

# 개수로 흐름의 유속분포에 관한 연구

## A Study on the Velocity Profile in the Open-Channel Flow

이진수\*, 윤병만\*\*, 류권규\*\*\*, 노영신\*\*\*\*

Jinsu Lee, Byungman Yoon, Kwonkyu Ryu, Youngsin Roh

---

### Abstract

The present study aims to illuminate the vertical velocity profile of outer region of open-channel flow. Two sets of experiments were performed with PIV and propeller velocimeter. The first set was conducted to investigate the effect of bed roughness on the velocity distribution. The second set of experiments was carried out to find the effect of the Froude number on the velocity profile under the same bed roughness.

The results reveal that the wake-law fits well with the experimental data from the bottom to the depth of maximum velocity, but it deviates from the experimental data above the maximum velocity point due to velocity-dip phenomenon, and that the velocity profile of the outer region is more influenced by the Froude number than the roughness. It is also shown that both the velocity difference between maximum velocity and surface velocity and the ratio of the average velocity to surface velocity become larger as the Froude number increases.

**Key words** : PIV, velocity-dip phenomenon, outer region, velocity profile

---

### 요 지

본 연구는 입자영상유속계(PIV)와 일차원 프로펠러 유속계를 이용하여 개수로 흐름 외부영역의 연직 유속분포를 측정하고 분석하였다. 수리실험은 크게 두 가지 조건에 대해 수행하였다. 첫 번째는 하상조건에 따른 유속분포의 변화를 파악하였고 두 번째는 흐름특성, 특히 Froude 수의 변화에 따른 유속분포를 파악하였다.

측정 결과 바닥에서부터 최대유속 발생지점까지는 후류법칙과 잘 맞는 경향을 보였으나, 최대 유속발생점으로부터 수표면까지는 유속이 감소하는 현상이 나타났다. 또한 외부영역의 유속분포는 조도보다 Froude 수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며 Froude 수가 증가함에 따라 유속감소 현상도 커지는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 최대유속과 표면유속의 차와 평균유속과 표면유속의 비가 Froude 수가 증가함에 따라 각각 증가하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : PIV, 유속감소 현상, 외부영역, 연직유속분포

---

1) 정회원·유일엔지니어링·E-mail : karma012@mju.ac.kr

\*\* 정회원·명지대학교 토목공학과 교수·E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

\*\*\* 정회원·명지대학교 토목공학과 박사후 과정·E-mail : pururumi@mju.ac.kr

\*\*\*\* 정회원·건설기술연구원·E-mail : rohys@mju.ac.kr

## 1. 서론

최근에 들어 LSIV(Large Scale Image Velocimetry)와 전자과 표면유속계 등을 이용하여 표면유속을 측정하고, 이를 통해 평균유속을 산정하려는 연구가 많이 진행 중이다. 표면유속측정 장치는 경제적이며, 단시간에 유속측정을 할 수 있으므로, 홍수와 같이 순간적으로 변하는 유속에도 적용할 수 있다. 그러나 실질적으로 필요한 유속은 하천의 표면유속이 아니라 평균유속이므로 표면유속을 사용하기 위해서는 표면유속과 평균유속의 상관관계를 밝히는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 이렇게 표면유속과 평균유속의 관계를 알기 위해 표면유속과 평균유속이 존재하는 외부영역에 대한 정확한 유속분포를 알아야 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 궁극적인 목적은 다양한 흐름 조건을 만들 수 있는 실험수로에서 PIV(Particle Image Velocimetry)와 유속계를 이용하여 개수로 흐름의 외부영역 연직 유속분포를 측정하고, 이를 분석하여 외부영역 유속 분포를 규명하고, 최대유속과 표면유속, 평균유속과 표면유속 등의 연관관계, 유속분포에 영향을 주는 특성인자와 그 영향 등을 알아내는데 있다.

## 2. 개수로 흐름의 연직유속분포 특성

수심에 따른 연직방향 흐름장의 분류는 크게 세 개의 영역으로 구분할 수 있으며,  $0.6 < y/h \leq 1.0$ 인 구간을 자유표면영역(free-surface region),  $(0.15 \sim 0.2) \leq y/h \leq 0.6$ 인 구간을 중간영역(intermediate region),  $y/h \leq (0.15 \sim 0.2)$ 인 구간을 벽면영역(wall region)으로 분류한다. 중간영역은 바닥의 특성과 자유표면의 영향이 동시에 나타나는 구간으로 자유표면영역과 함께 외부영역(outer region)이라 불리며, 벽면영역은 내부영역(inner region)이라 한다(Coles, 1956).

내부영역의 흐름 특성은 유체의 점성이 지배적이며, 마찰속도  $u_*$ 와 점성길이  $\nu/u_*$ 의 내부영역 변수(inner variables)를 통해 특성지어 진다. 내부영역은 그림 1에서 보는 바와 같이 다시 점성저층구간(viscous sublayer), 완충구간(buffer layer), 중복지역(overlap layer)의 세 개의 세부영역으로 구분할 수 있다. 중복지역의 변화는 내부영역에서 외부영역으로 점차적으로 변하기 때문에 외부영역의 일부라고도 할 수 있다(Kundu, 1990). 그림 1에서 보는바와 같이 바닥근처의 벽면영역은 경계면의 영향으로 난류는 감소하고 유체의 점성이 지배적으로 되는 층이 존재하게 되는데, 이러한 경계면에 인접한 점성이 지배적인 얇은 층을 점성저층이라고 한다. 완충구간은 점성저층 구간과 중복지역 사이의 구간으로 현재까지는 이 구간에 대해 이론적으로 적절한 분포식을 유도하지 못하고 있다(Guo, 1998; Yu, 2004).

외부영역의 경우, 특히  $0.6 < y/h < 1.0$ 의 자유수면 영역에서는 흐름방향의 최대유속( $U_{max}$ )과 수심( $h$ )과 같은 외부영역 변수(outer variables)에 특성지어 지며, 바닥에 의한 점성의 영향은 무시된다(Nezu와 Nakagawa, 1993). 외부 영역은 다시 중복지역과 후류 구간(wake layer)으로 세분할 수 있다.

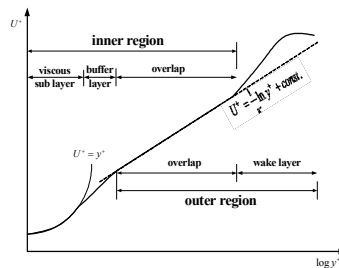


그림 1 개수로에서의 유속분포도 (Guo, 1998)

## 3. 수리실험

개수로의 유속분포를 정확하게 이론적으로 산정하는 것은 불가능할 뿐만 아니라, 유속분포에 영향을 미치는 모든 인자를 정의하기도 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 연직 유속분포에 가장 큰 영향을 미치는 인자가

Froude 수라고 판단하고 여러 가지 바닥조건으로 수리실험을 실시하여 Froude 수가 연직 유속분포에 미치는 영향을 우선 파악하고, 그 외 특성인자들에 대해서도 파악하고자 한다. 개수로의 유속분포에 대한 실험은 PIV와 LR-401V 유속계를 이용하여 측정하였다.

각 실험별 하상조건 및 수리조건은 표 1과 같다. Froude 수에 따른 수리조건의 변화는 동일한 수로경사에 대해 유량과 수심을 조절하였으며, 수심은 수로 하류부의 수문을 통해 조절하여 유속을 측정하였다.

표 1 실험조건

Condition	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	U <sub>m</sub> (m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Fr	Condition	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	U <sub>m</sub> (m/s)	Q(m <sup>3</sup> /s)	Fr			
smooth	Case1-1	0.172	0.052	0.366	0.019	0.282	13 mm	Case4-3	0.172	0.052	0.366	0.019	0.282	
	Case1-2	0.153	0.046	0.349	0.016	0.285		Case4-4	0.118	0.035	0.307	0.011	0.286	
	Case1-3	0.118	0.035	0.308	0.011	0.286		Case4-5	0.136	0.041	0.334	0.014	0.289	
	Case1-4	0.136	0.041	0.336	0.014	0.291		Case4-6	0.13	0.039	0.465	0.018	0.412	
	Case1-5	0.134	0.040	0.532	0.021	0.464		Case4-7	0.1	0.030	0.604	0.018	0.610	
	Case1-6	0.13	0.039	0.579	0.023	0.512		18 mm	Case5-1	0.225	0.068	0.253	0.017	0.170
	Case1-7	0.116	0.035	0.652	0.023	0.611			Case5-2	0.118	0.035	0.282	0.010	0.262
	Case1-8	0.107	0.032	0.688	0.022	0.672	Case5-3		0.136	0.041	0.306	0.012	0.265	
3 mm	Case2-1	0.228	0.068	0.308	0.021	0.206	Case5-4		0.172	0.052	0.348	0.018	0.265	
	Case2-2	0.181	0.054	0.382	0.021	0.286	Case5-5		0.153	0.046	0.329	0.015	0.269	
	Case2-3	0.133	0.040	0.594	0.024	0.520	Case5-6		0.12	0.036	0.504	0.018	0.464	
	Case2-4	0.109	0.033	0.740	0.024	0.716	Case5-7		0.12	0.036	0.663	0.024	0.611	
8 mm	Case3-1	0.229	0.069	0.234	0.016	0.156	Case5-8		0.097	0.029	0.616	0.018	0.632	
	Case3-2	0.224	0.067	0.326	0.022	0.220	23 mm	Case6-1	0.213	0.064	0.276	0.018	0.191	
	Case3-3	0.172	0.052	0.289	0.015	0.222		Case6-2	0.172	0.052	0.353	0.018	0.272	
	Case3-4	0.158	0.047	0.487	0.023	0.391		Case6-3	0.118	0.035	0.304	0.011	0.283	
	Case3-5	0.121	0.036	0.492	0.018	0.452		Case6-4	0.153	0.046	0.349	0.016	0.285	
	Case3-6	0.12	0.036	0.661	0.024	0.609		Case6-5	0.136	0.041	0.332	0.014	0.287	
	Case3-7	0.097	0.029	0.635	0.018	0.651		Case6-6	0.12	0.036	0.503	0.018	0.464	
13 mm	Case4-1	0.228	0.068	0.251	0.017	0.168		Case6-7	0.124	0.037	0.57	0.021	0.517	
	Case4-2	0.153	0.046	0.344	0.016	0.281		Case6-8	0.098	0.029	0.597	0.018	0.608	

#### 4. 실험결과 및 분석

표 1에서 보는 바와 같이 매끄러운 조건과 5가지의 거친 하상 조건하에서 개수로의 연직 유속분포를 측정하였다. 측정된 결과와 개수로 분포식인 후류법칙을 비교하였고 이때 후류법칙에 사용된 계수 값은 von Karman 상수  $\kappa=0.41$ , 적분상수  $A=5.5$  이다. 후류법칙의 후류강도계수  $\Pi$ 는 흐름조건에 따라 0.1~0.2 범위의 값을 사용하였다.

Froude 수와 조도의 변화를 통해 얻은 유속분포를 이용하여 최대유속과 평균유속이 발생하는 위치를 파악하였고, 표면유속과 최대유속의 차와 평균유속과 표면유속의 비 등 외부영역의 유속분포특성을 제시하였다. 그리고 후류법칙을 이용한 유속분포와 비교한 결과 외부영역의 유속분포는 바닥에서 최대유속이 생기는 지점까지는 비교적 일치하나 그 후 수표면까지는 유속감소현상으로 인해 후류법칙을 따르지 않음을 관찰할 수 있었다.

하상조건에 따른 개수로 흐름의 유속분포 변화를 측정한 결과, 최대유속은 Froude 수에 따라 바닥에서부터 0.6~0.8h 지점에서 발생하며, 최대 유속발생지점으로부터 수표면까지 유속이 감소하는 것으로 나타났다(그림 2 및 3).

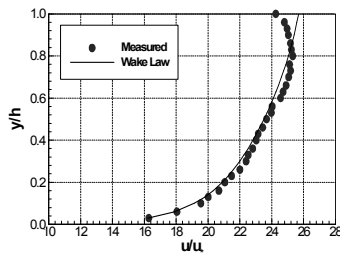


그림 2 유속분포 Case1-1  
(smooth, Fr=0.282, U<sub>m</sub> = 0.366 m/s)

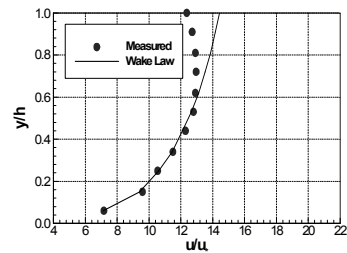


그림 3 유속분포 Case6-1  
(k<sub>s</sub>=23mm, Fr=0.191, U<sub>m</sub>=0.276 m/s)

Froude 수와 조도에 따른 유속분포의 변화를 살펴보면 내부영역에서는 조도의 영향을 많이 받고 외부영역에서는 Froude 수의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 내부영역에서는 매끄러운 바닥조건에 비해 거친 바닥 조건일 때가 유속이 감소하였고 Froude 수에 의한 영향은 적은 것으로 나타났으며, 외부영역에서는 Froude 수가 증가함에 따라 자유표면 유속감소 현상이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 평균유속의 위치는 그림 4와 5에서 보는 바와 같이 Froude수 증가와는 관계없이  $y/h \approx 0.4$  즉, 수면으로부터 깊이  $0.6h$  부근에 위치하는 것으로 나타났다.

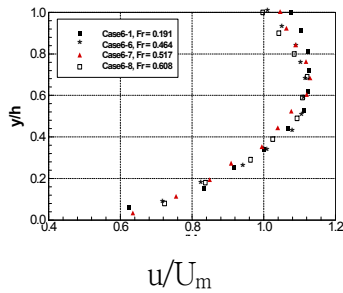


그림 4 Froude 수에 따른 유속분포 (ks=23mm)

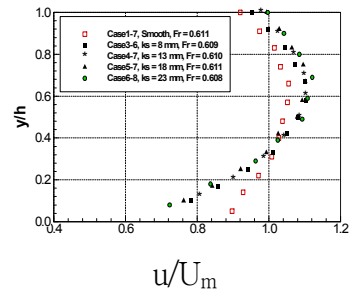


그림 5 조도에 따른 유속분포 (Fr=0.61)

수표면 영역의 유속은 Froude 수가 증가함에 따라 크게 감소하며, 이에 따라 최대유속과 표면유속의 차와 평균유속과 표면유속의 비가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 조도가 유속감소현상에 미치는 영향은 Froude 수에 비해 미미한 것으로 나타났다.

또한 미국지질조사국(United States Geological Survey, 1982)에서는 개수로 흐름의 유속분포가 전형적인 대수법칙에 따른 유속분포의 형태를 띠고 최대유속이 수표면에서 발생한다고 가정하였을 때, 표면유속과 평균유속의 비  $U_m/U_s$ 는 0.85 ~ 0.86의 범위를 갖으며, 일반적으로 0.85의 값을 사용하도록 하고 있다. 그러나 본 연구에서는 최대유속 발생지점이 그림 6 및 7에서와 같이 수표면이 아닌 바닥에서 0.63 ~ 0.82에 위치하므로 0.85의 값을 사용하는 것은 실제흐름에는 맞지 않는 것을 알 수 있다.

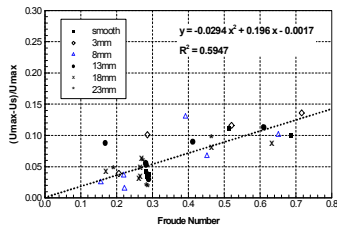


그림 6  $(U_{max}-U_s)/U_{max}$  와 Froude 수의 관계

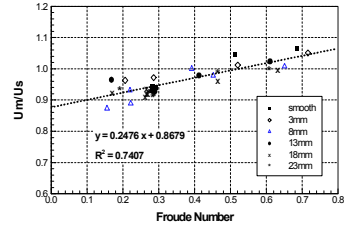


그림 7  $U_m/U_s$ 와 Froude 수의 관계

최대유속과 평균유속의 발생지점의 변화는 그림 8 및 9에서와 같이 Froude 수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며 조도에 따라서는 그림 10 및 11에서와 같이 어떠한 규칙도 발견되지 않았다. 그러므로 조도는 최대유속과 평균유속의 발생지점의 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

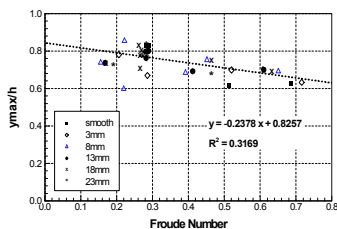


그림 8  $y_{max}$ 와 Froude 수의 관계

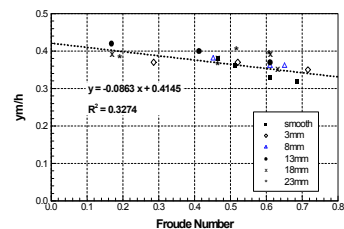


그림 9  $y_m$ 와 Froude 수의 관계

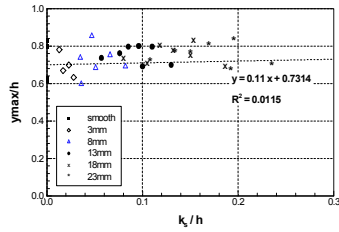


그림 10  $y_{max}$ 와  $k_s/h$ 의 관계

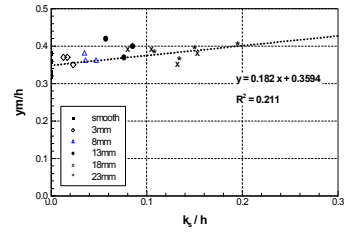


그림 11  $y_m$ 와  $k_s/h$ 의 관계

## 5. 결론

하상조건 및 Froude 수의 변화에 대한 유속분포의 변화를 파악하기 위하여 PIV(입자영상유속계) 및 1차원 프로펠러 유속계를 이용한 수리실험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 최대유속은 Froude 수에 따라 바닥에서  $0.6 \sim 0.8h$  지점에서 발생하며, 최대 유속발생 지점으로부터 수표면까지 유속 감소한다.
2. 내부영역에서는 조도의 영향이 크며 외부 영역에서는 Froude 수의 변화에 영향이 크다. 또한 외부 영역에서는 Froude 수가 증가함에 따라 자유표면 유속감소 현상이 증가한다. 또한 평균유속은 Froude 수 변화에 관계없이 수면으로부터  $0.6h$  부근에 위치한다.
3. 수표면 영역 유속은 Froude 수가 증가함에 따라 크게 감소하며, 최대유속과 표면유속의 차와 평균유속과 표면유속의 비가 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 조도가 유속감소현상에 미치는 영향은 Froude 수에 비해 미미하다.
4. USGS는 표면유속과 평균유속의 비  $U_m/U_s$ 는  $0.85 \sim 0.86$ 의 범위를 갖으며, 일반적으로  $0.85$ 의 값을 사용하도록 제안하였으나 본 연구 결과 최대유속 발생지점이 수표면이 아닌 바닥에서  $0.63 \sim 0.82$ 에 위치하므로  $0.85$ 의 값을 사용하는 것은 실제흐름에는 맞지 않는 것을 알 수 있다.
5. Froude 수가 증가함에 따라 최대유속 및 평균유속 발생지점 변화는 감소하였다. 조도에 따른 최대유속 및 평균유속 발생 지점 변화는 불규칙적이어서 조도는 큰 영향을 미치지 않는다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:2-1-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. Coles, D. (1956). "The law of the wake in the turbulent boundary layer." J. of Fluid Mechanics, 1, pp. 191-226.
2. Guo, J. (1998). "Turbulent velocity profiles in clear water and sediment-raden flows." Ph.D thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
3. Kundu, P. K. (1990). Fluid Mechanics, Academic Press, New York.
4. Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows, IAHR Monograph series, Balkema, Rotterdam.
5. Yu, K. (2004). "Particle tracking of suspended-sediment velocities in open-channel flow." Ph.D thesis, Univ. of Iowa, Iowa city, IOWA.