

유사량이 난류의 흐름특성에 미치는 영향

노영신¹⁾, 김인수²⁾, 윤병만³⁾

1. 서론

난류의 구조와 특성은 유체역학과 수리학분야에서 매우 중요한 부분을 차지하여 이에 대한 많은 연구가 시도되어 왔다. 그러나, 기존 난류해석에 이용된 실험장비들은 흐름을 교란시키거나 한 점에서 밖에 흐름장을 측정할 수 없는 등의 단점을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 최근 난류 측정의 획기적인 방법으로 인식되는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)를 이용하여 난류의 흐름특성을 측정하였다. PTV는 흐름 중에 투입된 입자에 레이저를 투여하여 반사된 빛을 비디오 카메라로 촬영함으로써 입자의 이동전과 이동후의 이동변위를 통해 영상해석기법을 이용하여 유속을 계산하는 방법이다. 따라서, PTV는 기존의 방법과는 달리 흐름을 교란시키지 않고 전체 유속장을 동시에 측정할 수 있다는 장점을 가진다.

본 연구에서는 또한 이러한 PTV를 이용하여 유사의 유무에 따른 난류의 흐름특성을 파악하기 위해 유사량을 달리하며 각각의 유사량에 대한 유속분포, 마찰속도, 난류강도, Reynolds응력 등을 측정하여 이를 비교·분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치

PTV를 이용한 난류의 흐름특성 측정을 위한 실험에서는 IIHR(Iowa Institute of Hydraulic Research)의 길이 27m, 폭 0.9144m, 최대 수심 0.6m 정도의 대형 수로를 사용하였다. 수로 유입부와 유출부의 영향을 배제하기 위하여 실제 측정은 하류쪽 1/3 길이 정도인 단면에서 실시하였으며 실험조건은 유량 $Q = 0.042\text{m}^3/\text{sec}$, 수심 $d = 0.094\text{m}$, 평균유속 $u = 0.495\text{m/s}$, 수로경사 $S_0 = 0.000675$ 이다.

본 연구에 사용된 PTV 장치의 구성은 그림1에서 보는 바와 같이, 최대 강도 2W의 레이저 발사장치, 레이저 노출시간을 동조시키기 위한 동조장치 AOM(Acoustic Optical Modulator), 반사된

1) 명지대학교 토목공학과 박사과정 · (E-mail : rohys@mju.ac.kr)

2) 명지대학교 토목공학과 석사과정 · 031-336-4971(E-mail : imichael@netsgo.com)

3) 명지대학교 SOC공학부 부교수 · 공학박사 · 031-330-6414(E-mail : bmyoon@mju.ac.kr)

레이저 촬영을 위한 CCD카메라, 레이저에 의해 반사된 빛을 촬영하기 위한 녹화기로 구성되었다. 흐름중에 투입되는추적입자는 비중이 약 1인 직경 $30\mu\text{m}$ 의 glass beads를 사용하였다.

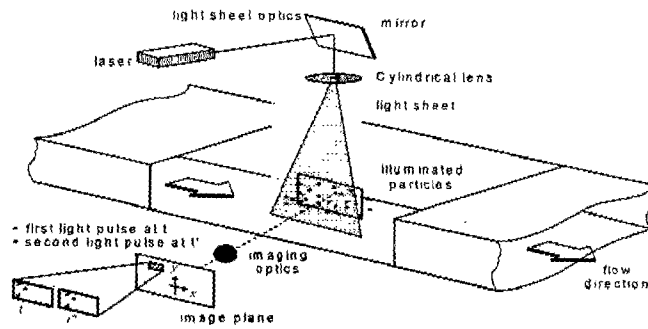


그림1. 실험장치 구성도

2.2 실험의 개요

본 연구에서는 Muste 등(1988)이 제안한 방법에 따라 PTV의 개념과 기술적인 측정 방법을 이용하였다. PTV측정 방법은 노출과 frame의 수에 따라 여러 가지로 구분할 수 있으나 본 실험에서는 단일 노출 다중 영상법(single exposed multiple image)을 이용하였다. 따라서 두 개의 영상으로부터 하나의 유속장을 구할 수 있게 된다(Raffel, 1998).

동조장치 AOM(Acoustic Optical Modulator)를 이용하여 카메라와 레이저의 노출시간을 동조시켰으며 영상의 각 frame의 구성과 이에 대한 동조 방법의 개요는 그림2와 같다.

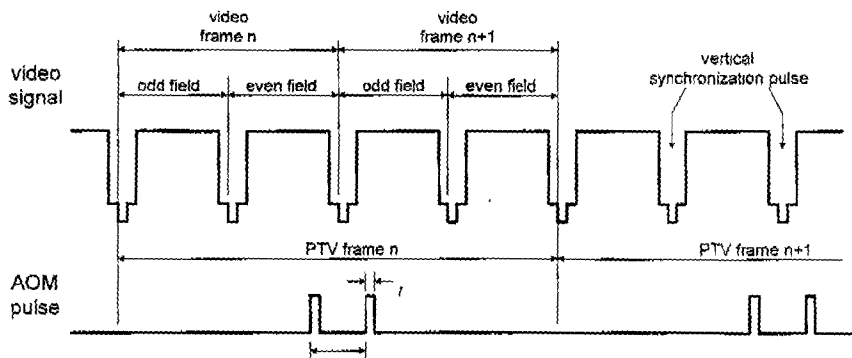


그림2. PTV의 동조 기법(Muste 등, 1998)

2.3 영상처리 과정

촬영된 영상의 분석을 위해 약 3분간 촬영된 영상에서 2분 가량을 추출하여 분석하였으며 촬영된 영상은 image 처리를 위해 PC를 이용하여 디지털화하였다. 그림2에서 보는 바와 같이 영상은 각각 홀수(odd) 필드와 짝수(even) 필드 자료만을 지니게 된다. 촬영된 영상은 frame-grab를 통해 640×480 pixel 또는 512×512 pixel의 크기로 digitize되며, frame-grab 작업은 일반적인 image software와 PC에서 이루어진다. digitize된 image는 영상의 질을 개선하거나 영상을 특정한 목적에 알맞도록 변환시키는 등의 영상처리 과정을 거쳐야 한다. image의 화질을 개선하기 위해서, 조명에 의해 추적입자가 존재하는 픽셀의 밝기 정보를 조절함으로써 밝은 부분은 더욱 밝게, 어두운 부분은 더욱 어둡게 하여 화질을 선명하게 처리할 수 있다. 또한 입자의 경계부분을 명확하게 하기 위해 edge처리를 수행하였다. 이러한 방식으로 영상처리된 image에서 입자의 위치를 찾아 입자의 이동거리를 이동시간으로 나누어 순간유속벡터를 구하게 된다. 계산된 순간유속은 이미지상의 noise 또는 분석시의 오차 등으로 물리적 의미가 약한 값들을 포함하게 되어 결과분석에 장애를 주기 때문에 적절한 필터링을 통해 제거하였다.

3. 측정 결과의 분석

본 실험에서는 유사량이 난류특성에 미치는 영향을 살펴 보기 위해 유사량을 변화시켜 6개의 실험case로 구분하여 분석하였고 난류특성을 비교하기 위해 유속분포, 마찰속도, 난류강도, Reynolds응력을 비교·검토하였다.

유사량에 따른 유속분포의 실험결과는 그림3 같다. 그림3에서 보는 바와 같이 유사량이 없을 때 보다 유사량이 있을 때의 유속이 작은 것을 알 수 있다. 그러나, 소량의 유사량이 있을 경우는 유사량이 없을 때보다 유속이 빠른 양상을 보였다.

마찰속도는 수로전체의 경사에 대해 적용하는 slope method와 하상 근처영역에서 적용할 수 있는 log law, 그 외의 영역에 적용되는 velocity defect law을 이용하여 계산한다. 본 실험에서는 입자의 대부분이 하상 이외의 영역에 분포하기 때문에 slope method(식3.1)와 velocity defect law(식3.2) 두 가지 방법으로 마찰속도를 계산하였다.

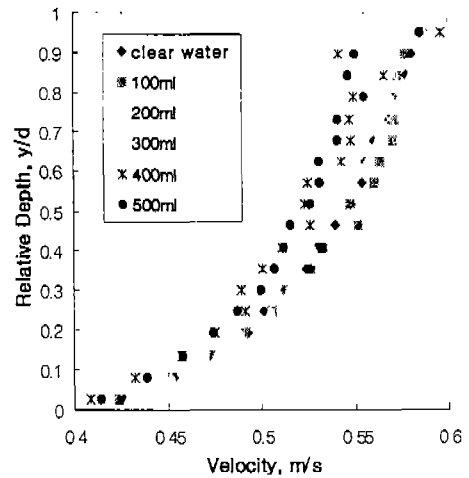


그림3. 유속분포도

$$u_z = \sqrt{gRS_0} \quad (3.1)$$

$$(u - u_{\max})/u_* = 1/x \cdot \ln(y/h) \quad (3.2)$$

여기서 R 은 경심, S_0 는 수로경사를 나타낸다. 식 (3.2)에서 $(U_{\max} - u)$ 와 $1/x \cdot \ln(y/d)$ 에 대한 회귀분석($y = ax + b$ 형태)을 통해 상수 a 를 구할 수 있으며, a 값은 u_* 를 나타낸다(x 는 von Karman 상수(=0.41)). 그림4는 velocity defect law를 이용한 마찰속도를 계산한 그래프이다.

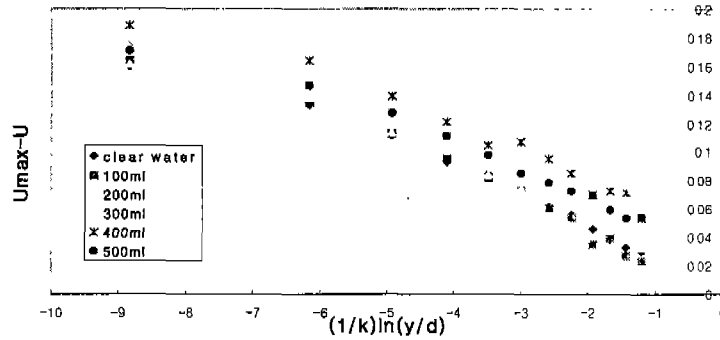


그림4. velocity defect law에 의한 마찰속도 계산

표1. 유사량에 따른 유속특성

sand	Avg. Vel. (m/s)	Max. Vel. (m/s)	shear Vel. (m/s)
clear water	0.507	0.561	0.0179
100ml	0.540	0.603	0.0204
200ml	0.529	0.583	0.0199
300ml	0.523	0.581	0.0190
400ml	0.517	0.580	0.0173
500ml	0.515	0.573	0.0160

본 실험에서 slope method에 의해 계산된 마찰속도 u_* 는 0.023이고, velocity defect law에 의해 구한 마찰속도는 표1에 정리하였다. 표1은 본 실험의 유속 특성값을 나타낸다. 표에서 보듯이 유속이 증가할수록 마찰속도가 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 두 방법간의 마찰속도 값의 차이는, slope method에 의해 구한 값은 수로 전체에 대한 평균적인 의미를 나타내는 반면, velocity defect law에 의해 구한 값은 국부적인 값을 나타내고 있기 때문이다. 본 실험결과에 의한 마찰 속도는 평균유속이 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

Nezu와 Nakagawa(1993)는 실험을 통하여 개수로에서의 일반적인 난류강도의 관계식을 식(3.3), (3.4)과 같은 지수함수의 형태로써 제시하였다. 여기서 u' 와 v' 는 각각 x 와 z 방향의 난류강도를 나타낸다(본 실험에서는 z 방향유속이 v). 그림5는 상대수심에 대한 난류강도를 도시한 것이다. 그림에서의 가로축의 측정수심과 세로축의 난류강도는 각각 전체수심과 마찰속도로 무차원화하였다. 그림5에서 보는 바와 같이

유사량에 따른 난류강도의 분포는, 유사량에 따른 유속의 감소로 인해 난류강도가 감소하는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u_*} = 2.30 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \quad (3.3)$$

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{u_*} = 1.27 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \quad (3.4)$$

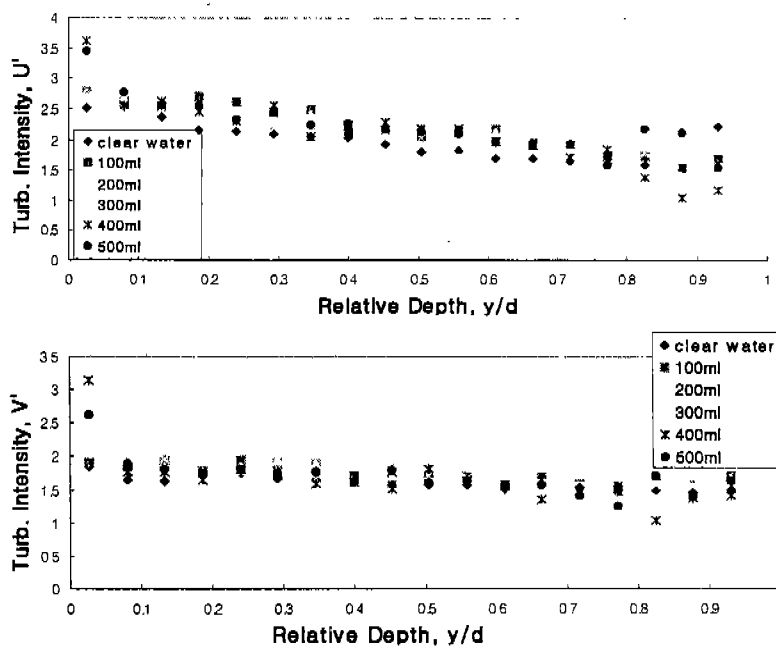


그림5. 난류강도

난류에 의한 Reynolds 응력은 식3.5와 같다(Nezu와 Nakagawa(1993)). 그림6은 상대수심에 대한 Reynolds응력의 관계를 도시한 것이다. 그림6에서의 세로축은 Reynolds응력을 마찰속도로 나누어 무차원화하였으며, 따라서 단위 밀도당 전단응력을 나타낸다. 그림6에서 보는 바와 같이 유사량에 따른 Reynolds 응력의 분포는, 유사량이 증가함에 따라 Reynolds응력이 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 유사량의 증가에 따른 유속의 감소에 의한 것임을 알 수 있다.

$$\frac{\overline{u'v'}}{u_*^2} = 1 - \frac{y}{h} \quad (3.5)$$

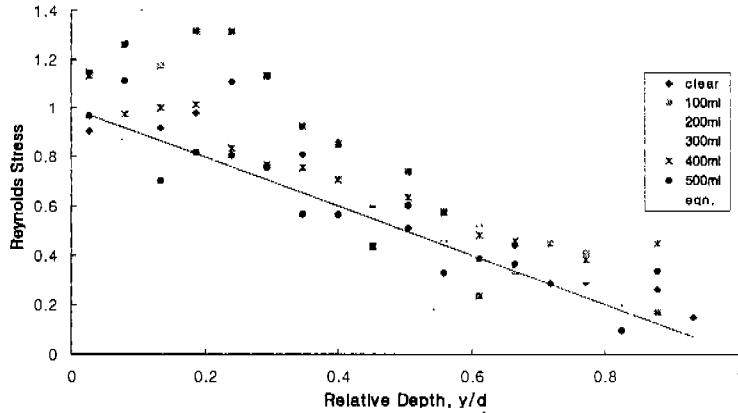


그림6. Reynolds 응력 분포

4. 결론

본 연구는 유사가 난류특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구이다. 유사량을 달리하여 각각의 유사량에서의 난류특성을 PTV를 이용하여 측정하였다. 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) PTV를 이용하여 Reynolds응력 등의 난류특성을 분석할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 유속분포는 유사가 없는 흐름에 비해 감소하는 것을 알 수 있으며, 유사량이 증가할수록 유속이 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 유사량 증가에 따른 유속의 감소로 인해 난류강도와 Reynolds 응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

1. Muste, M., Fujita, I. and Kruger, A. (1998). "Experimental comparison of two laser-based velocimeters for flows with alluvial sand," *Experiments in Fluids*, Vol. 24, pp. 273-284.
2. Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, Int. Ass. Hydraul. Res. Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam, 281 pp.
3. Raffel, M, Willert, C., and Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer-Verlag.