

개수로 흐름에서 Bursting 현상의 주기 결정

Determination of Bursting Periods in Open-Channel Flows

○박문형* · 최성욱**

1. 서론

거친 하상을 갖는 개수로 흐름의 바닥 부근에서는 흐름의 분리 (separation)가 발생하며, 분리된 흐름은 상승과 하강을 반복하게 된다. 이러한 상승과 하강을 주기적으로 반복하며 발생하는 와 (渦)를 bursting 현상이라고 한다. Bursting 현상의 주기성은 하상 토립자 유입의 수리학적 조건, 흐름 내 부유사의 농도 분포, 그리고 하상의 사구 형성과 밀접한 관련이 있다.

Bursting 현상의 주기는 주로 uw 사분면 기법 (uw quadrant threshold)과 VITA (Variable Interval Time Average) 기법을 이용하여 결정할 수 있다. Lu와 Willmarth (1973)에 의하여 제안된 uw 사분면 기법은 주흐름 방향과 연직 방향의 진동속도 (fluctuation velocity component)를 측정하여 bursting 현상의 구조와 주기를 파악하며, Blackwelder와 Kaipan (1976)이 제안한 VITA 기법은 주흐름방향의 진동속도만을 고려하여 bursting 현상의 특성을 파악한다. uw 사분면 기법과 VITA 기법을 bursting 현상의 가시화 실험 (visualization)과 비교하여 각 기법의 정도를 분석한 Bogard와 Tiederman (1986)의 연구에 의하면, uw 사분면 기법이 VITA 기법에 비하여 신뢰성 있는 결과를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 반면에 Wallace 등 (1977)은 주흐름 방향의 속도성분이 bursting 현상의 성질을 결정하는 주요 인자라고 밝힌바 있다.

본 연구에서는 uw 사분면 기법과 VITA 기법에서 사용되는 매개변수의 결정방법과 민감도에 대하여 고찰하였다. 그리고 각 기법들을 이용하여 균일한 조도높이를 가지는 개수로 흐름에서 bursting 현상의 주기를 계산하여 결과를 비교하였다. 난류당의 측정을 위해서 음파 도플러 유속계 (ADV: Acoustic Doppler Velocimeter)를 사용하였으며, 하상의 균일한 조도높이를 구현하기 위하여 개수로 실험장치에 하상보호용 콘크리트 블록을 포설하였다. 본 연구는 흐름 내 부유사의 농도분포나 하상 토립자의 거동 분석 등의 연구에 응용될 수 있을 것이다.

2. Bursting 현상의 검출 및 주기의 결정

Bursting 현상의 주기 (bursting period, $\overline{T_b}$)는 총 관측시간 내에서 검출되는 분출현상 (ejection event) 또는 쓸기현상 (sweep event)의 발생횟수를 산정하여 총 관측시간을 발생횟수로 나누어 결정할 수 있다. 이 때 분출현상의 발생횟수로 나눈 경우는 분출현상의 주기 ($\overline{T_e}$)가 되며, 쓸기현상의 발생횟수로 나눈 경우는 쓸기현상의 주기 ($\overline{T_s}$)가 된다. Bursting 현상에 있어 분출현상이 쓸기현상보다 지배적이므로 일반적으로 bursting 현상의 주기는 분출현상의 주기로 대체할 수 있다 (Lu와 Willmarth, 1973). Bursting 현상의 주기를 결정하기 위해서는 먼저 bursting 현상을 검출하여야 한다. 본 연구에서는 uw 사분면 기법과 VITA 기법을 이용하여 bursting 현상을 검출하였다.

2.1 uw 사분면 기법

uw 사분면 기법은 주흐름 방향 (x)과 연직 방향 (z)의 진동속도인 u 와 w 를 이용하여 bursting 현상을 검출하며, bursting 현상이 레이놀즈 응력에 미치는 영향과 bursting 현상의 주기 등을 파악할 수 있다. 최성욱과 박문형 (2001)은 본 연구와 동일한 실험 조건에 대하여 uw 사분면 기법을 이용하여 순간 레이놀즈 응력의 조건부 확률과 bursting 현상의 주기에 대하여 연구한 바 있다. 순간 레이놀즈 응력

* 연세대학교 대학원 박사과정 (E-mail: liege@yonsei.ac.kr)

** 연세대학교 공과대학 사회환경·건축공학부 부교수 (E-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

은 u 와 w 의 부호에 따라 그림 1에 제시된 바와 같이 외향상호작용 (outward interaction), 분출현상, 내향상호작용 (inward interaction), 그리고 쓸기현상의 4개 영역으로 구분할 수 있다. 그림에서 사선으로 표시된 영역은 배제구간으로서 임계값 H (hole size; threshold level)는 시간 평균된 레이놀즈 응력에 대한 임의 크기의 무차원 레이놀즈 응력으로 다음의 식과 같이 정의된다.

$$H = \left| \frac{uw}{\overline{uw}} \right| \quad (1)$$

여기서 \overline{uw} 는 시간 평균된 레이놀즈 응력이다. 식 (1)은 uw 사분면 기법에서 bursting 현상의 검출 기준으로 사용되며, 각 사분면에서 무차원화된 순간 레이놀즈 응력의 절대값이 식 (1)에 의하여 결정된 H 보다 작은 경우에는 4개의 영역 (외향상호작용, 분출, 내향상호작용, 그리고 쓸기)에서 제외된다.

2.2 VITA 기법

VITA 기법은 Blackwelder와 Kaplan (1976)에 의하여 제시된 방법으로서 x -방향의 진동속도성분만을 이용하여 bursting 현상의 검출한다. 검출기준을 정의하기 위하여 흐름 방향의 진동속도 u 의 단시간 분산 (short time variance: $v\hat{a}r$)을 구한다. Kim 등 (1971)이 수행한 흐름 가시화 실험 결과에 의하면 순간적으로 발생하는 큰 난류는 강한 x -방향의 진동속도와 함께 생성되기 때문에, 단시간 분산을 이용하여 bursting 현상을 검출할 수 있게 된다. 임의의 진동속도에 대한 단시간 분산은 다음과 같다.

$$v\hat{a}r(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2} u(t)^2 dt - \left[\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau/2}^{t+\tau/2} u(t) dt \right]^2 \quad (2)$$

여기서 τ 는 임의의 평균시간을 의미한다. 평균시간이 증가할수록 검출되는 bursting 현상의 수도 증가하는 것으로 알려져 있다 (Johansson과 Alfredsson, 1984). τ 가 무한대의 값을 가지는 경우, 우변의 두 번째 항은 0으로 수렴하며, $v\hat{a}r$ 는 $u(t)$ 의 분산이 된다. 그리고 τ 가 0으로 수렴하는 경우, 우변의 두항은 같은 값을 가지며 $v\hat{a}r$ 는 0이 된다. 단시간 분산을 이용하여 검출함수를 다음과 같이 정의한다.

$$D(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } v\hat{a}r > k u'^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 k 는 VITA 기법의 임계값, 그리고 u' 은 난류강도이다. k 가 증가할수록 검출되는 bursting 현상의 수는 감소하므로, 임계값 k 를 적절하게 정의하여야 한다. VITA 기법에서는 식 (3)의 검출함수 이외에 추가의 검출기준을 사용한다. 즉, 진동속도 성분의 가속도를 검출의 기준으로 사용하게 되는데, 가속도가 양과 음의 값을 가지는 경우를 각각 쓸기현상과 분출현상으로 정의한다. 따라서 분출현상과 쓸기현상은 다음과 같은 조건을 만족한다.

- 분출현상

$$D(t) = 1, \quad du(t)/dt < 0 \quad (4a)$$

- 쓸기현상

$$D(t) = 1, \quad du(t)/dt > 0 \quad (4b)$$

3. 실험장치

실험은 폭 0.9 m, 높이 0.6 m, 그리고 길이 12 m의 가변경사식 개수로 실험장치에서 경사를 0.0007로 설정하여 실시되었다. 본 연구에서 수행한 실험 조건을 정리하면 표 1과 같다. 표에서 q 는 단위폭당 유량, U_m 는 단면평균유속, h 는 수심, u_* 는 전단속도, Re 는 Reynolds 수, Fr 은 Froude 수, 그리고 k_{s+} ($= k_s u_* / \nu$)는 무차원 조도높이로서 조도높이 k_s 는 블록의 높이를 이용하였다. 일정한 조도높이를 구현하

기 위하여 동일한 형상을 가진 하상보호용 콘크리트 블록을 개수로 바닥에 포설하였다. 사용한 블록의 조도 요소는 상부폭 6.7 mm, 하부폭 20 mm, 그리고 높이가 10 mm로서 조도 요소 사이의 거리는 상부폭 만큼 떨어져 있다. 그림 2는 하상에 포설된 조도 요소의 개략도를 나타내고 있다. 좌표축은 주흐름방향과 연직 방향을 각각 x 와 z 축으로 설정하였고, 축의 기준면은 조도 요소의 하단부로 하였다. 실험에 대한 자세한 사항은 최성욱과 임동균 (2001)에 제시되어 있다. 유속의 측정은 유입부로부터 8 m 떨어진 지점에서 수행하였다. 유속 측정의 장비로는 미국 Sontek 사의 제품인 3차원 ADV를 사용하였다. ADV는 초당 최대 25개의 아날로그 신호를 측정할 수 있다. ADV의 측정부피 (sampling volume)는 0.25 이내이고 유속의 허용오차는 0.1 mm/sec이며, 신호를 25 Hz로 측정할 때 무작위성 잡음 (random noise)은 1% 정도로 알려져 있다.

4. 실험결과

4.1 매개변수의 민감도

uvw 사분면 기법을 이용하여 산정된 분출현상과 쓸기현상의 주기를 임계값 (H)의 변화에 따라 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 조도높이 위와 아래에서의 주기에 해당된다. 그림에서 H 가 증가함에 따라 bursting 현상의 주기는 크게 증가하며, 조도높이의 위와 아래에서 각각 쓸기현상과 분출현상의 주기가 크게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. Lu와 Willmarth (1973)는 H 의 값을 분출현상과 쓸기현상에 대하여 각각 4.0-4.5와 2.25-2.75의 범위로 제시하였으며, Nezu와 Nakagawa (1993)는 분출현상과 쓸기현상에 대하여 각각 2.1과 1.1의 값을 제시하였다. 본 연구에서는 Nezu와 Nakagawa (1993)가 제안한 값을 사용하였다.

$z = 0.116k$ 지점에 대하여 VITA 기법에서 사용되는 매개변수인 평균시간 (τ)과 임계값 (k)의 변화에 따른 bursting 현상의 수를 파악하여 각각의 민감도를 분석하였다. VITA 기법에서 τ 와 k 의 영향 및 각 매개변수의 물리적 의미는 Johansson과 Alfredson (1982)에 의하여 자세히 연구된 바 있다. 그림 4는 k 를 1로 설정하여 평균시간을 변화시켰을 때 검출되는 bursting 현상의 수를 나타낸 것으로서, 가로축과 세로축은 각각 u_*^2/ν 에 대한 무차원 평균시간 (τ_+)과 검출되는 bursting 현상의 수를 나타낸다. 그림에서 $\tau_+ \approx 1000$ 까지 검출되는 bursting 현상의 수는 τ_+ 에 비례하여 증가하다가 이후 구간에서는 불규칙적으로 증가했다 감소하는 양상을 보이고 있다. 한편, τ_+ 가 약 1250에서 검출되는 bursting 현상의 수가 최대값을 보이고 있으며, 1500보다 큰 구간에서는 검출되는 bursting 현상의 수는 130 정도의 값에 수렴하고 있다. Nino (1995)는 단시간 분산에 적용되는 평균시간 결정방법으로서 검출되는 bursting 현상의 수가 최대인 시간을 추천하였으며, 매끈한 하상 및 무차원 조도높이 (k_{s+})가 30 전후인 하상에 대하여 $\tau_+ = 10-30$ 의 값을 가지는 것을 보였다. Blackwelder와 Kaplan (1976)은 매끈한 하상의 흐름에서 단시간 분산을 결정하기 위한 평균시간을 $\tau_+ = 10$ 으로 제시하였다. 본 연구에서는 Nino (1995)가 제시한 방법으로부터 결정된 $\tau_+ = 1250$ 으로 적용하였다. 그러나 Nino (1995)와 Blackwelder와 Kaplan (1976)이 제시한 방법을 적용하기 위해서는 평균시간의 값이 0.01-0.03 초 사이에 있어야 하고 ($\because \tau = (10-30)\nu/u_*^2$), 이를 위해서는 유속장치의 측정속도가 100 Hz 이상이어야 한다. 또한 본 실험에서 발생된 흐름의 무차원 조도높이 (k_{s+})는 270 정도로서 완전히 거친 하상을 나타내며, 따라서 기존에 제시된 결과와는 차이가 있을 것으로 판단된다.

그림 5에는 $\tau_+ = 1250$ 일 때 k 의 변화에 따른 검출되는 bursting 현상의 수를 도시하였다. 그림에서 k 가 증가함에 따라 검출된 bursting 현상의 수가 급격히 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 k 는 1-1.2의 값이 사용되며 (Bogard와 Tiederman, 1986), 본 연구에서는 1의 값을 적용하였다.

4.2 Bursting 현상의 주기

그림 6은 수심의 변화에 따른 bursting 현상의 주기를 나타낸다. 그림에서 bursting 현상의 주기는

시간평균유속의 최대값 (U_{max})과 수심을 이용하여 무차원으로 만들었으며, 기호는 uw 사분면 기법과 VITA 기법에 의해 산정된 주기이고 실선은 Nezu와 Nakagawa (1993)가 제시한 주기의 범위로서 다음과 같다.

$$\frac{\overline{T_b}U_{max}}{h} \approx \frac{\overline{T_e}U_{max}}{h} \approx \frac{\overline{T_s}U_{max}}{h} \approx 1.5-3.0 \quad (5)$$

전반적으로 두 방법에 의하여 산정된 bursting 현상의 주기가 Nezu와 Nakagawa (1993)가 제시한 범위 내에서 형성되고 있음을 볼 수 있다. 그림 6(a)는 분출현상의 주기를 나타낸다. 조도높이 아래 부분 ($z < 0.07h$)에서 VITA 기법에 의하여 산정된 분출현상의 주기가 uw 사분면 기법에 의하여 산정된 주기보다 작으며, 이후 구간에서는 두 기법에 의한 결과가 비슷하게 나타나고 있다. 그림 6(b)는 쓸기현상의 주기를 나타내고 있다. 그림에서 VITA 기법에 의하여 산정된 쓸기현상의 주기는 uw 사분면 기법에 의하여 산정된 주기보다 전반적으로 크게 나타나고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 균일한 조도높이의 하상 위를 흐르는 개수로 흐름에서 bursting 현상의 주기에 대하여 고찰하였다. 개수로 실험에서 바닥의 균일한 조도높이를 구현하기 위하여 일정한 조도높이의 콘크리트 블록을 사용하여 포설하였으며, 유속 측정을 위하여 속도가 25 Hz인 ADV를 사용하였다. Bursting 현상의 주기를 결정하기 위하여 uw 사분면 기법과 VITA 기법을 적용하였다.

먼저, uw 사분면 기법과 VITA 기법에서 매개변수에 대한 민감도를 분석하였다. uw 사분면 기법에서 임계값 H 가 증가할수록 산정된 bursting 현상의 주기는 급격하게 증가하였다. VITA 기법의 경우에도 평균시간이 증가함에 따라 검출된 bursting 현상의 수는 선형적으로 증가하다가, $\tau_+ = 1500$ 이후에서는 거의 일정한 것을 확인하였다. 또한 임계값 k 가 0.5-1.5 사이에서 변화할 때, 검출되는 bursting 현상의 수가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

다음으로, uw 사분면 기법과 VITA 기법에 의해 bursting 현상의 주기를 산정하였다. uw 사분면 기법의 경우, Nezu와 Nakagawa (1993)가 제시한 $H = 2.1$ 과 1.1 을 각각 분출현상과 쓸기현상에서 사용하였다. 또한 VITA 기법의 경우에는 $\tau_+ = 1250$ 와 $k = 1$ 을 사용하였다 (Nino, 1995). 각각의 방법에 의해 산정된 분출현상과 쓸기현상의 주기가 전반적으로 비슷한 것으로 나타났으며, Nezu와 Nakagawa (1993)에 의해 제시된 주기의 범위 안에 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 실험에 사용된 ADV의 속도는 25Hz로서 기존에 제시한 평균시간 간격으로 측정할 수 없었으므로 보다 빠른 속도의 유속 측정장치를 이용하여 결정된 평균시간을 확인하여야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육부의 2001년도 "두뇌한국 21 사업"의 지원에 의해 수행되었음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 최성욱, 박문형 (2001). "균일한 조도높이의 하상 위를 흐르는 개수로 흐름의 고유구조." 大韓土木學會 論文集, 대한토목학회, 게재예정.
- 최성욱, 임동균 (2001). "균일한 조도높이의 콘크리트 블록이 포설된 개수로 흐름에서의 난류측정." 大韓土木學會論文集, 대한토목학회, 21 (1-B), 11-21.
- Blackwelder, R.F. and Kaplan, R.E. (1976) "On the wall structure of the turbulent boundary layer." *Journal of Fluid Mechanics*, 76, 89-103.
- Bogard, D.G. and Tiederman, W.G. (1986). "Bursting detection with single-point velocity measurements." *Journal of Fluid Mechanics*, 162, 389-413.

Johansson, A.V. and Alfredsson, P.H. (1982). "On the structure of turbulent channel flow." *Journal of Fluid Mechanics*, 122, 295-314.

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*, 50, 133-160.

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*, 60, 481-511.

Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, A.A. Balkema, Brookfield, VT.

Nino, Y. (1995). *Particle Motion in the Near Bed Region of a Turbulent Open Channel Flow : Implication for Bedload Transport by Saltation and Sediment Entrainment into Suspension*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Wallace, J.M., Brodkey, R.S., and Eckelmann, H. (1977). "Pattern-recognized structures in bounded turbulent shear flows." *Journal of Fluid Mechanics*, 83, 673-693.

표 1. 실험조건

q (m ² /sec)	U_m (m/sec)	h (m)	u_* (m/sec)	Re	Fr	k_{s+}
0.05	0.365	0.137	0.03	39,000	0.32	270

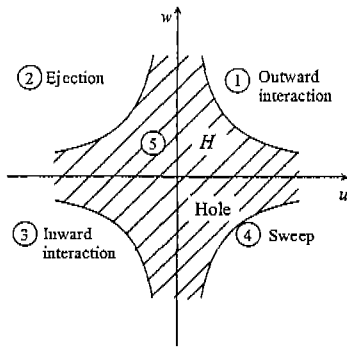


그림 1. Bursting 현상의 분류

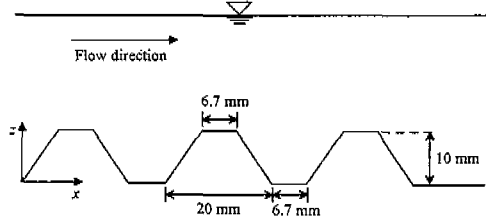
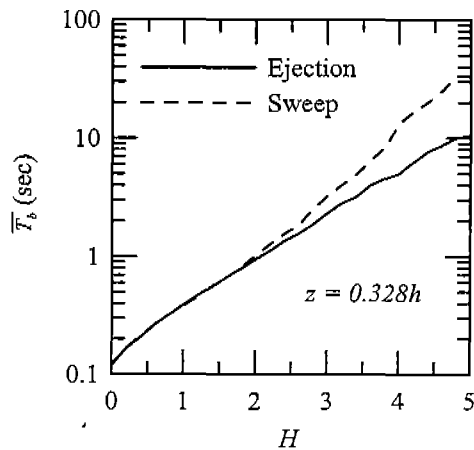
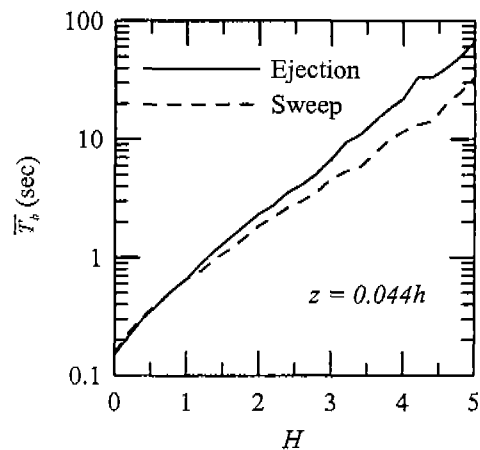


그림 2. 개수로에 포설된 블록의 개략도



(a) 조도높이 위



(b) 조도높이 아래

그림 3. H의 변화에 따른 분출현상 및 쓸기현상의 주기 (uw 사분면 기법)

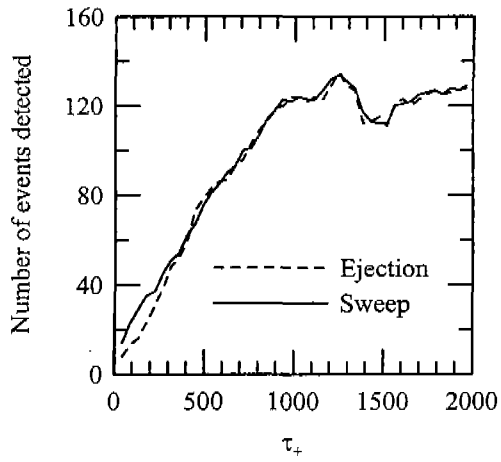


그림 4. τ_+ 의 변화에 따른 bursting 현상의 검출 수 ($z = 0.116h$)

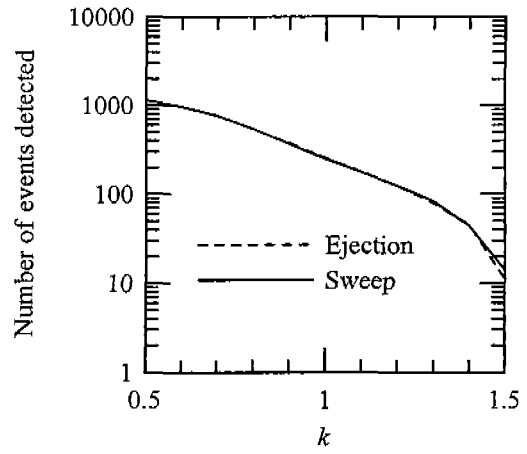
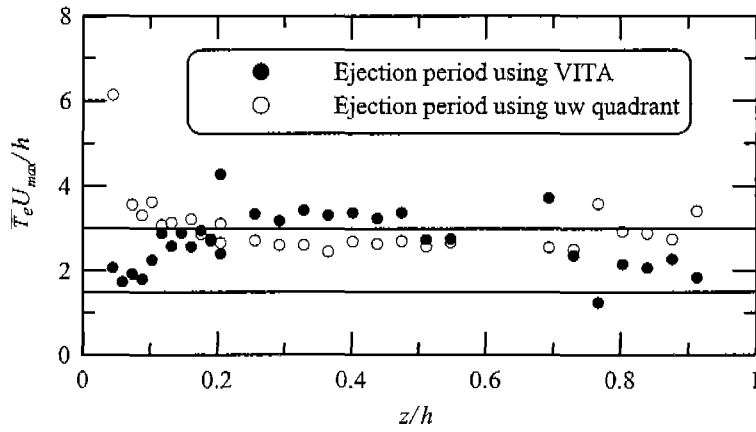
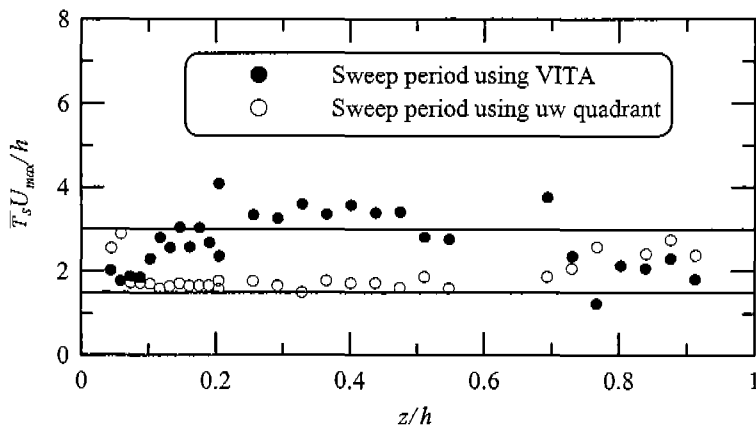


그림 5. k 의 변화에 따른 bursting 현상의 검출 수 ($z = 0.116h$)



(a) 분출현상의 주기



(b) 쓸기현상의 주기

그림 6. bursting 현상의 주기