers.

#### 기호설명

- $H$  : 채널높이의 1/2
- $\bar{l}$  : 벽단위로 표시한 와류의 평균 지름
- Q1 : 1사분면으로부터의 난류전단응력 기여도
- Q2 : 2사분면으로부터의 난류전단응력 기여도
- Q3 : 3사분면으로부터의 난류전단응력 기여도
- Q4 : 4사분면으로부터의 난류전단응력 기여도
- $Re$  : 레이놀즈수,  $u_\tau H/\nu$
- $u$  : 주 유동 방향 속도
- $u_\tau$  : 벽면 마찰 속도
- $u'$  : 주 유동 방향 속도의 변동량
- $-\overline{u'v'}$  : 레이놀즈 전단 응력
- $U$  : 평균 주 유동 방향 속도
- $U_b$  : 입구에서의 평균속도
- $v$  : 벽면 수직 방향 속도

- $v'$  : 벽면 수직방향 속도의 변동량
- $w$  : 폭방향 속도
- $x$  : 주 유동 방향
- $y$  : 벽면 수직방향
- $z$  : 폭방향

#### 그리스문자

- $\delta$  : 경계층의 두께
- $\tau$  : 전단 응력
- $\nu$  : 동점성계수

#### 상첨자

- + : 벽좌표계

### 1. 서론

1950년대를 기점으로 하여 Townsend<sup>(1)</sup>를 포함한 많은 연구자들이, 난류의 생성과정을 유동장 내에 존재하는 와류(vortices)의 구조와 연결하려는 시도를 한 이후, 현재까지 많은 실험적, 수치 해석적 연구가 진행되어 왔으나, 여전히 이에 대한 확실한 해답

\* 회원, 건국대학교 기계공학과

E-mail: yangna@konkuk.ac.kr

TEL : (02)450-3467 FAX : (02)447-5886

을 얻지 못하고 있는 실정이다. 벽의 존재로 인해 생겨난 난류 경계층은 벽면으로부터의 거리에 따라 흔히  $y^+ < 100$ 의 벽층(wall layer),  $y/\delta < 0.2$ 까지의 대수층(logarithmic layer), 그리고 이들을 제외한 외층(outer layer) 등으로 나눌 수 있는데, 벽층은 다시 점성저층(viscous sublayer), 완충층(buffer layer) 및 대수층의 아래쪽 부분 등으로 이루어져 있다. 현재 벽층과 외층이 난류구조의 생성 및 그 진화 과정에 미치는 영향 그리고, 그 상호작용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 난류 유동장 해석의 본질적인 어려움, 즉, 3차원, 비정상 상태, 다양한 길이 스케일(length scale)의 존재 및 유동장의 기억효과 등을 복합적으로 취급해야한다는 제약으로 인하여 아직 많은 발전의 여지를 남기고 있다.

난류 구조에 관한 초기의 연구는, 벽층이 난류량 생성에 수동적인(passive) 역할만을 하며, 외층에서 생성된 속도 변동량(velocity fluctuation)에 수동적으로 반응한다는 관점이 우세하였으나, 그 이후 많은 이론적, 실험적 연구에 의해, 난류상태 유지에 필수 불가결한 주 유동 방향의 난류구조(turbulent structure in streamwise direction)가 벽면에 매우 가까운 곳에서 여러 가지 형태로 존재한다는 것이 알려지게 되었다(Panton<sup>(2)</sup>). 이들에 대한 기하학적 형태 및 그 시간에 따른 진화과정에 대한 정확한 이해는 난류 연구에 있어서 매우 기본적이면서도 중요한 해법을 제공하게 될 것이다.

벽층(wall layer)에서는, 전체 난류 경계층에서 생성되는 난류량의 대부분이 간헐적(intermittent) 이면서도, 매우 왕성한 유동 현상으로 기술되는 파열과정(bursting event) 중에 일어난다고 생각되어지고 있다. 이 파열(bursting) 현상은 Kline 등<sup>(3)</sup>에 의해 처음 보고되었으며, 그 이후 1970, 80년대를 통해 이 현상을 이해하기 위한 노력이 널리 진행되어 왔다(Offen & Kline,<sup>(4)</sup> Lu & Willmarth,<sup>(5)</sup> Bogard & Tiederman,<sup>(6)</sup> Luchick & Tiederman<sup>(7)</sup>). 이들 대부분의 연구는 저속층(low-speed streak)이 지나는 본질적인 유동의 불안정성으로 인해 주로  $y^+ = 20 \sim 50$ 의 위치에서 일어나는 점성저층의 파괴(breakup) 현상에 초점을 맞추었다. 한편, 최근 들어 입자 영상 유속계(PIV, particle image velocimetry)의 발전과 더불어 주어진 시간에 2차원 평면에서의 속도를 상당히 정확하게 측정할 수 있게 되었으며, 거대 파열 현상에 기인한 것으로 추측되는 매우 커다란 유동 양상이 ( $x$ - $y$ ) 평면상에서 보고되고 있는데(Liu 등<sup>(8)</sup>), 이를

수치 해석의 결과를 사용하여 검증해 보는 일은 매우 흥미로운 작업일 것이다.

본 연구는 난류 채널유동의 직접수치모사(direct numerical simulation)로부터 얻은 결과를 해석하여, 유동장 내에서 간헐적으로 일어나는 '거대' 파열 현상(large-scale bursting event 또는 superburst)을 검출하고, 그 성질을 알아보는 것이 주목적이다. 여기서 '거대'라는 단어를 사용한 이유는, 기존의 파열 현상 대부분이  $y^+ < 100$ 의 영역에서 일어나는 것들을 지칭하는 것임에 비해, 본 연구에서는  $y^+ = 100$ 의 위치를 넘는 곳으로까지 확장되어 일어나는, 간헐적이지만 강한 세기를 가지는 유동현상을 의미하기 때문이다.

연구 방법으로는 난류 채널유동을 직접수치 모사의 기법으로 해석하여 얻은 3차원 데이터를 분석하였으며, 마찰속도(friction velocity)와 채널 높이의 1/2을 기준으로 한 레이놀즈수(Reynolds number)가 150과 300인 두 가지 경우를 고려하였다. 앞서 언급한 바와 같이 난류 경계층에서 대수층은 보통  $y^+ \approx 30 \sim 40$ 에서  $y/\delta \approx 0.2$ 의 높이까지 위치하게 되므로, 본 연구에 사용된 채널유동의 경우,  $\delta$ 를 대략  $H$ 로 잡으면,  $y/H \approx 0.2$ 의 위치는  $Re = 150, 300$ 의 경우 각각  $y^+ \approx 30, 60$ 이 되는데, 이는 대체로 대수층이 시작하는 위치에 해당함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 낮은 레이놀즈수의 유동에서는 대수층이 완전히 발달하지 못했다고 할 수 있으며, 앞서 거대 파열 현상의 정의를 위해 임의로 사용된  $y^+ \approx 100$ 의 위치가 의미하는 바도 명쾌하지는 않다.

그러나 유동장을 다각적으로 관찰한 결과, Kline 등<sup>(3)</sup>이 언급한 고전적 의미의 파열 현상(bursting event) 대부분이  $y^+ < 100$ 의 지역에서 일어나고 있으므로,  $y^+ \approx 100$ 의 위치는 이들을 효과적으로 제외할 수 있다는 점에서, 외층에서의 유동 현상을 고찰하고자 하는 본 연구의 목적에 적합하다고 할 수 있으며, 또한  $y^+ = 100$ 은 현 유동장의 대수층이 충분히 발달하지 못하였음에도 불구하고 대체로 외층의 성질을 가지는 영역에 위치한다고 생각되어지므로, 외층에서만 관측되는 거대 파열 현상을 검출하기 위해 선택된 임의로 기준이라고 할 수 있다.

기존의 직접수치모사(DNS)에 의한 많은 연구들이 본 논문의 유동과 비슷한 레이놀즈수에서 이

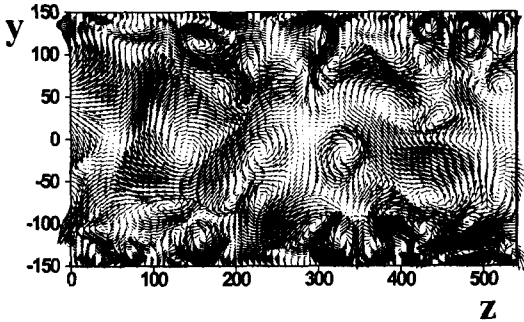


Fig. 1 Instantaneous velocity vectors in (y-z) plane for  $Re=150$ . Coordinates are normalized by wall variables

투어져 왔으며, 이로부터 얻은 결과의 상당 부분이 높은 레이놀즈수를 가지는 유동에서 관측된 물리적 현상들을 비교적 잘 기술하고 있으므로, 본 연구의 결과도 상당히 현실적일 수 있을 것으로 생각된다.

수치해석 방법으로는 난류유동의 해석에 광범위하게 사용되는 pseudo-spectral 방법을 사용하였으며, 주 유동 방향(streamwise direction)  $x$ 와 폭방향(spanwise direction)  $z$ 로는 주기 경계조건(periodic boundary condition)을, 벽면에 수직인 방향(wall normal direction)  $y$ 로는 점착조건(no-slip condition)을 사용하였다. 계산영역의 크기는 벽단위(wall unit)로 표시하여,  $Re=300$ 의 경우  $x, y, z$  방향으로 각각 3800, 600, 1900이며,  $Re=150$ 의 경우는 1900, 300, 950이다. 격자수는  $Re=300$ 의 경우  $x, y, z$  방향으로 각각 256, 128, 256개이며,  $Re=150$ 인 경우 128, 193, 128개이다. 수치해석방법의 자세한 내용 및 유동장의 검증은 Lyons 등<sup>(9)</sup>에 잘 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 편의상, 이 논문에서 사용된 결과들은 특별히 다르게 명시되지 않는 한 벽단위(wall unit)로 무차원화 되었으며, 상첨자 +를 생략하도록 한다.

또한 본 논문의 결과에서는, 편의상 (x-y), (y-z) 평면 각각의 경우, 속도 벡터는 각각 같은 속도 scale을 사용하여 표시하였다.

## 2. 벽면 근처에서의 난류유동

### 2.1 점성층(viscous layer)에서의 와류

기존의 많은 연구 결과들은 벽면에 인접한 지

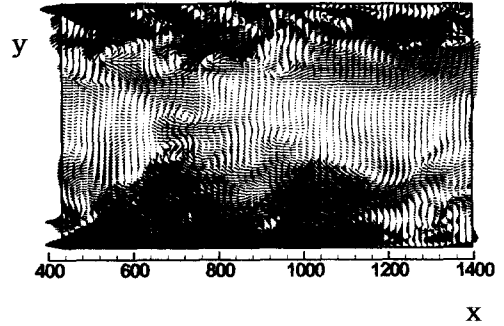


Fig. 2 An example of large-scale burst in (x-y) plane

역에서, 주 유동방향의 와류(vortices)들이 난류의 생성 및 유지에 매우 중요한 역할을 하고 있음을 보여주고 있다(Panton<sup>(2)</sup>). 실제로 난류량의 생산(production)은 대략  $y^+ \approx 12$ 의 위치에서 최대값을 가진다고 알려져 있으며, 와류들의 평균 크기는 대략  $l^+ \approx 50$  정도로 생각되고 있는데, 이들은 낮은 운동량(momentum)을 가지고 있는 벽면 근처의 유동을 위로 올리고, 높은 운동량을 가지고 진행되는 유동을 벽 근처로 끌어내림으로써, 운동량 교환(momentum exchange)을 이루게 하여, 소위 레이놀즈 응력(Reynolds stress)을 생성하게 된다. 한편, 이들 와류들의 크기는 난류의 생산과 소산(dissipation)의 균형이 이루어져야 한다는 조건에 의해 대략적으로 정해진다고 생각되어 진다(Lyons 등<sup>(10)</sup>). Fig. 1은  $Re=150$ 의 경우, 유동을 주어진 한 순간에 (y-z) 평면에서 본 것인데, x 방향의 와류들이 벽면 근처에서 생성됨을 보여주고 있다. 이들 와류들의 상호 작용으로 인해 Kline 등<sup>(3)</sup>이 언급한 파열 현상이 일어난다고 생각된다(Jeong 등<sup>(11)</sup>).

### 2.2 난류구조와 파열 현상

와류(vortices)의 생성과정에 대한 정확한 이해는 난류 경계층의 제어 및 난류 모델의 개발에 필수 불가결한 것이라고 할 수 있는데, 그 현상의 복잡성으로 인해 아직도 확실한 설명이 이루어지지 않고 있다(Panton<sup>(2)</sup>). 현재까지 여러 가지 가설들이 제안되었으나, 하나의 이론만으로는 모든 물리적 현상을 설명하지 못하는 실정이지만, 대규모 컴퓨터의 발전과 더불어 PIV기법 등을 이

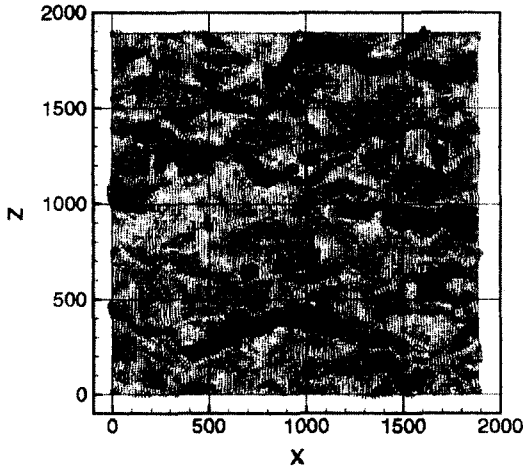


Fig. 3 Fluctuating vector field in (x-z) plane with contours of instantaneous Q2 event

용한 연구가 활발히 진행되고 있으므로, 좀 더 현실성 있는 결과가 곧 나올 것으로 기대되고 있다.

현재까지는 벽면 근처에 존재하는, 근본적으로 불안정(unstable)한 저속층(low speed streak)이 유동장 내에 존재하는 미소 교란(small disturbance)을 비선형적으로 증폭시킴으로써 난류구조를 생성해낸다는 견해(Jeong 등<sup>(11)</sup>)가 우세하다. 이와 같이 생성된 구조들은 유동 방향과 약간의 각도를 유지하며 전파되어 가면서 벽면 근처의 낮은 운동량을 가지는 저속 유동을 위로 퍼 올리는 역할을 한다. 이는 소위 Q2(quadrant 2) 현상을 야기시키게 되며, 기존의 고전적 의미의 파열 현상(bursting event), 즉  $20 < y^+ < 50$ 의 위치에서 관측되는 비정상 상태의 격렬한 유동 현상과 직접적으로 연관되어 진다고 생각된다(Bogard & Tiederman,<sup>(6)</sup> Luchick & Tiederman,<sup>(7)</sup> Jeong 등<sup>(11)</sup>).

### 3. 거대 파열(bursting) 현상

#### 3.1 거대 파열 현상의 정의

Fig. 2는 거대 파열 현상을 보여주는 한 예인데,  $Re=300$ 의 유동장으로부터 얻은 결과이다. 주어진 한 순간에서 속도의 변동량(fluctuating velocity) 벡터를 (x-y)평면에 그린 것으로,  $x \approx$

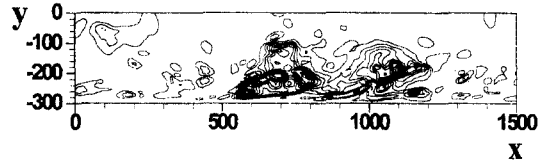


Fig. 4 Fluctuating  $-u'v'$  contours in (x-y) plane ( $z=364$ ). This plane corresponds to superbursts shown in Fig. 2. Contours are from -3.5 to 11.5 with the increment of 1.

800, 1100의 위치에서 대규모의 유동 현상이 채널의 중심선까지 확장되어 있는 것을 알 수 있다. PIV 기법을 사용한 기존의 몇몇 실험 결과(Liu 등<sup>(8)</sup>)들은 다양한 레이놀즈수에서 Fig. 2에서와 같은 유동 현상을 보고하였다. 그러나 이와 같은 현상이 생기는 경우, 매우 높은 난류 전단 응력이 생겨날 것으로 추측하였으나, 이 현상을 일으키는 원인에 대해서는 자세히 밝히지 못하였다. 그 주된 이유는 사용된 측정기법의 제약에 기인한다고 볼 수 있다. 즉, PIV 기법으로는 동시에 3차원 유동장을 측정할 수 없기 때문에 이 현상과 관련한 유동장의 정보를 다각적으로 얻을 수 없었기 때문이다.

한편 직접수치모사 기법의 장점으로는 3차원 유동장을 시간에 따라 관찰할 수 있다는 것인데, Fig. 3은 Fig. 2에 나타낸 순간유동장을 (x-z) 평면에서 본 것이다. 이는 아래벽면으로부터  $y^+=152$ 만큼 떨어진 수평 평면이며, 속도의 변동량 벡터와  $(-u'v')_{Q2} > -2.5 \overline{uv}$  인 지역이 등고선으로 함께 표시되어 있다. 여기서 높은 Q2의 threshold값(레이놀즈 응력의 2.5배)을 검출 조건으로 선택한 이유는  $u < 0$  이나 VITA (variable interval time average) 현상 등에 비해 Q2가 파열 현상을 검출해내는데 있어 오차가 상대적으로 작다는 Bogard & Tiederman<sup>(6)</sup>의 결과에 따른 것이다. 실선으로 짙게 표시된 부분이 강한 Q2지역을 나타내고 있으며, 이는 바로 거대 파열 현상에 의한 것이라고 생각되어 진다. 한 예로, 파선 화살표로 표시되어 있는 평면( $z \approx 364$ )이 Fig. 2에 해당한다.

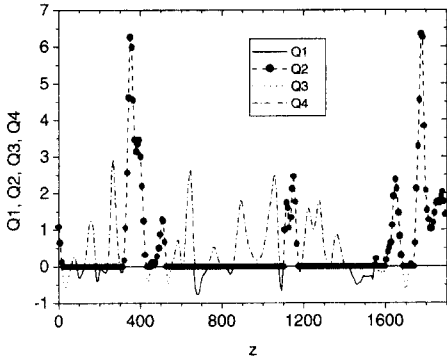
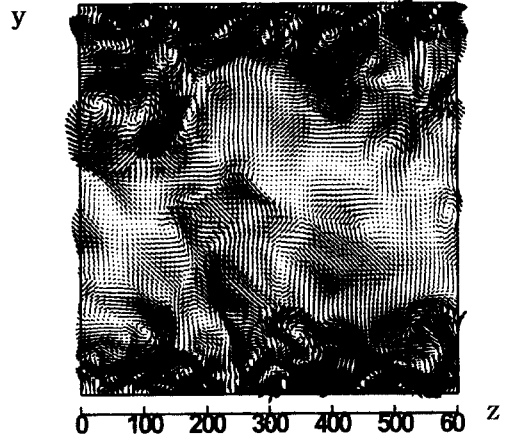


Fig. 5 Instantaneous  $-u'v'$  along  $x=1039$  at  $y=152$

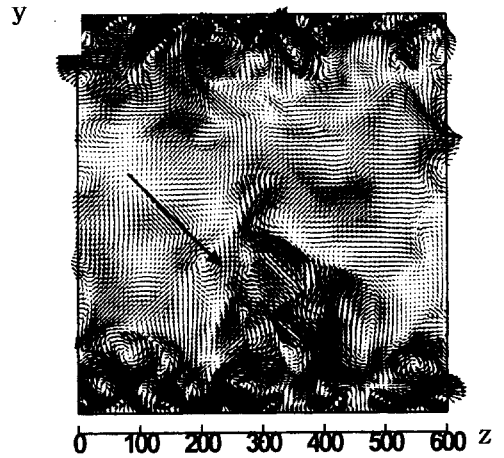
3.2 외층에서의 레이놀즈응력 생성

Fig. 2에 보인 것과 같은 거대 파열 현상은 Townsend<sup>(1)</sup>가 언급한 얇은 병풍 모양(thin plume-like)의 유동 양상과 매우 비슷하다. 또한  $u' < 0, v' > 0$ 의 성질을 수반하기 때문에 Q2로부터의 큰 기여도를 가지게 되며, 외층(outer layer)에서 레이놀즈 전단응력 생성의 중요한 원천이 된다. Fig. 4는 Fig. 3에서  $z=364$ 의 직선을 따라가는  $(x-y)$ 평면으로서, Fig. 2의 채널 하부에 보여진 거대 파열 현상의 순간에서,  $-u'v'$ 의 등고선을 그린 것인데, 파열 현상이 있는 지역이 높은  $-u'v'$ 의 값을 가지는 영역과 일치함을 보여주고 있다. 실제로 등고선의 값이 각각의  $y$  위치에서 시간 평균값으로 얻은  $-\overline{u'v'}$ 보다 상당히 크기 때문에, 외층에서 난류전단응력을 발생시키는 거대 파열 현상이 매우 간헐적으로 일어나는 것을 의미한다.

Fig. 5는 Fig. 3에 보여진 유동장에서  $x=1040$ 의 위치에서  $z$ 방향을 가로지르는 선을 따라  $-u'v'$ 을 Q1, Q2, Q3, Q4로 나누어 표시한 것이다. 높은 Q2 값을 가지는 지역이 거대 파열 현상이 일어나고 있는 것을 나타내며, 이 곳에서는  $-\overline{u'v'}$ 에 비해 매우 높은 난류 전단 응력이 생성되는 것을 보여주고 있다. 한편 대략적으로 두 개의 Q2 봉우리(peak) 사이의 간격은 대체로  $H$ 로 스케일된다고 볼 수 있는데, 이는 고전적 파열



(a)  $x=430$



(b)  $x=670$

Fig. 6 Fluctuating velocity vectors in  $(y-z)$  plane corresponding to that of Fig. 2

현상과는 다른 점이며, 거대 파열 현상의 특징 중의 하나가 된다. 길이 스케일(length scale)에 대한 정확한 정보를 얻기 위해 POD(Proper Orthogonal Decomposition) 해석, 또는 에너지 스펙트럼을 구해보는 것은 매우 의미 있는 일이 될 것이다. 한편 시간 스케일(time scale)을 구하는 일은 수치해석의 총 계산 시간을 고려하여 볼 때, 경제적 측면에서 상당히 어려운 작업이 된다.

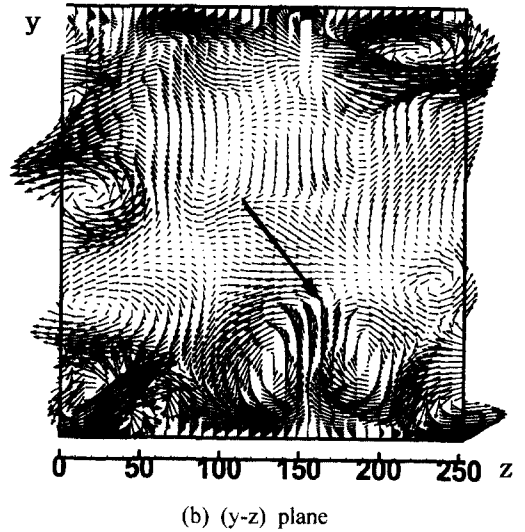
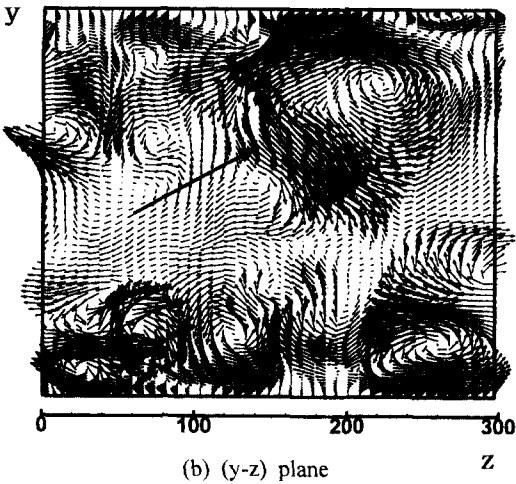
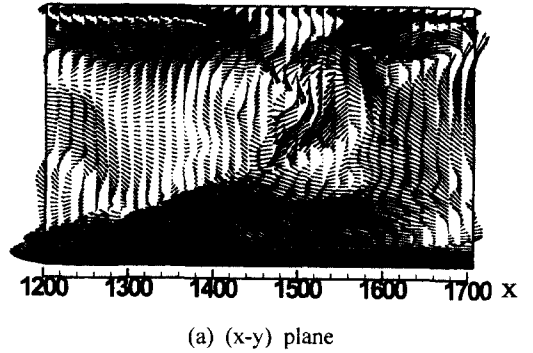
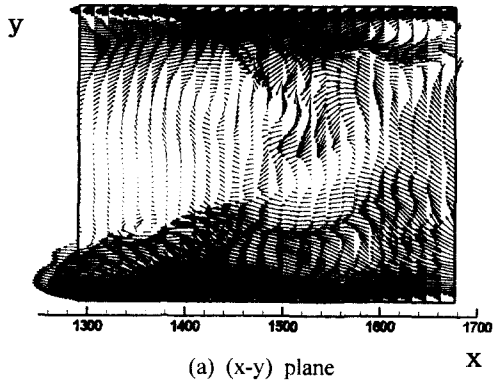


Fig. 7 Fluctuating velocity fields for  $Re=150$ .  
The upper part of the channel shows superburst

Fig. 8 Fluctuating velocity fields for  $Re=150$ .  
The lower part of the channel shows superburst

### 3.3 거대 파열 현상의 예

앞서의 Fig. 2에 보여진 유동장을 ( $y-z$ ) 평면에서 보면 Fig. 6과 같다. 즉, 거대 파열 현상의 상류( $x=430$ )에서는 평범한 유동장의 형태가 보이나, 하류( $x=670$ )에서는 여러 개의  $x$ 방향의 와류들(vortices)이 서로 상호작용을 하여 아래 벽면으로부터 상당히 먼 곳까지 유동을 퍼 올리고 있다. Fig. 2에 보여진 많은 Q2지역들이 Fig. 6(b)과 매우 유사한 형태로 일어나고 있는데, 이는 유동장 내에서 일어나는 거대 파열 현상이 와구조(vortical structure)와 밀접한 관련을 가지고 있는 것을 의미하며, 이는 와구조와 관계없을 것으로 추측한 Townsend<sup>(1)</sup>의 결과와는 다르다.

Fig. 7은  $Re=150$ 의 유동장으로부터 얻은 결과인데, Fig. 6과는 다르게, 위 벽면 근처에서 와류들의 상호작용과 무관한 하나의 거대한 와류(vortex)가 형성된 후, 벽면 근처의 저속 유동을 채널 중심부로 보냄으로써, 거대 파열 현상을 일으키고 있다. 레이놀즈수가 낮은 유동의 경우, 채널 높이에 비해 상대적으로 거대한 난류구조가 종종 관찰되는데, 이는 벽단위(wall unit)로 무차원화된 채널높이가 레이놀즈수가 감소함에 따라 줄어들기 때문이다. 따라서 이러한 경우 낮은 레이놀즈수 효과를 고려하여야 할 것이다. Fig. 7은 거대 파열 현상을 일으키는데 있어, 상호작용을 하는 2개 이상의 와류들이 반드시 필요하지 않다는 것을 보여주고 있으나 어떤 과정으로 이

와 같은 거대한 구조가 생성되는 지에 대해서는 확실하지 않다. 다만, Fig. 7(b)의 채널 상부에 보여진 거대 구조의 왼쪽은 압력이 상대적으로 높아, 마치 가상 벽의 효과를 거대 와류에게 주고 있으나, 이 현상이 거대구조의 원인 또는 결과(cause or effect)인지는 알 수 없다.

Fig. 8은 마지막 예로서, 두 개의 서로 반대방향으로 회전하고 있는 와류들(counter rotating vortices)이 상호작용을 하여 두 와류들 사이에 위치한 저속 유동을 퍼 올리고 있는 것이 채널의 하단(Fig. 8(b)의  $z \approx 160$ )에 보여지고 있다. 이는 지금까지 널리 사용되어 오던, 벽면 근처의 유동을 기술하는 난류 모델의 전형적인 형태로서 2개의 와류가 서로 상호 작용을 함으로써 병풍 모양(plume-like)의 파열 현상을 일으키고 있다. 이와 같은 2개의 서로 반대 방향으로 회전하는 와류 모델은, 벽면 근처에서 일어나는 여러 가지 유동현상의 물리적 설명에 매우 편리한 것이나, 본 연구에 사용된 수치해석 데이터에 의하면, 단독으로 존재하는 와류들보다 그 발생 빈도수가 상당히 떨어진다 (대략 1/3 이하인 것으로 생각됨).

이와 같이 간략하게 거대 파열 현상을 기술하는 3가지 형태의 대표적 모델을 보였으나, 난류 유동장의 근본적인 복잡성으로 인하여 더욱 다양한 형태로 거대 파열 현상이 일어날 수 있다고 생각되어 진다. 그러나 많은 경우 이는 와구조들(vortical structure)의 존재와 밀접한 관련이 있다고 보여지며, 유동장 내의 모든 와류들이 거대 파열 현상을 일으키지는 않으므로 어떠한 조건에서 이 현상이 일어나는 지에 대한 연구는 앞으로 계속 수행되어야 할 것이다.

#### 4. 결론

난류의 생산(production)은 점성 벽층(viscous wall layer)에서 최대값을 가지며 유동방향으로 진행하는 난류구조와 밀접한 관계가 있다. 한편, 벽면에서 떨어진 외층(outer layer)에서의 난류 전단 응력(turbulent shear stress)의 생성은 외층으로 뻗어 나오는 거대 파열 현상, 즉 간헐적으로 발생하는 병풍 모양(plume-like)의 유동에 의한 것으로 생각되어 진다. 이는 유동장 내에 존재하는 와류들과 밀접한 관계가 있다고 생각되는데, 그 양상

이 여러 가지 형태로 나타나기 때문에, 구체적으로 어떤 경우에 거대 파열 현상을 야기시키는 지에 대해서는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

외층에서의 난류 전단응력 및 난류량 생성의 크기는 벽면 가까운 부분에 비해 그 크기가 작으므로 그 중요성이 떨어진다고 생각할 수 있으나, 거대 파열 현상이 발생하는 빈도수(frequency)를 고려하면, 그 시간 평균값이 비록 작다고는 하나 순간 유동장이 가지는 역학적 역할의 중요성이 떨어진다고는 볼 수 없다. 이를 조금 더 자세히 알아보기 위해서는 이 위치에서의 주파수 스펙트럼 해석이나, POD의 방법 등을 통한 레이놀즈 전단응력의 성질을 살펴보는 것도 좋은 방법이 될 것이다. 거대 파열 현상은 대체로 외층 스케일의 특성을 가지는 듯 하며, 이는 Kline 등<sup>(3)</sup>이 언급한 벽면 근처에서 관찰되는 고전적 의미의 파열 현상(bursting event)과는 다르다. 이들이 벽층에 어떠한 영향을 주는지 살펴보는 것은 매우 흥미로운 차후의 연구가 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000 -1 -30400-010-3)지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Townsend, A. A., 1956, *The Structure of Turbulent Shear Flow*, 1st ed. Cambridge University, Cambridge.
- (2) Panton, R. L., 1997, *Self-sustaining Mechanism of Wall Turbulence*, Computational Mechanics Publication, Southampton, U. K.
- (3) Kline, S. J., Reynolds, W. C., Schraub, F. A. and Runstadler, P. W., 1967, "The Structure of Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 741~773.
- (4) Offen, G. R. and Kline, S. J., 1973, "A Proposed Model of the Bursting Process in Turbulent Boundary Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 70, pp. 209~228.
- (5) Lu, S. S. and Willmarth, W. W., 1973, "Measurements of the Structure of the Reynolds

- Stress in a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 60, pp. 481~511.
- (6) Bogard, D. G. and Tiederman, W. G., 1986, "Burst Detection with Single-point Velocity Measurements," *J. Fluid Mech.*, Vol. 162, pp. 389~413.
- (7) Luchik, T. S. and Tiederman, W. G., 1987, "Timescale and Structure of Ejections and Burst in Turbulent Channel Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 174, pp. 529~552.
- (8) Liu, Z. C., Adrian, R. J. and Hanratty, T. J., 1995, "A Study of Turbulent Channel Flow with 2D Orthogonal Decomposition," *American Physical Society Meeting*, Irvine, California.
- (9) Lyons, S. L., Hanratty, T. J. and McLaughlin, J. B., 1991, "Large-scale Computer Simulation of Fully Developed Turbulent Channel Flow with Heat Transfer," *Int. J. Num. Methods with Fluids*, Vol. 13, pp. 999~1028.
- (10) Lyons, S. L., Nikolaides, C. and Hanratty, T. J., 1988, "The Size of Turbulent Eddies Close to a Wall," *AICH J.*, Vol. 34, pp. 938~945.
- (11) Jeong, J., Hussain, F., Schoppa, W. and Kim, J., 1997, "Coherent Structures Near the Wall in a Turbulent Channel Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 332, p. 185.