

레이저 도플러 유속계를 이용한 거친하상 개수로 흐름의 난류측정

Turbulence Measurement of Open-Channel Flows over Rough Bed using Laser Doppler Anemometer

최성욱¹⁾, ○양원준²⁾

Choi, Sung-Uk · Yang, Wonjun

요 지

본 논문에서는 수리실험을 통해 개수로의 바닥 조건에 따른 평균흐름 및 난류구조, 그리고 고유구조의 특성을 연구하였다. 레이저 도플러 유속계를 이용하여 2차원 순간속도를 측정하였다. 측정된 평균유속, 레이놀즈응력, 난류강도, 와점성계수, 혼합 길이 등의 난류량을 기준에 제시된 경험식과 비교하였으며, 기존 연구 결과와 유사함을 확인하였다. 사분면 기법을 이용하여 개수로 흐름의 고유구조를 살펴본 결과, 분출 및 쓸기 현상의 발생 확률이 다른 상호작용에 비해 지배적임을 확인하였다. 고속 푸리에 변환을 통한 스펙트럼 분석을 통하여 에너지 폭포 현상 및 난류渦의 미시 및 거시 특성크기를 파악하였다.

핵심용어: 레이저 도플러 유속계, 난류구조, 고유구조, 스펙트럼 분석

1. 서론

일반적으로 유체의 흐름은 레이놀즈 수에 따라 층류와 난류 두 가지 상태로 구분할 수 있다. 자연 상태의 하천 흐름은 대부분 난류이며, 이와 같은 난류는 유체 흐름 내부의 운동량, 질량, 그리고 열의 이동에 매우 큰 영향을 미치고, 경계층에서의 전단흐름 특성을 결정짓는다. 따라서 난류 구조와 이에 따른 수송과정을 파악하는 것은 유체역학 및 수리학에서 매우 중요한 과제이다.

이와 같은 난류에 대한 일반적인 접근 방법은 계측 장비를 이용하여 실험 수로나 실제 하천의 흐름장을 측정하는 것과 난류에 관한 지배방정식 (Navier-Stokes equations)을 직접 또는 근사적으로 해석하는 것으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 연세대학교 수공학 연구실에서 보유하고 있는 레이저 도플러 유속계(LDA: Laser Doppler Anemometer)에 의한 유속 측정 결과를 살펴보고자 한다. 레이저 도플러 유속계의 측정 속도는 최대 180 MHz이며, 측정부피는 약 0.00015 cm^3 , 300 mW의 아르곤-이온 레이저로 구성되어 있으며, 이를 이용하여 매끈한 하상과 거친 하상 개수로의 2 차원 유속을 각각 측정하였다. 개수로 흐름의 평균유속, 레이놀즈응력, 난류강도, 와점성, 혼합거리, 그리고 난류에너지 스펙트럼 등을 살펴보고, 측정된 시계열 자료를 이용하여 고유구조를 확인하였다.

2. 레이저 도플러 유속계

그림 1에 도시된 LDA는 자유수면이나 바닥 근처 혹은 복잡한 구조물 표면에서의 정확한 유속을 측정하기 위해 개발된 장비이다. 레이저 발생장치를 통한 레이저 光은 유수와 함께 흐르고 있는 미세 입자에 산란 및 반사되며, 산란 및 반사된 레이저 光은 주파수 변화 (Doppler shift)를 일으키게 된다. 이와 같은 주파수 변화량을 광전자 증배관 (photomultiplier)를 이용하여 측정한다. LDA는 강한 직진성과 단일 파장의 레이저 光을 이

1) 부교수, 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 (e-mail: schoi@yonsei.ac.kr)

2) 박사과정, 연세대학교 대학원 토목공학과 (e-mail: pulip@yonsei.ac.kr)

용하기 때문에 측정된 주파수의 변화량은 입자의 속도에 비례하며, 이를 이용하여 유체의 속도를 측정할 수 있다. LDA는 흐름 외부에서 레이저를 투사하여 유속을 측정하기 때문에 기기에 의한 흐름의 교란이 없으며 측정 부피가 매우 작기 때문에 구조물 혹은 바닥에 근접한 부분에서의 유속을 측정할 수 있다. 또한 측정 속도 (sampling rate)가 매우 빠르기 때문에 미소 스케일 (minor scale)에서의 난류 유동을 측정할 수 있는 장점이 있으며, 측정된 유속값의 검정을 필요로 하지 않는다. 그러나 빛을 이용하기 때문에 흐름 내부에 공기방울과 같이 크기가 큰이물질이 존재할 경우 레이저 조사의 방해로 인하여 유속의 측정이 불가능하고, 주변 환경에 많은 영향을 받으며, 경계면 포착 불가와 같은 단점이 있다 (Nezu와 Nakagawa, 1993).

3. 실험조건

연세대학교 수공학연구실에서 자체적으로 제작한 개수로 실험 장치를 이용하여 실내 수리실험을 수행하였다. 실험 장치의 제원은 폭 0.2 m, 높이 0.3 m, 그리고 길이 2.6 m로 그림 2와 같다. 매끈한 하상은 페인트로 마감된 바닥에 #2,000의 고운 사포로 마무리 하여 구현하였으며, 중앙입경이 420 μ m인 #40 사포를 바닥에 부착하여 거친 하상을 구현하였다. 정상류 상태를 유지한 상태에서 (표 1), 상류단의 정류장치로부터 2.2 m 떨어진 지점에서 유속측정을 수행하였다. 각 지점 당 LDA를 이용하여 초당 100 ~ 150 개 씩, 평균흐름 및 난류량들이 일정한 값으로 수렴되는 100 초 동안 순간속도를 측정하였다. 매끈한 하상을 갖는 경우와 거친 하상을 갖는 경우에 대해 각 5 회씩 실험을 수행하여, 앙상블 평균 (ensemble average)을 취함으로써 전 단면에 대해 균일한 난류량을 획득할 수 있도록 하였다.

4. 측정결과

그림 3은 최대유속으로 무차원화 된 평균유속분포이다. 수면 근처 ($z > 0.6h$)에서는 실험결과가 바닥 조건에 관계없이 유사하지만, 바닥에 가까워질수록 큰 차이를 보이고 있다. 매끈한 하상의 경우 바닥근처 좁은 구역에서 평균유속의 변화가 급격하게 발생하고 있으며, 거친 하상의 경우 바닥 조도 요소에 영향을 받기 때문에 비교적 완만하게 평균유속이 변화하고 있다.

그림 4는 수심에 따른 레이놀즈응력의 변화를 보여준다. 그림에서 레이놀즈응력은 전단속도, 바닥으로부터의 거리는 전체 수심을 이용하여 무차원화 시켰다. 기호는 LDA로 측정한 레이놀즈응력을 나타내며, 직선은 레이놀즈응력의 이론식이다. 두 경우 모두 레이놀즈응력은 바닥에서부터 증가하기 시작하여 약 $z = 0.1h$ 인 지점에서 최대값을 보이며, 수면에 가까워질수록 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 레이놀즈응력은 그림에서 볼 수 있듯이 바닥 근처를 제외하고는 이론식과 유사한 양상을 나타내고 있다.

그림 5는 바닥으로부터의 거리에 따른 난류강도의 변화를 도시한 것이다. 난류강도는 전단속도, 바닥으로부터의 거리는 수심을 이용하여 무차원화 하였다. 그림에서 기호는 측정결과 (각각 흐름방향, 수직방향 난류강도), 실선은 Nezu와 Nakagawa (1993)의 실험식을 도시한 것이다. 매끈한 하상의 경우 바닥 경계 부근인 $z < 0.07h$ 구간과 수면 근처인 $z > 0.9h$ 인 구간을 제외하고는 대체적으로 측정값과 경험식이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 바닥 및 수면 근처에서 발생하는 경험식과의 불일치는 난류량의 감쇄 (damping)에 의한 것으로서, 바닥 및 수면 경계에 막혀 감소하는 수직방향 난류량이 흐름방향 난류량에 더해져 경계면 근처에서 흐름방향 난류강도가 증가하는 난류량의 재분배 (redistribution) 현상이 발생한다 (Nezu와 Nakagawa, 1993). 거친 하상에서의 경우 앞에서 언급한 경험식과 비교적 잘 일치하고 있으며, 앞에서 언급한 난류량의 감쇄 현상은 잘 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이는 바닥의 조도요소에 의한 난류량의 증가 및 매끈한 하상인 경우와 달리 점성저층이 존재하지 않기 때문에, 앞에서 언급한 바와 같은 난류강도의 재분배 현상이 잘 나타나지 않게 된 것으로 보이며, Nezu와 Nakagawa (1993)에서도 동일한 결과를 볼 수 있다.

Raupach와Thom (1981)은 이와 같이 조도요소가 중요한 역할을 하는 바닥 경계층 부근을 조도층 (roughness layer)이라 하였다.

그림 6은 수심에 따른 와점성계수의 분포를 도시한 것이다. 그림에서 기호는 LDA에 의한 측정값, 실선은 포물선 분포 (매끈한 하상), 그리고 점선은 수정된 포물선 분포 (거친 하상)이다. 그림에서 매끈한 하상에서의 측정결과는 식에 의한 포물선 분포와 잘 일치하고 있으며, 최대값 발생지점이 약 $z=0.5h$ 인 것으로 나타났다. 거친 하상의 경우 바닥의 조도를 고려할 수 있도록 Lyn (1993)이 제시한 수정된 포물선 분포가 기존의 포물선 분포에 비해 와점성계수를 정확하게 예측하는 것으로 판단할 수 있다

본 연구에서는 LDA를 통하여 측정된 평균유속과 레이놀즈응력을 이용하여 다음 그림 7에 도시된 바와 같이 혼합길이를 계산하였다. 바닥조건에 관계없이 약 $z<0.3h$ 인 지점까지는 혼합길이가 선형적으로 증가하며, $0.3h<z<h$ 인 구간에서는 비교적 일정한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 Kironoto와 Graf (1994)의 실험과도 일치하는 결과이다. Huffman과 Bradshaw (1972), Reynolds (1974) 등에 의하면 벽 근처 영역 ($z<0.4h$)에서의 혼합거리의 바닥으로부터의 거리에 비례 ($l = kz$)하는 것으로 알려져 있다. 또한, 그 이외의 구간에 대해 Nezu와 Nakagawa (1993)는 혼합거리를 $l = \beta h$ 로 표현 (β 는 레이놀즈 수의 함수)하였으며, 레이놀즈 수가 큰 흐름에서 $\beta = 0.12$ 의 값을 제시하였다. 본 실험에서 산정된 β 값은 매끈한 하상에서는 약 0.14, 거친 하상인 경우에는 약 0.13으로 Nezu와 Nakagawa가 제시한 값과 유사한 것으로 나타났다.

그림 8은 자기상관계수를 이용하여 얻은 난류渦의 거시특성크기 (macroscale of eddy)를 수심에 따라 도시한 것이다. 그림을 살펴보면 하상의 거칠기에 상관없이 바닥 근처에서 거시특성크기가 최소값을 가지며, 수면에 가까워질수록 거시특성크기가 1:2의 기울기로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Nezu (1977)의 열선유속계에 의한 실험 결과도 거시특성크기가 1:2의 기울기를 가지는 것을 보이고 있으며, 이는 개수로의 바닥 부근에서 작고 빠른渦, 수면 근처에서는 크기가 크고 속도가 느린渦가 지배적으로 발생함을 보여준다.

측정된 순간유속자료에서 고주파 잡음과 누설오차를 제거한 후, 고속 푸리에 변환 (FFT: Fast Fourier Transform)을 이용하여 구한 난류 스펙트럼은 그림 9, 10과 같다. 그림에서 일차원 에너지 밀도함수 E_{11} 이 $k^{-5/3}$ 에 비례하는 구간을 관성아 영역 (inertial subrange)라고 하며, 이 영역에서는 난류가 국부적으로 등방성을 가진다. 지수의 $-5/3$ 법칙을 만족하는 구간인 관성아 영역에서, 지수의 $-5/3$ 법칙을 만족하는 가장 작은 파수는 약 180 m^{-1} , 90 m^{-1} 이고 L_x 는 0.0056 m, 0.011 m로 산정된다.

그림 11과 12는 순간유속의 변동성분에 사분면 기법을 적용한 결과이다. 전 수심에 걸쳐 2와 4 사분면에 해당하는 분출과 쓸기 현상이 지배적으로 나타나고 있으며, 바닥에 근접한 지점인 경우에는 변동속도의 분포가 다른 지점에 비해 분출과 쓸기 현상에 집중되어 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 바닥조건에 따른 개수로 흐름의 난류측정에 관한 실험연구이다. 개수로에 매끈한 하상을 구현하기 위해 유성 페인트로 마무리하였으며, 거친 하상을 구현하기 위해 #40 사포를 이용하였다. 유입부의 영향이 없고, 흐름이 잘 발달된 지점에서 유속 측정을 실시하였다. 순간속도를 측정하기 위해 LDA를 이용하였으며, 각 지점에서의 측정속도는 100 ~ 150 Hz를 유지하였다. 바닥으로부터의 거리에 따른 평균유속과 레이놀즈응력, 난류강도, 와점성계수, 혼합길이, 그리고 적분특성시간 등의 난류량을 기준에 제시된 모형과 비교하였다. 또한 측정된 시계열 자료를 이용하여 일반 개수로 흐름의 고유구조와 난류 스펙트럼을 살펴보았다.

측정된 평균흐름 및 난류구조는 기존 연구결과와 유사하였으며, 현재 사용되고 있는 여러 공식들이 평균흐름 및 난류량을 정확하게 예측하고 있음을 확인하였다. 유속 측정 자료에 사분면 기법을 적용하여 개수로 흐름의 고유구조를 살펴본 결과, 기존의 연구결과와

동일하게 분출 및 쓸기 현상이 전 수심에 걸쳐 지배적으로 발생하고 있음을 확인하였다. 시계열 자료를 이용하여 개수로 흐름의 자기상관계수와 난류 스펙트럼을 살펴본 결과 본 연구에서 사용한 LDA는 ADV의 측정속도로는 감지할 수 없는 고주파 영역을 측정하여, 에너지 폭포현상을 매우 정확하게 예측할 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구(보고서)는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업 (03산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참고문헌

Huffman, A.J. and Bradshaw, P. (1972). "A note on von Karman's constant in low Reynolds number turbulent flows." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 53, pp. 45-60.

Kironoto, B.A. and Graf, W.H. (1994). "Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, maritime and energy*, Vol. 106, pp. 333-344.

Lyn, D.A. (1993). "Turbulence measurements in open channel flows over artificial bed forms." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 3, pp. 306-326.

Nezu, I. (1977). *Turbulent structure in open channel flows*, Ph. D. dissertation, Kyoto University, Kyoto, Japan.

Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, A.A. Balkema, Brookfield, VT.

Raupach, M.R. and Thom, A.S. (1981). "Turbulence in and above plant canopies." *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 97-129.

Reynolds, A.J. (1974). *Turbulent flows in engineering*, Wiley & Sons.

표 1. 실험조건

Bed Condition	q (m ² /sec)	U_m (m/s)	h (m)	Re (-)	Fr (-)	S (-)
Smooth	0.0007	0.21	0.030	54,000	0.387	0.0004
Rough	0.0010	0.29	0.030	75,000	0.535	0.0020

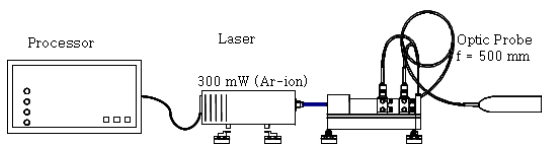


그림 1. LDA 모식도

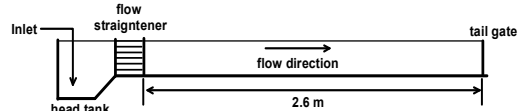


그림 2. 개수로 실험장치

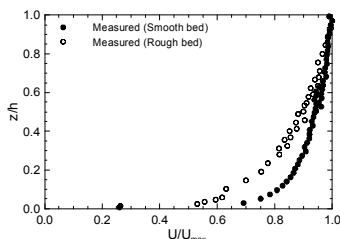


그림 3. 평균유속

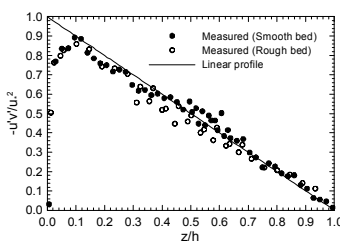


그림 4. 레이놀즈응력

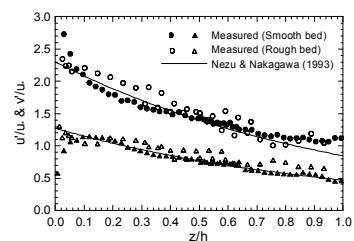


그림 5. 난류강도

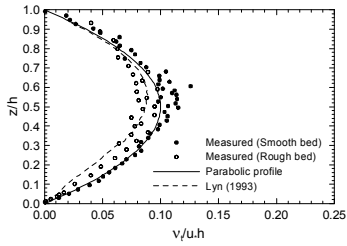


그림 6. 와점성계수

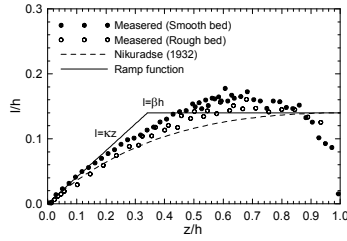


그림 7. 혼합거리

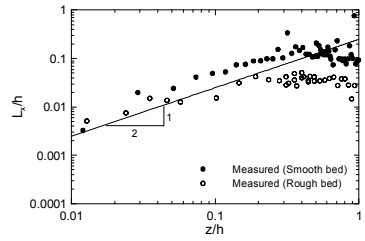
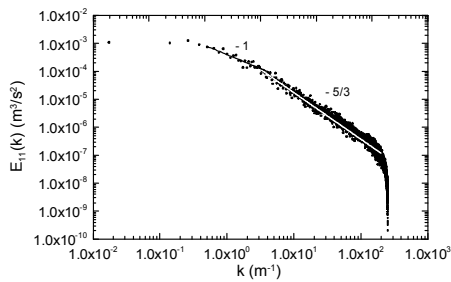
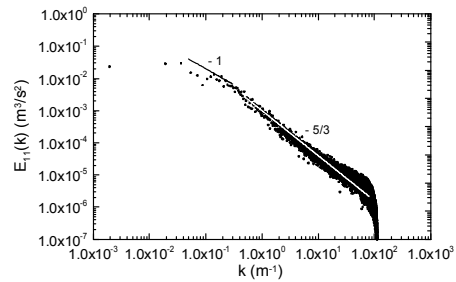


그림 8. 적분 특성크기

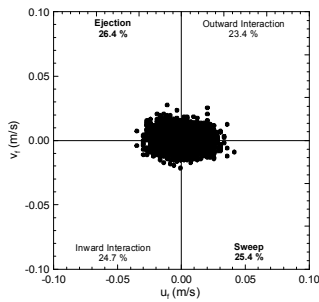


(a) 매끈한 하상

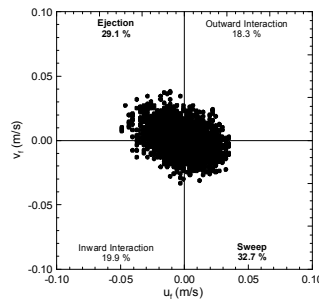


(b) 거친 하상

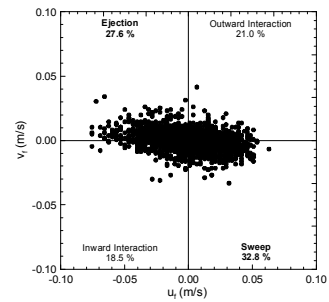
그림 9. 난류에너지 스펙트럼 ($z=0.25h$)



(a) at $z=0.97h$

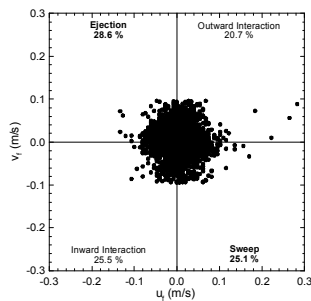


(b) at $z=0.49h$

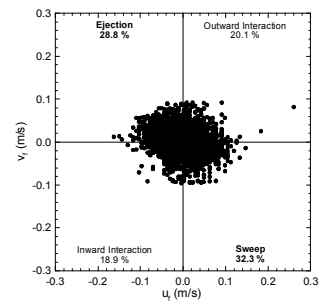


(c) at $z=0.05h$

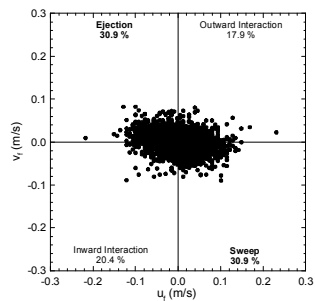
그림 10. 매끈한 하상 개수로 흐름의 bursting 현상



(a) at $z=0.97h$



(b) at $z=0.49h$



(c) at $z=0.05h$

그림 11. 거친 하상 개수로 흐름의 bursting 현상